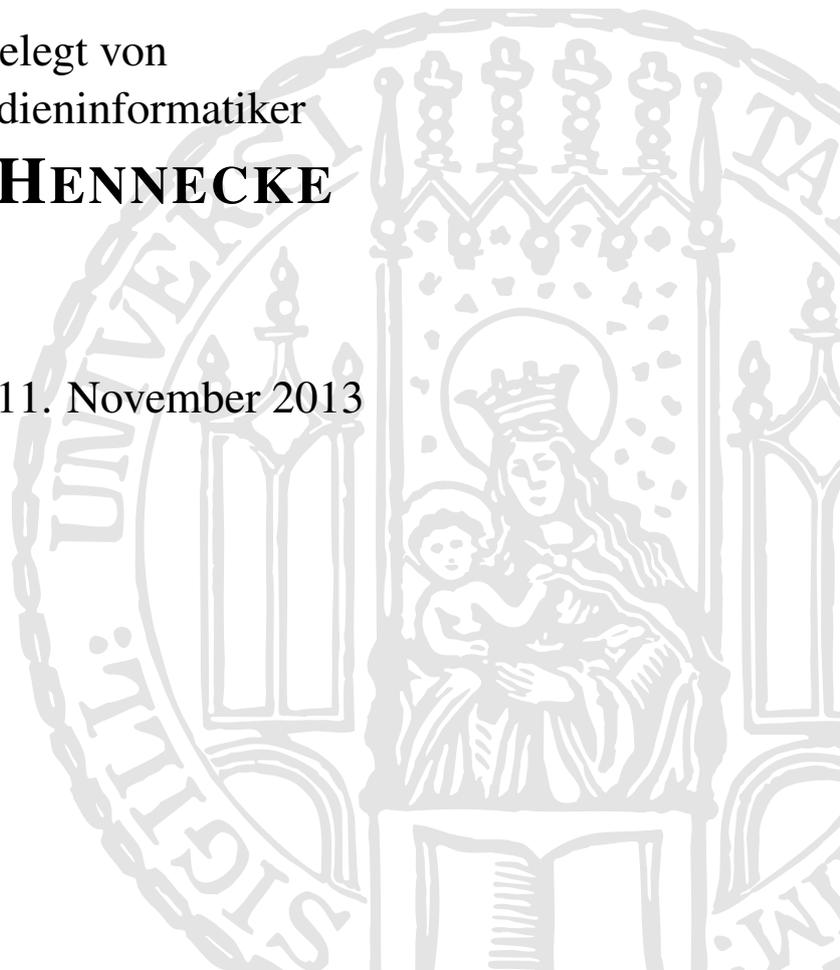

EFFEKTE UND POTENZIALE EINES GEBOGENEN INTERAKTIVEN DISPLAYS

DISSERTATION

an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Statistik
der Ludwig-Maximilians-Universität München

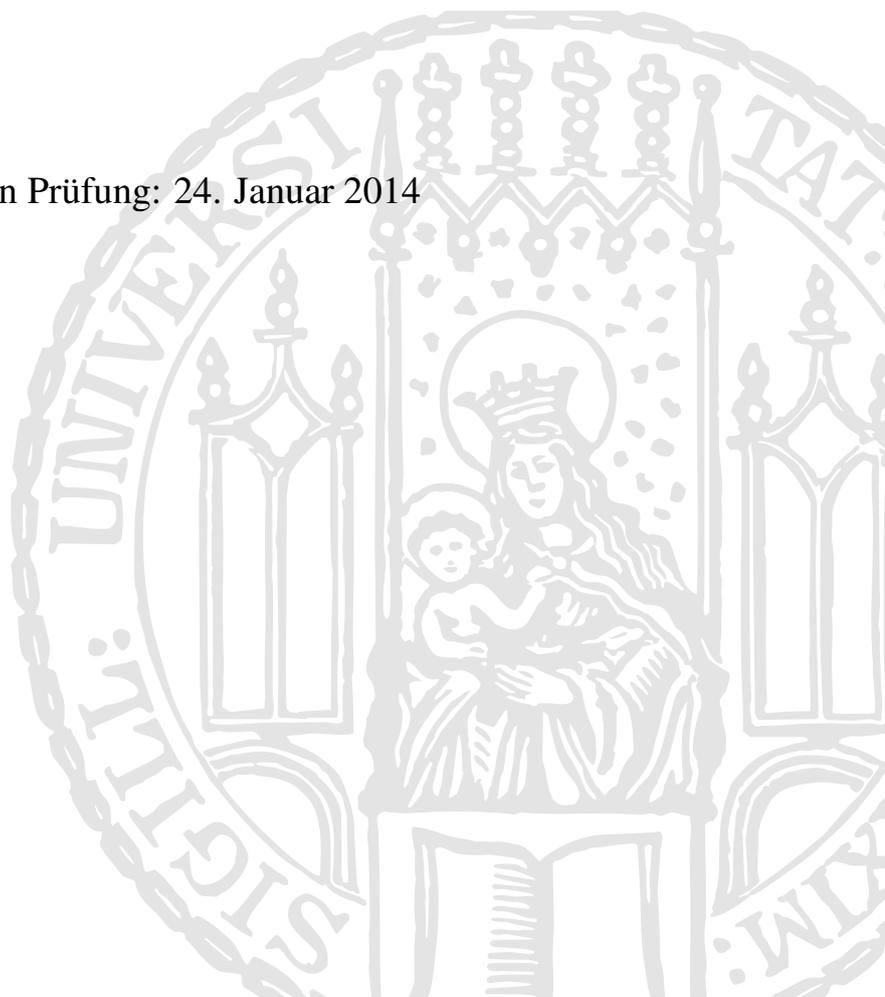
vorgelegt von
Diplom-Medieninformatiker
FABIAN HENNECKE

München, den 11. November 2013



Erstgutachter: Prof. Dr. Andreas Butz
Zweitgutachter: Prof. Dr. Harald Reiterer

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Januar 2014



ZUSAMMENFASSUNG

Ein heutiger Computerarbeitsplatz besteht normalerweise aus einer horizontalen Arbeitsfläche und mindestens einem vertikalen Bildschirm. Beide Orientierungen der Arbeitsbereiche haben Vorteile für einzelne Arbeitsschritte. Auf vertikalen Flächen ist beispielsweise das Lesen langer Texte ergonomischer, während das direkte Bearbeiten von Texten auf horizontalen Flächen weniger anstrengend ist. Der Wechsel zwischen den beiden Arbeitsbereichen ist jedoch umständlich, da die horizontale Arbeitsfläche häufig nicht digital ist. Doch selbst die steigende Verbreitung berührungsempfindlicher Bildschirme im horizontalen Arbeitsbereich (z.B. Tablets) löst dieses Problem nicht. Zwar bringen diese Geräte zum einen die Vorteile direkter Interaktion mit sich, führen aber zum anderen zur Frage, wie die digitalen Inhalte zwischen den unterschiedlich orientierten, digitalen Bereichen ausgetauscht werden.

Eine Lösung hierfür ist die Kombination unterschiedlich orientierter Displays. Es gibt mehrere Ansätze diese zu kombinieren, jedoch sind die Displays dabei meistens physikalisch voneinander getrennt. Das führt dazu, dass der Nutzer die Displays zum einen eher als separate Einheiten wahrnimmt und zum anderen kein einfacher Übergang zwischen den Displays möglich ist. Eine Verbindungsart, die bis jetzt noch weitgehend unerforscht ist, ist die Kombination beider Displaybereiche durch eine gebogene Verbindung. Die Biegung stellt eine nahtlose Verbindung und einen unterbrechungsfreien Übergang zwischen den Displaybereichen her. Der Effekt eines solchen Übergangs auf die Nutzerinteraktion ist jedoch unbekannt. Die Biegung des Bildschirms eröffnet darüber hinaus auch die Möglichkeit für neuartige Visualisierungen, die von der nahtlosen Kombination unterschiedlicher Displayorientierungen profitieren. Außerdem können auch gewöhnliche, grafische Benutzerschnittstellen hinsichtlich der Displayform optimiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein solches Display vorgestellt und dessen Effekte auf die Nutzerinteraktion und Potenziale für grafische Benutzerschnittstellen untersucht. Der Curve ist ein interaktives Display, das einen horizontalen und einen vertikalen Bereich durch eine nahtlose, gebogene Verbindung kombiniert. Im ersten Teil der Arbeit werden die Entwicklung der Displayform und die technische Umsetzung des Prototyps beschrieben. Anschließend wird im zweiten Teil der Einfluss der Displayform sowohl auf direkte als auch auf indirekte Interaktionsarten evaluiert. Außerdem wird der Curve um eine greifbare Benutzerschnittstelle erweitert und die Auswirkung der Displayform auf die Bedienbarkeit dieser Schnittstelle untersucht. Im dritten Teil werden zwei Visualisierungen und eine vorhandene, grafische Benutzerschnittstelle vorgestellt, die jeweils an die gebogene Displayform angepasst wurden. Die praktischen Erfahrungen aus den Entwicklungsprozessen werden dann in Form von Empfehlungen für vergleichbare Displayprojekte zusammengefasst. Am Ende der Arbeit stehen sowohl Ausgangspunkte für eine technische Weiterentwicklung, als auch weitere exemplarische Anwendungsszenarien, die von der gebogenen Displayform des Curve profitieren können.

ABSTRACT

The working environment in a current office usually consists of a horizontal working area and at least one vertical digital display. Both workspace orientations offer specific advantages for a certain task. While reading a long document is easier on a vertical display, editing a document is less exhausting on a horizontal working area. If a user wants to benefit from these advantages the working area has to be changed frequently, which is time-consuming as most of today's horizontal areas are non-digital. This problem even remains as more and more interactive displays (e.g. tablets) are used on the horizontal surface because the content cannot be seamlessly transferred between them. Although these interactive horizontal displays offer direct interaction with digital content, transferring digital content between both display orientations is cumbersome.

A solution for this problem is the combination of differently oriented working areas. There are different ways of combining display areas. Most of them still rely on physically separated displays. This hampers the transfer of documents from one display area to the other. The user also perceives the displays as separated areas. Another way, which could overcome these problems is a curved display connection. While the curved connection allows for a seamless transition between differently oriented display areas, it remains unclear how it simultaneously influences the interaction of the user. Besides this influence on the interaction a curved connection also allows for new ways of visualizing data using both display orientations in a single visualization or an adapted graphical user interface.

This thesis presents an approach towards a curved connection of differently oriented display areas. The Curve is an interactive display that seamlessly combines a horizontal display area and a vertically inclined display area with a curved connection. The first part of this work presents the fundamental design of the Curve and its technical implementation in terms of hard- and software. Based on the constructed prototype several studies about the Curve's influence on basic interaction techniques were conducted and are described in the second part of this thesis. These studies include direct interaction as well as indirect input using a pointing device and a first exploration of a graspable user interface. The next part describes the development of novel visualizations and a graphical user interface, which rely on the Curve's display form. Lessons learned from these projects led to a first draft of guidelines for the development of similar displays and interfaces, which conclude the third part of this thesis. The last part summarizes the entire thesis and points at possible future steps like the technical improvement of the Curve's technology and further application scenarios, which might also benefit from a curved display environment.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wäre ohne die Hilfe und Unterstützung vieler Menschen nicht möglich gewesen. Besonders bin ich meinen beiden Betreuern zu Dank verpflichtet. Andreas Butz hat sich während der gesamten Arbeit stets die Zeit genommen mir mit Rat und Tat zur Seite zu stehen. Mein Dank gilt genauso Harald Reiterer, der meine Sicht auf das Thema dieser Arbeit um einige Facetten bereichert hat. Herausheben möchte ich an dieser Stelle auch Raphael Wimmer, der mit seiner Idee für den Curve meine Arbeit überhaupt erst ermöglicht hat und Sebastian Boring, der mich beim Einstieg in die Welt der Wissenschaft unterstützt hat.

Ebenso bedanke ich mich bei allen Studenten und Personen, die im Laufe der letzten Jahre an den einzelnen Projekten mitgewirkt und diese zum Teil im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten umgesetzt haben. Die beteiligten Studenten waren (in chronologischer Reihenfolge): Stefan Grabs (2010), Melanie Kunz (2010), Corinna Lins (2010), Corinna Ragutt (2010), Florian Schulz (2010), Lenz Belzner (2011), Franz Berwein (2011), Felix Lauber (2011), Wolfgang Matzke (2011), Eduard Vodicka (2011), Axel Hösl (2012, 2013), Ngo Dieu Huong Nguyen (2012), Maximilian Schenk (2012) und Anna Tuchina (2012). Die Abschlussarbeiten werden an den entsprechenden Stellen dieser Arbeit zitiert.

Weil die Zeit während der Dissertation auch und vor allem durch die Arbeitskollegen geprägt wird, möchte ich ihnen an dieser Stelle für all die Dinge danken, die mir aus dieser Zeit in Erinnerung bleiben werden. Da sind zum einen die vielen verschiedenen IDCs in Seon, Venedig und Herrsching. Neben dem thematischen Feedback haben Ereignisse wie ein Steg am See (Selbstausrücker sind gefährliche Werkzeuge!) oder die Abende auf San Servolo diese Fahrten auf grandiose Weise geprägt. Vielen Dank auch für die tollen Erlebnisse auf den Konferenzreisen. Ich hoffe, dass sich die Munich Reception tatsächlich noch etabliert und dass die Lehrstuhl-Erstbesteigung des Tafelbergs nicht die Letzte ihrer Art war!

Auch die vielen kleinen Dinge des Alltags haben die Atmosphäre geprägt und dazu beigetragen, dass ich auch trotz der vielen Arbeit immer wieder auf den Boden der guten Laune zurückgeholt wurde: der Spamchannel in all seinen Variationen, das Lehrstuhlmeeting, die stetigen Besuche der Tee-Fraktion des zweiten Stocks in unserem Büro, die gemeinsamen Ausflüge der Kaffee-Fraktion des zweiten Stocks in den fünften Stock, Essensdiskussionen mit mehr als zwölf Personen, die BuLi-Mittagessen, die kicktipp-Gruppe, vereinzelte Nerf-Gun Scharmützel in den Fluren oder der Firmenlauf und die Laufbegeisterung danach.

Für all diese Dinge und die tolle Zeit am Lehrstuhl bleibt nur eins zu sagen:

*Ich brauch', glaub ich
nur dieses eine Wort sagen:
Herzlichen Dank!*

– Horst Hrubesch, ehem. Fußballprofi –

INHALTSVERZEICHNIS

I	EINFÜHRUNG	1
1	Motivation	3
1.1	Problembeschreibung	5
1.1.1	Unterschiedliche Arbeitsbereiche	5
1.1.2	Verbindung zwischen Arbeitsbereichen	6
1.2	Wissenschaftlicher Beitrag	7
1.3	Aufbau	8
2	Verwandte Arbeiten	11
2.1	Technische Grundlagen für interaktive Displays	12
2.1.1	Darstellung von Inhalten	12
2.1.2	Direkte Interaktion mit dem Display	15
2.2	Planare Interaktive Displays	19
2.2.1	Horizontale Displays	19
2.2.2	Vertikale Displays	24
2.3	Non-planare Interaktive Displays	26
2.3.1	Multi-planare Displays	27
2.3.2	Gebogene Displays	29
3	Der Curve	33
3.1	Entwicklung	34
3.1.1	Prototyping	34
3.1.2	Bau des Prototyps	40
3.2	Softwareanpassungen	43
3.2.1	Entzerrung der Ausgabe	44
3.2.2	Kalibrierung der Eingabe	47

II	EFFEKTE DES DISPLAYS AUF INTERAKTIONSFORMEN	49
4	Gängige Interaktionsformen	51
4.1	Verwandte Arbeiten	52
4.2	Pointing	61
4.2.1	Evaluierung	62
4.2.2	Ergebnisse	65
4.3	Dragging	72
4.3.1	Evaluierung	74
4.3.2	Ergebnisse	78
4.4	Zusammenfassung	85
4.4.1	Pointing	85
4.4.2	Dragging	86
4.4.3	Empfehlungen für die Interfacegestaltung	86
5	Greifbare Benutzerschnittstellen	89
5.1	Verwandte Arbeiten	90
5.2	Vertibles	96
5.2.1	Grundprinzip	97
5.2.2	Druckererkennung	100
5.3	Benutzbarkeit eines TUI am Curve	104
5.3.1	Explorative Studie zur TUI-Nutzung	104
5.4	Zusammenfassung	108
III	POTENZIALE FÜR NEUE BENUTZERSCHNITTSTELLEN	111
6	Visualisierungen	113
6.1	Verwandte Arbeiten	114
6.1.1	Informationsvisualisierung	114
6.1.2	Remote Collaboration	116
6.2	Perspective+Detail	119
6.2.1	Prinzip	119
6.2.2	Umsetzung	123
6.2.3	Nutzerstudie	125

6.3	PerspectiveTable	126
6.3.1	Prinzip	127
6.3.2	Umsetzung	131
6.3.3	Spatial Mirroring	132
7	Adaption eines Leitstands	143
7.1	Der Curve als Leitstand	144
7.1.1	Verwandte Arbeiten	145
7.1.2	Arbeitsabläufe	148
7.1.3	Interface-Aufteilung	150
7.1.4	Studien	154
7.2	Verwendung von Prototypingtechniken	156
7.2.1	Skalierter Papierprototyp	157
7.2.2	Maßstabsgetreuer Papierprototyp	159
7.2.3	Pixelgenauer Prototyp	162
7.2.4	Eignung der verschiedenen Prototypen	165
IV	ABSCHLUSS UND AUSBLICK	167
8	Wissenschaftlicher Beitrag	169
8.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	169
8.1.1	Effekte der gebogenen Displayform	169
8.1.2	Potenziale eines gebogenen Displays	172
8.2	Diskussion	174
8.2.1	Frühzeitige Evaluation der Displayform	174
8.2.2	Messwerte und Nutzermeinungen einbeziehen	175
8.2.3	Form des Displays nutzen	176
8.2.4	Prototyping-Methoden bewusst auswählen	177
8.3	Ausblick	177
8.3.1	Technische Weiterentwicklung	178
8.3.2	Neue Nutzungsszenarien	179
	Literaturverzeichnis	183

I

EINFÜHRUNG

Kapitel 1

Motivation

*Für mich gibt es nur 'entweder-oder'.
Also entweder voll oder ganz!*

– Toni Polster, ehem. Fußballprofi –

Der klassische Computerarbeitsplatz hat sich im Laufe der letzten Jahre stetig weiterentwickelt. Eine der offensichtlichsten Veränderung betrifft dabei die Größe der genutzten Bildschirme. Die technische Entwicklung hat dazu geführt, dass Bildschirme immer größer werden und Nutzern somit mehr Platz auf ihrem virtuellen Arbeitsbereich zur Verfügung steht. Zusätzlich hat die flachere Bauweise (z.B. durch LCD) dazu geführt, dass häufig mehrere Bildschirme an einem Arbeitsplatz eingesetzt werden. In einer solchen Arbeitsumgebung werden die unterschiedlichen Bildschirme dann meist für eine bestimmte Funktion während der Arbeitsabläufe genutzt (Donelson, 1978). Um diese Funktion optimal ausführen zu können, werden sie entsprechend positioniert und ausgerichtet (Grudin, 2001). Ein Beispiel hierfür ist das Schreiben eines Textes auf dem Hauptbildschirm, der mittig vor dem Nutzer steht, während auf einem sekundären Bildschirm am Rand des Arbeitsplatzes mögliche Zusatzinformationen verfügbar sind. Diese Erweiterung des virtuellen Arbeitsplatzes führt dazu, dass der Nutzer seine Arbeitsschritte durch verschiedene Bildschirme optimiert. Es stellt sich dann allerdings die Frage nach der optimalen Anordnung und Ausrichten dieser Bildschirme. Da sich diese optimale Ausrichtung je nach Arbeitsschritt ständig verändern kann, sollte die Displayumgebung dieses Kriterium berücksichtigen.

Neben der technischen Veränderung hat sich aber auch ein weiterer bedeutenderer Wandel vollzogen: die Art und Weise in der Nutzer mit Bildschirmen und computerbasierten Systemen interagieren. Neue Technologien erlauben es, berührungsempfindliche Displays (Touchdisplays) in unterschiedlichsten Größen zu konstruieren. Diese Touchdisplays ermöglichen eine direkte Interaktion mit den auf ihnen dargestellten Inhalten. Diese direkte Art der Interaktion und Eingabe unterscheidet sich deutlich von der traditionellen, indirekten Interaktion mit Maus und Tastatur (Wigdor u. a., 2007a; Hardy, 2012). Die Manipulation von

Inhalten und die Eingabe von Daten finden nicht mit Hilfe von zusätzlichen Geräten statt, sondern erfolgt durch die Berührung des Bildschirms. Beide Eingabearten haben Vor- und Nachteile bei verschiedenen Aufgaben (Forlines u. a., 2007). Während die Eingabe mit der Maus relativ genau ist, ist die direkte Interaktion mit einem Finger sehr schnell.

Trotz der möglichen Vorteile beider Entwicklungen hat sich bis jetzt lediglich die Nutzung mehrerer nicht-interaktiver Bildschirme auf einem Schreibtisch durchgesetzt. Im Fall der Touchdisplays lässt eine größere Verbreitung weiterhin auf sich warten (Benko u. a., 2009). Die geringe Verbreitung liegt dabei zum einen an der für direkte Interaktion ergonomisch ungünstigen Lage normaler Bildschirme. Die hierfür besser orientierten interaktiven Tischdisplays sind jedoch in Bezug auf das Lesen langer Texte nicht für einen Dauereinsatz geeignet (siehe Abbildung 1.1). Dennoch existieren erste Studien zur Einbindung eines interaktiven Tischdisplays in alltägliche Arbeitsabläufe (Wigdor u. a., 2007a; Hardy, 2012), die auch diese Probleme untersuchen und mögliche Lösungen skizzieren.

Zusätzlich zu diesem Problem ist jedoch der Platz für unterschiedlich orientierte Bildschirme auf einem normalen Schreibtisch begrenzt. Denn neben den Bildschirmen dient ein Schreibtisch auch als Abstellfläche für eine Vielzahl von anderen Dingen des täglichen Gebrauchs (Wigdor u. a., 2007a). Werden dennoch mehrere Bildschirme miteinander kombiniert, verhindern die Bildschirmränder, dass diese Kombination als ein einheitliches Display wahrgenommen wird (Chang u. a., 2002). Dies betrifft auch die mögliche direkte Interaktion mit diesen Displays, da die Bildschirmränder die Übergänge zwischen den Einzeldisplays erschweren.

All diese Probleme verhindern bislang den durchgehenden Einsatz optimal orientierter Displays für einzelne Aufgabenschritte. Eine mögliche Lösung hierfür stellt eine neuartige Displayform dar, die sowohl unterschiedliche Displayorientierungen als auch einen einfachen Wechsel zwischen diesen bietet. Eine erste Idee, wie ein solches Display und die Interaktion damit aussehen kann, hat Tognazzini 1994 mit seinem Starfire-Videoprototyp gezeigt (Tognazzini, 1994) (siehe Abschnitt 2.3.2). Ähnlich wie ein Arrangement aus mehreren Displays im Vergleich zu einem Einzeldisplay verändert die hier skizzierte konkav-gebogene Displayform jedoch die Wahrnehmung und die Interaktion durch den Nutzer. Um sinnvolle Benutzeroberflächen auf einem solchen Display zu entwickeln, bedarf es also grundlegender Studien (Benko, 2009).

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, wie ein solches gebogenes Display die Vorteile unterschiedlicher Displayorientierungen und direkter Interaktion sinnvoll miteinander kombinieren kann und welchen Einfluss diese Kombination auf Nutzer hat. Der Ausgangspunkt dieser Arbeit ist ein klassischer Computer-Arbeitsplatz. Dessen Grundkonzept soll durch ein großes, gebogenes und vollständig interaktives Display erweitert werden.

Die Struktur der Arbeit orientiert sich dabei an den Einflüssen der Displayform auf die Interaktion des Nutzers und dem darauf aufbauenden Potenzial für neuartige, verbesserte Benutzeroberflächen.

1.1 Problembeschreibung

Der klassische Computer-Arbeitsplatz besteht im Wesentlichen aus einem physikalischen Schreibtisch und einem Bildschirmaufbau, der eine virtuelle Erweiterung des Schreibtisches bietet (Desktop). Diese Erweiterung besteht mittlerweile häufig aus mehreren Bildschirmen. Somit ist die **vertikale** Fläche einer heutigen Arbeitsumgebung nahezu ausschließlich digital und wird meistens indirekt mit Maus und Tastatur gesteuert. Auf dieser Fläche lassen sich die Teilschritte täglicher Arbeitsabläufe jedoch nicht auf einen speziellen Teil oder Monitor beschränken. Die Bereiche werden vielmehr im Wechsel genutzt, so dass die Einzeldisplays meist bestimmten Arbeitsschritten dienen.

Betrachtet man die klassische Nutzung der **horizontalen** Fläche eines Schreibtisches, fällt auf, dass diese meist nicht digital ist und lediglich als Armstütze oder Ablage genutzt wird. In den letzten Jahren finden sich hier zwar vermehrt Tablets, die eine direkte Interaktion mit digitalen Inhalten ermöglichen, sie sind aber nur über Umwege mit dem Computer verbunden. Die Einbindung in Arbeitsabläufe und der damit verbundene Wechsel zwischen Computerdisplay und Tablet sind relativ umständlich. Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass ein zusätzliches horizontales Display in Kombination mit vertikalen Displays einen Mehrwert für den Nutzer bietet (Shen u. a., 2006). Zwar besteht in der Nutzbarkeit dieser Fläche kein großer Unterschied zu vertikalen Displays (Wigdor u. a., 2007a), doch treten bei längerer Nutzung ergonomische Probleme auf (Morris u. a., 2008).

Im Folgenden werden zwei wesentliche Faktoren dieses Problembereichs genauer erklärt. Das grundlegende Problem besteht aus der Eignung unterschiedlich orientierter Displays für verschiedene Arbeitsabläufe. Je nach Arbeitsschritt ist eine andere Displayorientierung sinnvoll. Es ist also wichtig, für einzelne Schritte die jeweils passende Displayorientierung anzubieten. Die Kombination verschiedener Displayorientierungen in einer Arbeitsumgebung führt aber zu einem weiteren Problem. Will der Nutzer zwischen einzelnen Displays wechseln, muss dieser Wechsel schnell und einfach möglich sein. Jedoch beeinflusst die Art der Verbindung sowohl die Wahrnehmung der Displayumgebung durch den Nutzer als auch die Interaktion des Nutzers zwischen den Displays. Im Folgenden werden diese beiden Probleme anhand einfacher Beispiele veranschaulicht.

1.1.1 Unterschiedliche Arbeitsbereiche

Ein Beispiel, das sehr stark von unterschiedlichen Arbeitsbereichen profitiert, ist das aktive Lesen von Texten und Dokumenten. Die Korrektur eines umfangreichen Dokuments kann auf zwei Arten geschehen: auf Papier oder direkt an einem Bildschirm. In einer Studie (Morris u. a., 2007) wurde gezeigt, dass die verschiedenen Stufen des aktiven Lesens und Korrigierens von der digitalen Darstellung und den damit verbundenen Möglichkeiten im Vergleich zur Arbeit auf Papier profitieren.

Im Fall der Bildschirmkorrektur ist das Lesen langer Texte auf einem vertikalen Display kein Problem, da der Nacken relativ entspannt gehalten werden kann (siehe Abbildung 1.1).

Muss der Text jedoch annotiert oder bearbeitet werden, ist eine vertikale Orientierung problematisch. Denn entweder muss der Nutzer dann mit Maus und Tastatur interagieren und dafür seinen Fokus kurzzeitig vom Text nehmen oder direkt mit der vertikalen Fläche interagieren. Die direkte Interaktion ist zwar schneller als die Eingabe mit einem zusätzlichen Gerät, jedoch kann die vertikale Ausrichtung des Bildschirms auf Dauer zu Ermüdungen im Arm- und Schulterbereich führen (Sears, 1991). Ein vertikaler Bereich ist also zwar gut geeignet, um längere Zeit darauf zu lesen, erschwert jedoch das direkte Bearbeiten der dort dargestellten Texte.

Genau andersherum verhält es sich mit dem Lesen und Bearbeiten langer Texte auf einer horizontalen Fläche. Hier ist die direkte Interaktion auch auf Dauer problemlos möglich, da die Arme am Rand des Displays abgestützt werden können. Sie müssen also nicht wiederholt angehoben oder auf längere Zeit hochgehalten werden. Allerdings fällt das Lesen langer Texte auf einer horizontalen Fläche schwer, da auf Dauer das Genick des Nutzers ermüdet (siehe Abbildung 1.1).

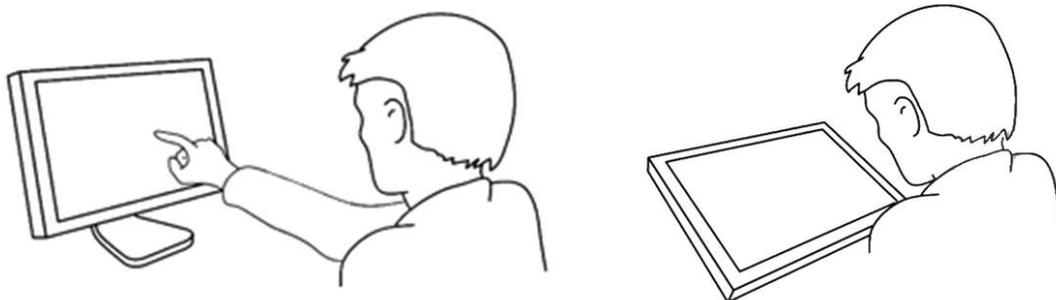


Abbildung 1.1: Unterschiedliche Displayorientierungen sind unterschiedlich gut für bestimmte Aktivitäten geeignet: Lesen auf einer horizontalen Ebene ist auf Dauer ermüdend, genauso wie die direkte Interaktion mit einem vertikalen Display (in Anlehnung an Matzke, 2011).

Beide Displayorientierungen bieten also Vorteile für verschiedene Arbeitsschritte innerhalb einer Aufgabe. Im Rahmen dieser Überlegungen ist es also vielversprechend unterschiedliche orientierte Displayflächen miteinander zu kombinieren. Auf diese Weise steht dem Nutzer frei den jeweiligen Arbeitsschritt auf der dafür optimal orientierten Arbeitsfläche auszuführen. Allerdings ergibt sich hierdurch ein Problem: die Inhalte müssen einfach und unkompliziert von einem Bereich zum anderen transferiert werden können. Hierbei kommt es zum einen auf die räumliche Nähe der Bereiche an, jedoch auch auf die Art und Weise wie diese miteinander verbunden sind.

1.1.2 Verbindung zwischen Arbeitsbereichen

Bei klassischen Computerarbeitsplätzen sind einzelne Arbeitsbereiche häufig voneinander getrennt. Die erste Trennung besteht darin, dass die vertikale Arbeitsfläche meist digital ist,

während die horizontale Arbeitsfläche aus physikalischen Objekten besteht. Ein Dokument, das auf dem Bildschirm bearbeitet wird, muss zum Lesen und Annotieren ausgedruckt werden, wenn dies auf der horizontalen Fläche geschehen soll. Mögliche Änderungen müssen anschließend jedoch wieder manuell digitalisiert werden, was zu einer zusätzlichen Arbeit bedeutet und zu anderen Fehlern verursachen kann. Diese Art der Trennung gestaltet den Wechsel zwischen den unterschiedlich orientierten Arbeitsbereichen also äußerst umständlich.

Eine andere Möglichkeit besteht jedoch in der Anpassung der Arbeitsumgebung. Beispielsweise erlaubt die Integration eines Displays in den horizontalen Arbeitsbereich einen einfacheren Übergang zwischen den verschiedenen orientierten Bereichen. Dieses zusätzliche Display ist bisher jedoch nicht nahtlos mit dem vertikalen Arbeitsbereich verbunden. Durch die räumliche Trennung und die vorhandenen Bildschirmränder nimmt ein Nutzer die beiden Arbeitsbereiche als getrennte Einheiten wahr. Außerdem müssen Techniken angeboten werden, die den einfachen Transfer von Dokumenten zwischen diesen beiden Displaybereichen ermöglichen.

1.2 Wissenschaftlicher Beitrag

Der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit besteht aus der Untersuchung dieser Problemfelder und dem Ausarbeiten möglicher Lösungen. Um das Problem der optimalen Ausrichtung einzelner Arbeitsbereiche zu lösen, bietet es sich an, verschiedene Arbeitsflächen innerhalb einer Arbeitsumgebung miteinander zu kombinieren. Die Grundidee dafür ist mit einem Multi-Monitor-System vergleichbar, bei dem die einzelnen Displays unterschiedliche Orientierungen aufweisen. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher ein System, das aus einem vertikal und einem horizontal orientierten Displaybereich besteht, vorgestellt und untersucht: der Curve.

Der Beitrag beginnt dabei schon bei der Art der Verbindung dieser Displaybereiche. Die einfachste Möglichkeit ist die Verwendung normaler Monitore, was zu einer Verbindung über die Monitorrahmen hinweg führt. Eine weitere Möglichkeit stellt die Verwendung von randlosen Displays dar. Diese erlauben es, die Displaybereiche ohne physikalische Barriere und mit Hilfe einer kantigen Verbindung zu kombinieren. Darüber hinaus ist eine gebogene Verbindung wie im Starfire-Videoprototyp (Tognazzini, 1994) möglich. Diese Verbindung verschmelzt die beiden separaten Displaybereiche zu einem großen, gebogenen Display.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden das Konzept und der Nutzen eines solchen gebogenen Displays untersucht. Dazu wurde ein erster Prototyp gebaut und eine funktionsfähige Software-Umgebung aufgesetzt. Da diese Displaykonfiguration jedoch nicht mit herkömmlicher Software kompatibel ist, mussten hier zuerst grundsätzliche Lösungen gefunden werden, um anschließend Anwendungen für das Display zu entwickeln. Die Arbeit teilt sich insgesamt in zwei große Bereiche, die sich an den folgenden beiden Forschungsfragen orientieren.

Forschungsfrage 1: Welchen Einfluss hat eine gebogene Displayform auf die Nutzerinteraktion?

Bisherige Arbeiten haben bereits nachgewiesen, dass die Größe und Ausrichtung eines Displays einen Einfluss auf die Nutzerinteraktion haben. Daher ist davon auszugehen, dass auch dessen Form einen Einfluss auf die Geschwindigkeit und die Genauigkeit der Interaktion hat. Als grundlegende Interaktionsarten heutiger interaktiver Systeme sind hier die indirekte Eingabe mit einer Maus und die direkte Interaktion per Berührung zu untersuchen. Beide sind im Rahmen eines Einzelarbeitsplatzes denkbar. Stellvertretend für neuartige Interaktionskonzepte werden außerdem greifbare Benutzerschnittstellen (Tangible User Interfaces, TUI) hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit untersucht. Dabei spielen einerseits die Umsetzung eines TUI, das auf dem gesamten Display genutzt werden kann, eine Rolle und andererseits der Einfluss der Position und der Orientierung der Steuerungsobjekte.

Forschungsfrage 2: Welche Potenziale bietet eine gebogene Displayform für grafische Benutzerschnittstellen?

Der Starfire-Videoprototyp (Tognazzini, 1994) hat bereits verschiedene Möglichkeiten und Vorteile eines gebogenen Displays skizziert. Die verschiedenen Displaybereiche können dabei ihre jeweiligen Vorteile in ganz bestimmten Teilaufgaben ausspielen. Die Entwicklung von Benutzeroberflächen für ein gebogenes Display wie den Curve muss diese Vorteile der einzelnen Bereiche im Rahmen der Konzeption berücksichtigen. Es stellt sich also die generelle Frage, welche Vorteile die einzelnen Bereiche bieten und wie diese in verschiedenen Anwendungsfällen genutzt werden können. Da sich die gebogene Displayform von bisherigen Systemen unterscheidet, stellt sich hierbei auch die Frage, wie dies die Entwicklung von Benutzeroberflächen beeinflusst. Es stehen also sowohl neuartige grafische Benutzeroberflächen als auch deren Entwicklungs- und Konzeptionsmethoden im Mittelpunkt dieser Frage.

1.3 Aufbau

Diese Arbeit ist in vier Teilen organisiert. Teil I stellt das Thema der Arbeit, die zwei grundlegenden Forschungsfragen und verwandte Arbeiten vor, die im Allgemeinen für diese Arbeit relevant sind. Teil II beschäftigt sich anhand des Curve mit den Effekten eines gebogenen Displays auf unterschiedliche Interaktionsformen. Teil III beschreibt die Potenziale für grafische Benutzerschnittstellen, die auf dem Curve konzeptioniert und umgesetzt wurden. Teil IV fasst die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen, formuliert vier Empfehlungen für das Vorgehen bei vergleichbaren Projekten und zeigt mögliche Forschungsfelder für zukünftige Entwicklungen auf.

Die folgenden Absätze fassen die Inhalte der jeweiligen Kapitel zusammen. Die Kapitel selbst beginnen mit einer übergreifenden Kapitelfrage, die die Fragestellung der einzelnen

Kapitel jeweils knapp zusammenfasst. Als Antwort auf diese Frage befinden sich außerdem kurze Zusammenfassungen im Stile der im Internet verbreiteten *tl;dr*-Form (*too long; didn't read*), die den wesentlichen Inhalt des Kapitels wiedergeben.

TEIL I

Kapitel 1 – Motivation fasst die grundlegenden Überlegungen und die Zielsetzung dieser Arbeit zusammen. Ausgehend von einem klassischen Computerarbeitsplatz wird die Idee eines nahtlos gebogenen Displays als Weiterentwicklung in diesem Bereich vorgestellt. Anhand von den zwei zentralen Forschungsfragen dieser Arbeit werden die folgenden Kapitel motiviert.

Kapitel 2 – Verwandte Arbeiten enthält Projekte, die mit dieser Arbeit im Allgemeinen in Verbindung stehen. Der erste Teil dieses Kapitels behandelt planare interaktive Oberflächen, die anhand ihrer Orientierung zum Nutzer getrennt voneinander beschrieben werden. Das Kapitel schließt mit einer Übersicht über bereits existierende Forschung zu non-planaren interaktiven Displays.

Kapitel 3 – Curve beschreibt die Entwicklung des gebogenen Displays, das dieser Arbeit zugrunde liegt. Dabei werden zuerst die grundlegende Idee und die Evaluierung der Displaydimensionen beschrieben. Anschließend wird die technische Umsetzung getrennt nach Hardware und Software erläutert.

TEIL II

Kapitel 4 – Gängige Interaktionsformen fasst die Untersuchungen zum Einfluss der gebogenen Displayform des Curve auf gängige Interaktionsformen zusammen. Hierbei werden sowohl die indirekte Eingabe per Maus, als auch die direkte Eingabe per Touch evaluiert. Untersucht werden einfache Selektionsaufgaben (Pointing) und das Verschieben von Objekten (Dragging) durch die Displaykurve.

Kapitel 5 – Greifbare Benutzerschnittstellen umfasst Untersuchungen zur Eignung einer greifbaren Benutzerschnittstelle am Curve. Nach einem Überblick über die Herausforderungen dieses Bedienkonzepts werden die technischen Grundlagen erläutert, die nötig sind, um ein Tangible User Interface auf beiden Displaybereichen des Curve einzusetzen. Abschließend wird eine Studie vorgestellt, die die Steuerung mit physikalischen Objekten auf beiden Displaybereichen des Curve untersucht.

TEIL III

Kapitel 6 – Visualisierungen beschreibt zwei Prototypen, die das gebogene Display des Curve für eine perspektivische Informationsvisualisierung nutzen. Während anhand des ersten Prototyps *Perspective+Detail* die Grundlagen für diese Art der Visualisierung beschrieben werden, erweitert der zweite Prototyp *PerspectiveTable* dieses Konzept um Möglichkeiten zur Kollaboration über Distanz. Basierend auf

der perspektivischen Darstellungsform des PerspectiveTable wird außerdem *Spatial Mirroring* erklärt - eine Technik, die das räumliche Referenzsystem zweier entfernter Arbeitspartner angleicht und damit die Zusammenarbeit vereinfacht.

Kapitel 7 – Adaption eines Leitstands besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil beschreibt das Design und die Evaluierung einer Leitstandsumgebung für den Curve im Bereich des Katastrophenschutzmanagements. Der zweite Teil des Kapitels diskutiert anschließend die genutzten Prototypingtechniken und deren Eignung zur Entwicklung einer grafischen Benutzerschnittstelle auf einem großen, gebogenen Display wie dem Curve.

TEIL IV

Kapitel 8 – Wissenschaftlicher Beitrag enthält zuerst eine Zusammenfassung aller Ergebnisse dieser Arbeit. Aus den Ergebnissen werden vier Empfehlungen für vergleichbare Forschungsprojekte abgeleitet. Im abschließenden Ausblick werden noch offene Forschungsfragen diskutiert und mögliche Richtungen für Folgearbeiten beschrieben.

Kapitel 2

Verwandte Arbeiten

*Wenn man zu früh auf andere schaut,
vergisst man
das Wesentliche aus den Augen zu verlieren.*

– Jens Nowotny, ehem. Fußballprofi –

Da die beiden Forschungsfragen viele Themen aus den Bereichen Technik und Mensch-Maschine-Interaktion berühren, stellt dieses Kapitel zunächst verwandte Arbeiten vor, die im Allgemeinen für diese Arbeit relevant sind. Dazu erfolgt als erstes eine Einführung in die technischen Grundlagen heutiger interaktiver Displays. Im Anschluss daran findet sich eine Übersicht über verschiedene interaktive Displays. Den Anfang machen hier nicht-gebogene (planare) interaktiven Displays, gefolgt von einer Zusammenfassung bisheriger non-planarer interaktiver Displays.

Die planaren Displays werden in dieser Aufstellung je nach ihrer Orientierung zum Nutzer in horizontale und vertikale Displays eingeteilt. Non-planare Displays werden zur besseren Übersicht in multi-planare Systeme, die aus mehreren planaren Oberflächen bestehen, und durchgehende, gebogene Systeme eingeteilt. Insgesamt werden dabei sowohl Forschungsprojekte als auch kommerzielle Systeme vorgestellt. Um den thematischen Fokus zu dieser Arbeit nicht zu stark zu vergrößern, werden ausschließlich Systeme von vergleichbarer Größe wie der Curve vorgestellt. Somit finden sich an dieser Stelle Displays von der Größe kleiner Tische bis hin zu größeren Wanddisplays. Verwandte Arbeiten, die thematisch jedoch eher zu den jeweiligen Teilkapiteln dieser Arbeit passen, finden sich zu Beginn der entsprechenden Abschnitte.

2.1 Technische Grundlagen für interaktive Displays

Dieser Abschnitt stellt die wesentlichen technischen Grundlagen vor, auf denen interaktive Displays normalerweise beruhen und die beim Bau des Curve-Prototypen (Wimmer u. a., 2009) in Betracht gezogen wurden (siehe Kapitel 3). Zu diesem Zweck werden zuerst Techniken zur Darstellung von Inhalten auf interaktiven Displays kategorisiert und beschrieben. Anschließend werden verschiedene Verfahren vorgestellt, die die direkte Interaktion mit einem solchen Display ermöglichen.

2.1.1 Darstellung von Inhalten

Um Inhalte auf einer Oberfläche darzustellen sind verschiedene Techniken verfügbar. Im Folgenden werden diese durch die Eigenschaft *aktive* oder *passive* Darstellung unterschieden und ihre grundlegende Funktionsweise beschrieben. Als aktiv gelten hierbei Techniken bei denen die Oberfläche selbst die Darstellung der Inhalte aktiv übernimmt und die auf keine externen Geräte zur Darstellung von Inhalten angewiesen ist. Bei passiven Techniken werden hingegen die Inhalte durch zusätzliche Geräte auf die Oberfläche projiziert. Sie selbst muss daher keine Technik enthalten.

Aktive Darstellung

Die Techniken zur *aktiven* Darstellung von Inhalten auf einer Oberfläche basieren alle auf einer Pixelrepräsentation innerhalb der Darstellungsfläche. Aus diesem Grund kann diese Art der Darstellung nur auf einer zuvor definierten Fläche erfolgen kann. Ein Verfahren, das die weitverbreiteten Röhrenbildschirme in den letzten Jahren mehr und mehr abgelöst hat, sind die Liquid Crystal Displays (LCD). Dabei werden sogenannte fließende oder flüssige Kristalle, erstmals Ende des 19. Jahrhunderts beschrieben (Reinitzer, 1888), verwendet. Flüssige Kristalle bilden dazu einzeln manipulierbare Bildpunkte, die von hinten mit einer Lichtquelle durchleuchtet werden. Punkte, deren Kristalle nicht lichtdurchlässig sind, erscheinen für den Betrachter schwarz bzw. dunkel im Vergleich zum restlichen Bild. Die LCD-Technik ist mittlerweile zwar sehr ausgereift (Kawamoto, 2002) und eignet sich zum Bau von planaren interaktiven Oberflächen. Der Bau non-planarer interaktiven Display-Prototypen ist mit der LCD-Technik ist hingegen noch relativ unerforscht und spielt aufgrund der steigenden Verbreitung von OLED (s.u) in Zukunft vermutlich auch keine Rolle mehr. Zusätzlich spricht die Blickwinkelabhängigkeit der LCD-Technik gegen einen Einsatz in non-planaren Displays (Oetjen u. Ziefle, 2009).

1966 wurde mit den Plasma-Bildschirmen (Bitzer u. Slottow, 1966) eine weitere Bildschirmtechnologie vorgestellt. Während beim damaligen Prototyp ein Pixel nur aus einem einzelnen Punkt bestand, bestehen die Bildpixel bei heutigen Plasma-Bildschirmen aus drei einzelnen ansteuerbaren Farbpunkten. Plasma-Bildschirme benötigen jedoch keine zusätzliche

Hintergrundbeleuchtung, denn die Technik basiert auf Gasen, die leuchten, wenn sie ionisiert werden. Dazu befinden sich innerhalb der Farbpunkte unterschiedliche Gase, die durch eine kurzzeitige elektrische Zündung in Plasma verwandelt werden und dabei leuchten. Über die Frequenz, mit der dies geschieht, lassen sich so auch unterschiedliche Helligkeitsstufen für jedes Pixel realisieren.

Im Vergleich zu LC-Displays bieten Plasma-Bildschirme bessere Darstellungskontraste und eine höhere Blickwinkel-Unabhängigkeit. Sie leiden allerdings unter dem Problem des Einbrennens von Bildern wenn diese zu lang unverändert dargestellt werden (Correa u. a., 2002). Außerdem eignen sie sich ebenso wenig für den Bau eines gebogenen Display-Prototyps wie LC-Displays.

Eine ebenfalls pixelbasierte Technologie, die bereits in den 1970er Jahren bei Xerox entwickelt wurde (Sheridon u. Berkovitz, 1977), ist das sogenannte elektronische Papier. Wie die LC-Displays basiert auch diese Art des Displays auf der Manipulation einzelner Pixel, die beim elektronischen Papier jedoch nicht lichtdurchlässig sind. Bei der ersten Version dieser Technologie bestanden diese Pixel aus kleinen Kugeln, die zur Hälfte weiß und zur anderen Hälfte schwarz waren. Durch statische Ladung wurden diese Kugeln dann gezielt so gedreht, dass einzelne Punkte für den Betrachter jeweils schwarz oder weiß erscheinen. Hierfür ist - ähnlich wie bei normalem Papier - keine Hintergrundbeleuchtung nötig, sondern lediglich eine ausreichend helle Umgebungsbeleuchtung. Weitere Ausprägungen dieser Technik basieren unter anderem auf geladenen weißen Teilchen, die zusammen mit schwarzem Öl in transparenten Kapseln schwimmen (Comiskey u. a., 1998). Durch Anlegen von Spannung wandern diese Teilchen dann an die Außenwand der Kapsel und werden so sichtbar.

Im Gegensatz zu LCD- und Plasma-Bildschirmen kann elektronisches Papier zum Bau von gebogenen Oberflächen genutzt werden. Allerdings können diese Bildschirme bis jetzt meist nur Grautöne darstellen, auch wenn bereits erste Prototypen¹ von farbigen Displays vorgestellt wurden. Das Problem des langsamen Bildaufbaus haben diese Prototypen jedoch auch noch nicht gelöst. Die Umschaltzeiten liegen noch weiter hinter denen von anderen Darstellungstechniken.

Eine Technik, die vor allem in den letzten Jahren in immer mehr Mobiltelefonen zum Einsatz kommt, beruht auf organischen Materialien, die eine Elektrolumineszenz bei relativ niedrigen Stromspannungen bieten (Tang u. VanSlyke, 1987). Organische Leuchtdioden (OLED, Organic Light Emitting Diode) werden dazu in einer Matrix angeordnet und einzeln angesteuert. Da sie Licht emittieren, benötigen OLED-Bildschirme keine zusätzliche Hintergrundbeleuchtung. Sie haben allerdings das große Problem, dass ihre Haltbarkeit momentan nur wenigen tausend Stunden in Abhängigkeit von der Helligkeit beträgt^{2 3}.

Darüber hinaus bieten sie jedoch eine gute Möglichkeit auch große gebogene Bildschirme zu konstruieren. In Zukunft hat diese Technik also das Potenzial auf einfachem Wege sogar

¹ <http://www.hanvon.com/en/products/ebook/products-E920.html>, aufgerufen am 14.05.2013

² <http://optics.org/news/1/4/29>, abgerufen am 13.05.2013

³ <http://www.marketwire.com/press-release/nkks-extended-life-oled-smartswitch-honored-as-finalist-for-design-news-golden-mousetrap-1500907.htm>, aufgerufen am 13.05.2013

flexible und zur Laufzeit verformbare Displays zu bauen. Diese stellen dann nicht nur ein grafisches Interface dar, sondern erlauben durch ihre Form zusätzlich Interaktionen (Holman u. Vertegaal, 2008).

Passive Darstellung

Zwar beruht auch die *passive* Darstellung von digitalen Inhalten auf Pixeln, jedoch sind diese Pixel dabei nicht physikalisch in der Darstellungsfläche vorhanden. Vielmehr werden sie mittels optischer Systeme auf eine möglichst gleichmäßige Fläche projiziert. Es gibt dabei verschiedene Bauweisen von Projektoren, die sich in ihrem grundlegenden Aufbau zwar stark ähneln, in Faktoren wie dem Kontrast oder der Bildwiederholrate jedoch unterscheiden (Hereld u. a., 2000). Generell leuchtet bei einem Projektor eine Lichtquelle durch ein farbiges Medium und diese farbigen Lichtstrahlen werden anschließend durch mehrere optische Linsen fokussiert, so dass auf der planaren Projektionsfläche ein scharfes Bild erscheint. Wichtig ist dabei, dass senkrecht auf die Projektionsfläche projiziert wird, da es sonst zu einem Schärfeverlust innerhalb der Abbildung kommt.

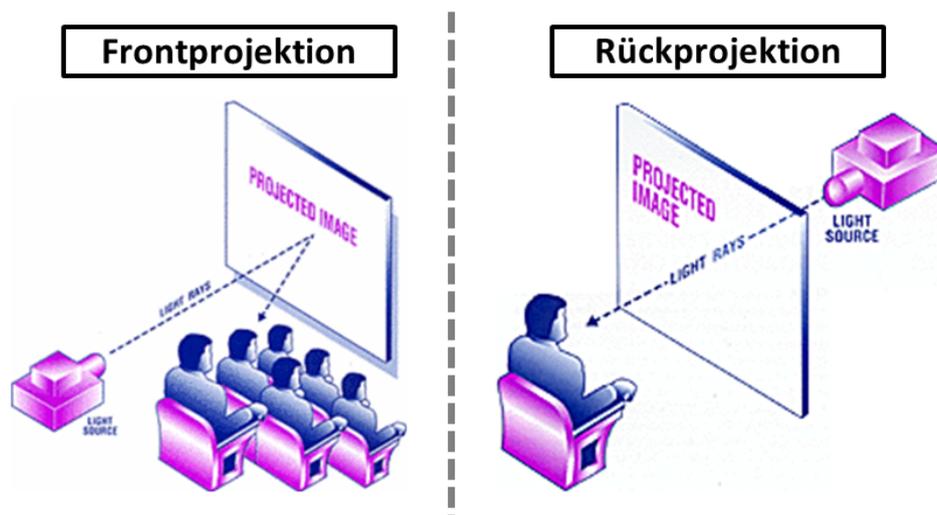


Abbildung 2.1: Unterschiedliche Projektionsarten: (links) Frontprojektion: Betrachter und Projektor auf derselben Seite, (rechts) Rückprojektion: Betrachter und Projektor auf unterschiedlichen Seiten (HoloPro, 2013).

Neben diesen technischen Unterschieden ist ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal die Seite von der auf die darstellende Fläche projiziert wird. Befinden sich der Projektor und der Betrachter auf derselben Seite der Darstellungsfläche spricht man von einer *Frontprojektion*, befinden sich Projektor und Betrachter auf den gegenüberliegenden Seiten von einer *Rückprojektion* (siehe Abbildung 2.1).

Eine Frontprojektion hat gerade während der direkten Interaktion des Nutzers auf dem Display mit Verdeckungen und Schattenwurf zu kämpfen (Cham u. a., 2003). Eine Rückprojektion umgeht dieses Problem aufgrund ihrer Bauweise (Hereld u. a., 2000). Dafür bietet

eine Frontprojektion im Vergleich meist ein helleres Bild bei gleicher Leuchtintensität des Projektors als eine Rückprojektion, da das Licht bei letzterer noch durch die Projektionsfolie hindurch muss (Rosco, 2009). Die Projektionsflächen beider Techniken sind häufig nicht miteinander kompatibel, da sich die jeweils optimalen Voraussetzungen (gute Reflexion und eine Mischung aus Lichtbrechung und -durchlässigkeit) gegenseitig widersprechen.

Insgesamt bieten Systeme auf Projektionsbasis eine Möglichkeit Inhalte auch auf gebogenen Oberflächen darzustellen, auch wenn es aufgrund des variierenden Projektionsabstands zu den oben beschriebenen Schärfeproblemen bei der Bildwiedergabe kommt. Diese können allerdings durch eine möglichst kleine Blende des Projektors - zu Lasten der Bildhelligkeit - minimiert (Bimber u. a., 2008) oder durch den Einsatz mehrerer Projektoren (Bimber u. Emmerling, 2006) oder eines Laserprojektors vollständig beseitigt werden.

2.1.2 Direkte Interaktion mit dem Display

Die direkte Interaktion mit dem Display setzt Technologien voraus, die über die reine Anzeige von Inhalten hinausgehen und die zuvor vorgestellten darstellenden Systeme erweitern. Diese interaktiven Systeme erlauben das Erkennen und Verfolgen (Tracken) des Nutzers und seiner Eingabe und die anschließende Interpretation dieser Daten. Die Idee solcher Systeme wird bereits seit den 1970er Jahren erforscht (Johnson u. Fryberger, 1972).

In Anbetracht der Vielzahl der verfügbaren Techniken (Schöning u. a., 2008) soll an dieser Stelle jedoch nur auf die Technologien eingegangen werden, die im Laufe dieser Arbeit zur Umsetzung des Curve in Betracht gezogen wurden. Technologien wie Microsoft PixelSense⁴, welches im Samsung SUR40⁵ verbaut ist und erst nach dem Bau des Curve-Prototyps (Wimmer u. a., 2009) verfügbar war, werden daher nicht näher beschrieben. Für eine einfachere Strukturierung werden die ausgewählten Technologien in *optische* und *nicht optische* Verfahren unterteilt.

Optisches Tracking

Optisches Tracking basiert auf mindestens einer Kamera, die entweder den Nutzer selbst oder die interaktive Oberfläche beobachtet. Je nach System werden dafür entweder Kameras genutzt, die im Spektrum des sichtbaren Lichts arbeiten, oder Kameras, die speziell für die Wahrnehmung von nicht-sichtbarem Licht (z.B. Infrarot) umgerüstet sind.

Ein erster Ansatz für eine optische Technik ist Diffuse Illumination (DI), was sich am ehesten mit *gestreuter Ausleuchtung* übersetzen lässt (Matsushita u. Rekimoto, 1997). Bei DI befinden sich der bildgebende Projektor und eine Tracking-Kamera hinter der Displayoberfläche, wobei die Kamera auf das Display gerichtet ist (siehe Abbildung 2.2 links). Die Displayfläche wird von hinten zusätzlich mit Infrarotlicht angestrahlt, das durch die transluzente Projektionsoberfläche hindurch aus der Displayoberfläche heraus gleichmäßig leucht-

⁴ <http://www.microsoft.com/en-us/pixelsense/default.aspx>, aufgerufen am 14.05.2013

⁵ <http://www.samsunglfd.com/product/feature.do?modelCd=SUR40>, aufgerufen am 14.05.2013

tet. Nähert sich nun ein Finger des Nutzers dem Display wird dieser Finger angeleuchtet, was wiederum die Kamera hinter der Projektionsoberfläche erkennt. Je mehr sich der Finger der Oberfläche nähert, desto heller erscheint er im Kamerabild. Bei der Berührung der Oberfläche erscheint der Finger am hellsten. Neben der Interaktion mit Fingern auf dem Display ermöglicht DI auch die Erkennung markierter Objekte, die auf dem Display liegen (Jordà u. a., 2005). Außerdem erlaubt DI die Erkennung von Gesten, die oberhalb der Displayfläche und ohne Berührung der Oberfläche ausgeführt werden (Hilliges u. a., 2009).

Allerdings ist DI sehr anfällig für für Tageslicht, da dessen infraroter Anteil das Tracking erschwert (Teichert u. a., 2010). Ebenso problematisch sind Spiegelungen des künstlichen IR-Lichts an der Display Rückseite, die zu einer teilweisen Blendung der Kamera führen (Teichert u. a., 2010). Da diese Stellen im Kamerabild stark überstrahlen, erkennt das System dort keine Eingaben mehr. Besonders bei einer gebogenen Oberfläche und der Verwendung mehrerer Kameras wird ein Aufbau ohne Reflexionen recht komplex.

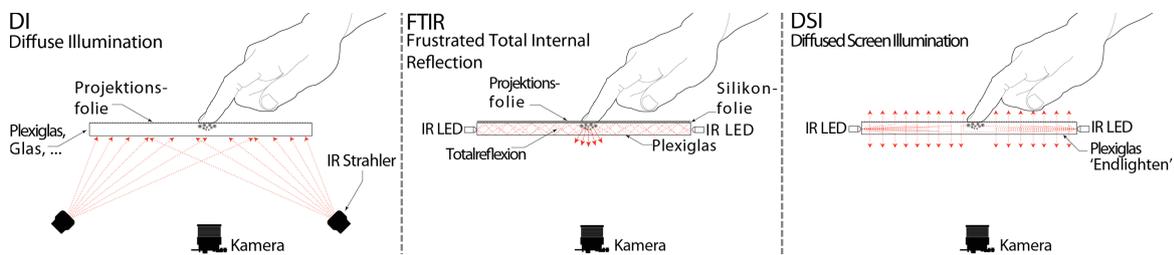


Abbildung 2.2: Kamerabasierte Touch-Erkennung durch infrarotes Licht: DI (links), FTIR (mittig) und DSI (rechts) (nach (Schöning u. a., 2008)).

Ebenfalls auf Infrarotlicht basiert das FTIR-Verfahren (Frustrated Total Internal Reflection), das 2005 erstmals für das Erfassen von direkter Interaktion beschrieben wurde (Han, 2005). FTIR nutzt das physikalische Phänomen der Totalreflexion: trifft Licht in einem bestimmten Winkel von einem optisch dichteren Material auf ein optisch dünneres Material, so wird es nahezu vollständig zurück reflektiert (siehe Abbildung 2.2 mittig). Zur Erkennung von Berührung wird daher Infrarotlicht von der Seite in eine Plexiglasplatte geleitet. Das Licht tritt nur an den Rändern aus und wird an den Seitenflächen wieder zurück in die Platte reflektiert. Sobald der Nutzer die Oberfläche berührt und somit das optisch dünnere Medium (Luft) durch ein optisch dichteres Medium (Finger) ersetzt, tritt das Infrarotlicht an dieser Stelle jedoch aus der Platte aus. Dort trifft es auf den Finger des Nutzers und wird von diesem nach unten gestreut. Eine IR-sensitive Kamera, die auf der Rückseite des Displays positioniert ist, erkennt diese Berührungspunkte.

Im Gegensatz zu DI ist FTIR weniger anfällig für Tageslicht, da die Kontrastunterschiede im Kamerabild zwischen Berührungspunkten und der nicht-berührten Oberfläche größer sind. Daher können die Bildfilter, die für die Analyse des Kamerabilds genutzt werden, Hintergrundrauschen und störende Reflexionen besser herausfiltern. In strahlendem Sonnenlicht kann aber auch ein FTIR-basiertes System nicht funktionieren. Da das Prinzip der Totalreflexion auch in einer gebogenen Plexiglasplatte funktioniert, ist FTIR ein simples Verfahren, das zur Realisierung einer gebogenen interaktiven Oberfläche in Frage kommt.

Eine Kombination der Ansätze DI und FTIR kann durch die Verwendung eines speziellen Materials erreicht werden. Bei der Diffused Surface Illumination (DSI) (Schöning u. a., 2008) wird eine Endlighten⁶ Plexiglasplatte verwendet, die Licht, das an den seitlichen Kanten eintritt, gleichmäßig über ihre kompletten Seitenflächen in beide Richtungen streut (siehe Abbildung 2.2 rechts). Während der technische Aufbau somit FTIR ähnelt, bietet das Tracking eine Kombination der Eigenschaften von FTIR und DI. DSI bietet eine einfache gleichmäßige Ausleuchtung und die Möglichkeit markierte Objekte auf der Oberfläche zu erkennen. Allerdings sind die Kontraste bei Berührungen schwächer als bei DI. Aufgrund der geringen Materialhärte ist es aber zumindest fraglich, ob eine entsprechende gebogene Oberfläche dauerhaft als Arbeitsplatz genutzt werden kann (Schöning u. a., 2008).

Während die bisher vorgestellten Verfahren mindestens eine Kamera hinter dem Display und dadurch eine gewisse Tiefe des Systems benötigen, kommen Systeme, die mit einem Aufsetzrahmen arbeiten, mit weniger Platz hinter dem Display aus. Dazu werden mindestens zwei Kameras direkt in einen Rahmen oberhalb des Displays integriert. Zusätzlich wird parallel zur kompletten Displayfläche eine schmale Lichtebene erzeugt (Laser-Light-Plane, LLP), die wie eine Lichtschranke funktioniert. Tritt ein Objekt in diese Schranke ein, reflektiert es das Licht und über Kameras in den Ecken des Rahmens kann die Position des Objekts auf dem Display mittels Triangulation ermittelt werden (siehe Abbildung 2.2). Liegt diese Lichtschranke sehr knapp oberhalb der Displayoberfläche, können auf diese Art und Weise Berührungen des Displays erkannt werden.

Das Problem bei der Umsetzung mittels Triangulation besteht darin, dass die maximale Anzahl der identifizierbaren Punkte im Gegensatz zu DI, FTIR und DSI stark begrenzt ist. Zwar kann man die Kameras im Rahmen auch durch eine Kamera hinter der Displayfläche ersetzen, die dann die Lichtreflexionen hinter dem Display identifiziert, man benötigt dann jedoch auch wieder mehr Platz für das gesamte System. Außerdem können je nach Systemaufbau bei der Interaktion mit mehreren Fingern Verdeckungen auftreten, die eine erfolgreiche Erkennung von Multitouch-Eingaben verhindern (Pickering, 1986). Als Tracking-Technologie für non-planare Displays ist LLP auch aufgrund der Abhängigkeit von der Parallelität zwischen Lichtebene und Display nicht geeignet.

Nicht-optisches Tracking

Im Bereich des nicht-optischen Trackings existieren sowohl *elektronische* Verfahren als auch ein *akustisches* Verfahren. Während die elektronischen Verfahren dabei eine zusätzliche Materialschicht auf der Projektionsfläche benötigen, setzt das akustische Verfahren lediglich Sensoren am Rand der interaktiven Oberfläche ein (Paradiso u. a., 2002).

Die erste Variante durch elektronische Komponenten eine Touch-Erkennung zu realisieren ist die resistive Touch-Erkennung, die es in mehreren Variationen gibt⁷. Grundsätzlich werden dabei zwei leitende Schichten auf der Display-Oberfläche befestigt und durch eine ex-

⁶ <http://www.plexiglas.de/product/plexiglas/de/produkte/massivplatten/endlighten/pages/default.aspx>, aufgerufen am 13.05.2013

⁷ http://www.elotouch.com/Technologies/compare_resist.asp, aufgerufen am 16.05.2013

trem dünne Isolationsschicht getrennt. Drückt der Nutzer nun auf den Bildschirm berühren sich die beiden leitenden Schichten. Über eine horizontal- und eine vertikal-verlaufende Spannungsmessung wird dann die genaue Position der Berührung ermittelt. Die Vorteile dieser Technik sind der geringe Stromverbrauch und die Möglichkeit sowohl Finger- als auch Stifteingaben zu erkennen. Aufgrund des technischen Aufbaus kann aber nur ein Eingabepunkt gleichzeitig erkannt werden. Die Bedienung mit mehreren Fingern ist nicht möglich. Zusammen mit der Beeinträchtigung der grafischen Darstellung aufgrund der zusätzlichen Schichten zwischen Projektionsfläche und Nutzer (Schöning u. a., 2008), führt das dazu, dass sich diese Technik nicht für den Bau eines gebogenen interaktiven Displays eignet.

Eine andere elektronische Tracking-Technik ist das kapazitive Tracking, das ebenfalls zusätzlichen Schichten oberhalb des eigentlichen Displays benötigt. Im Unterschied zum resistiven Tracking werden diese Schichten jedoch bei Berührung nicht miteinander verbunden, sondern sie dienen zur Messung der Veränderung elektrischer Felder. Berührt der Finger des Nutzers oder ein anderer leitender Gegenstand die Oberfläche, verändert sich das elektrische Feld an dieser Stelle. Mit Hilfe der Tracking-Schicht lokalisiert das System dann den Ort der Berührung.

Eine kapazitive Touch-Erkennung kann nicht nur mehrere Touch-Eingaben gleichzeitig erkennen, sondern lässt sich auch nahezu unsichtbar für den Nutzer realisieren (Rekimoto, 2002) und kann äußerst robust gebaut werden (Schöning u. a., 2008). Mittlerweile sind auch große flexible Folien kommerziell erhältlich, die mit der kapazitiven Technik Multitouch-Eingaben auf nahezu jeder Oberfläche ermöglichen⁸. Diese eignen sich somit auch für den Bau eines gebogenen Displays, waren zu Beginn dieser Arbeit jedoch noch nicht in den entsprechenden Größen verfügbar.

Ein weiteres nicht-optisches Verfahren, das zum Bau des Curve Prototyps in Betracht gezogen wurde, basiert auf akustischer Impulserkennung⁹. Hierbei wird eine Glasplatte oberhalb des Displays angebracht und mit Sensoren ausgestattet, die Schallwellen messen können. Berührt ein Gegenstand die Glasoberfläche, entstehen dabei Geräusche, die von den Sensoren wahrgenommen und an einen Controller weitergeleitet werden. Der Controller berechnet aus diesen Daten die Position der Berührung, wobei auch Dragging-Gesten erkannt werden. Theoretisch sind mit dieser Methode bis zu zwei Berührungspunkte erkennbar (Schöning u. a., 2008).

Zwar verspricht die akustische Impulserkennung eine Touch-Erkennung ohne Einbußen bei der Darstellung von Inhalten, sie bietet aber nur die Erkennung von maximal zwei Eingabepunkten. Außerdem führt eine entsprechend dicke Schicht oberhalb der Projektionsfläche zu einem Parallaxeneffekt bei der Darstellung, der die Treffgenauigkeit der Touch-Interaktion verringert (Pickering, 1986). Aufgrund der angesprochenen Probleme wurde diese Technik nicht beim Bau des Prototyps genutzt.

⁸ <http://www.displax.com/>, aufgerufen am 16.05.2013

⁹ <http://www.elotouch.com/Technologies/AcousticPulseRecognition/>

2.2 Planare Interaktive Displays

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit planaren interaktiven Displays und deren Bedeutung für diese Arbeit. Für die weitere Betrachtung dieser Display-Kategorie ist es dabei wichtig, sie von anderen Displayarten abzugrenzen. Planare interaktive Displays beschreiben im Verlauf dieser Arbeit flache, stationäre Bildschirme, die eine direkte Interaktion per Berührung durch den Nutzer erlauben. Dazu zählen sowohl horizontal als auch vertikal orientierte Systeme. Explizit ausgeschlossen aus der Betrachtung sind mobile interaktive Displays, wie sie Smartphones oder Tablets darstellen. Aufgrund ihrer Größe und Mobilität bieten sie ganz andere Möglichkeiten und stellen andere Anforderungen als stationäre Systeme (Nestler u. a., 2008). Davon abgesehen spielt die Form des Displays für die weitere Betrachtung keine Rolle. Es werden sowohl rechteckige als auch anders geformte stationäre interaktive Displays betrachtet.

2.2.1 Horizontale Displays

Horizontale interaktive Displays („Tabletops“) gibt es seit Jahren (Wellner, 1991) im Bereich der Forschung. Tabletops sind gewöhnliche Tische, die die horizontale Ablagefläche mit digitalen Inhalten erweitern und eine direkte Interaktion damit ermöglichen (siehe Abbildung 2.3). Diese Kombination führt dazu, dass Interaktionsmetaphern, wie die Desktop-Metapher, nicht ohne weiteres auf diese Systeme übertragen werden können (Wellner, 1993). Stattdessen müssen andere Metaphern und Interaktionsparadigmen gefunden und untersucht werden.

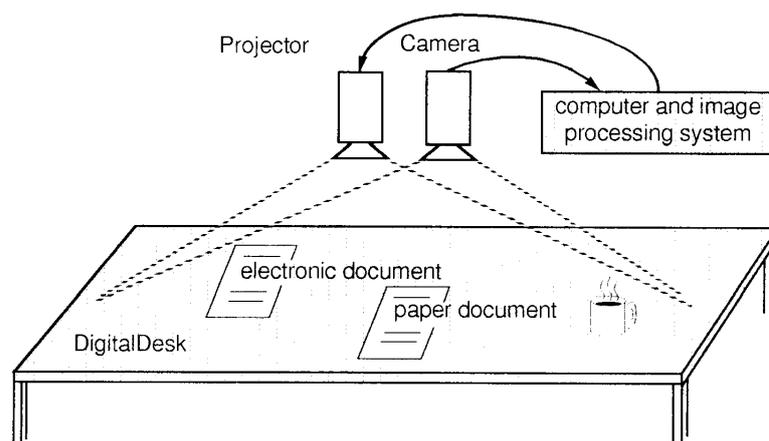


Abbildung 2.3: Grundprinzip des DigitalDesks von Wellner: Ein normaler Schreibtisch wird durch eine Top-Projektion und eine Kamera digital erweitert (Wellner, 1991).

Seit damals werden verschiedene Einsatzbereiche für Tabletops, wie zum Beispiel kollaborative Arbeit (Kruger u. a., 2004; Morris u. a., 2010), Interaktion mit physikalischen Objekten (Ishii u. Ullmer, 1997; Hancock u. a., 2009a) oder ihr Einsatz bei der täglichen Bildschirmarbeit (Benko u. a., 2009; Hardy, 2012), erforscht. Um eine fundierte Basis für die Überlegungen in dieser Arbeit zu schaffen, gibt dieses Kapitel zunächst einen Überblick über die Entwicklung von Tabletop-Systemen im Allgemeinen. Die verwandten Arbeiten zu den Auswirkungen dieser Displayform auf Interaktion und Wahrnehmung durch den Nutzer wird in den entsprechenden Kapiteln dieser Arbeit genauer beschrieben.

Das Grundprinzip eines Tabletops wurde bereits Anfang der 1990er Jahre von Piere Wellner beschrieben (Wellner, 1991, 1993). Sein DigitalDesk (siehe Abbildung 2.3) erlaubte nicht nur eine direkte Interaktion mit dem Tisch, sondern auch mit Papier auf dem Tisch. Dies wurde zur Umsetzung eines virtuellen Taschenrechners genutzt, der die Vorteile von physikalischem Papier und digitaler Darstellung kombiniert (Newman u. Wellner, 1992).

Der grundsätzliche Aufbau besteht aus einem gewöhnlichen Schreibtisch, den ein Projektor von oben um digitale Inhalte erweitert. Kameras erkennen zusätzlich die Position von Dokumenten und Gegenständen. Dieser Aufbau erlaubt unter Zuhilfenahme eines digitalen Eingabetablets die Interaktion mit digitalen Inhalten auf einer physikalischen Arbeitsfläche. Aufgrund der eingeschränkten technischen Möglichkeiten ist der DigitalDesk zwar nicht mehr mit heutigen Systemen vergleichbar, aber basierend auf dieser Idee wurden in der Folgezeit viele weitere Systeme vorgestellt. Er kann daher als wegweisend im Bereich der Tabletops bezeichnet werden.

Ein weiteres Projekt, das einen Tabletop eingesetzt hat, ist eine computergestützte Arbeitsumgebung, die die Arbeitsprozesse im Industrial Design unterstützt (Buxton, 1997). Der dort beschriebene Active Desk (Chattoe u. a., 1995) ermöglicht kollaboratives Arbeiten an Design-Entwürfen mit einem entfernten Arbeitskollegen. Allerdings unterstützt das System keine direkte Interaktion mit Fingern, sondern nur mit einem Stift.

Auf zusätzliche Eingabegeräte setzt auch der metaDESK (Ullmer u. Ishii, 1997). Er ermöglicht die Interaktion mit einer Vielzahl von Objekten (z.B. Gebäudemodellen) auf einer interaktiven Oberfläche. Das System, eine Form von Tangible User Interface (TUI) (Ishii u. Ullmer, 1997), basiert auf mehreren infrarotsensitiven Kameras unterhalb der Tischoberfläche mit denen die genutzten Objekte verfolgt werden. Dieses optische Tracking erlaubt prinzipiell die Nutzung beliebiger und beliebig vieler Objekte zur Interaktion mit dem System (Underkoffler u. Ishii, 1999). Auf diese Weise können auch Systeme wie der u-Table (Lee u. Kim, 2006) und der reacTable (Jordà u. a., 2005) nicht nur Objekte, sondern auch gleichzeitig die Interaktion per Berührung, erkennen. Der reacTable nutzt diese Kombination geschickt aus und erlaubt es mehreren Nutzern mit Hilfe von Objekten auf dem Tisch gemeinsam Musikstücke zu kreieren (Jordà u. a., 2007).

Zusammen mit der direkten Interaktion ermöglicht die Steuerung mit Hilfe von Objekten aber auch die Umsetzung weiterer Interaktionstechniken. So können dedizierte Werkzeuge für bestimmte Aufgaben realisiert werden, die die Bedienung vereinfachen und präziser machen (Fitzmaurice u. a., 1995). Ein gebogenes Display sollte also nach Möglichkeit auch die

Interaktion mit physikalischen Objekten ermöglichen. Auf die Details der Umsetzung eines TUIs am Curve wird im Kapitel 5 genauer eingegangen.

Im Gegensatz zu diesen Systemen nutzt i-Land (Streitz u. a., 1999) keine zusätzlichen Objekte, jedoch können in dieser Arbeitsumgebung bis zu sechs Gruppenmitglieder gleichzeitig arbeiten. Zusätzlich zu interaktiven Stühlen und einer interaktiven Wand wird im i-Land auch ein interaktiver Tisch eingesetzt: der InteracTable. Dieser unterstützt die Eingabe per Tastatur und Stift, aber auch direkt per Finger. Um den Ansprüchen eines Tabletops an ein User Interface gerecht zu werden, unterstützt das System speziell angepasste Gesten zum Rotieren und Mischen digitaler Objekte (Streitz u. a., 1999).

Auch wenn der interaktive Tisch im i-Land nur eines von mehreren Displays ist, zeigt dieses Projekt die Möglichkeiten derartiger interaktiver Bildschirme für die direkte Kollaboration mehrerer Nutzer. Außerdem zeigt die vorgestellte Kombination die Vorteile unterschiedlich orientierter Displays. Jedes der Displays ist jeweils für unterschiedliche Arbeitsschritte konzipiert und kann diese somit durch die Größe, Form und Ausrichtung optimal unterstützen.

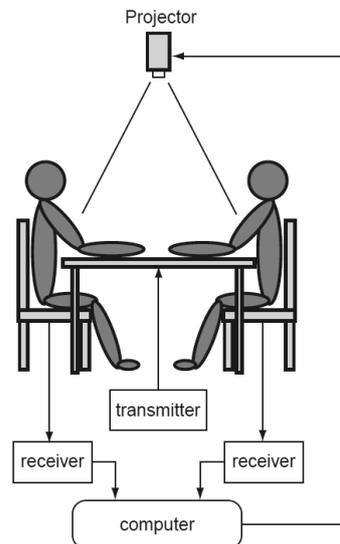


Abbildung 2.4: Der DiamondTouch kann anhand von Stromkreisen, die bei Berührung des Displays geschlossen werden, die Nutzer unterscheiden (Dietz u. Leigh, 2001).

Ebenfalls für Kollaboration am gleichen Ort gedacht ist der DiamondTouch (Dietz u. Leigh, 2001). Die Besonderheit dieses Systems im Vergleich zu den bisher vorgestellten besteht in der Fähigkeit die Berührungen des Displays dem jeweils interagierenden Nutzer zuzuordnen zu können. Das System nutzt dafür Stühle, die mit speziellen Empfängern ausgerüstet sind (siehe Abbildung 2.4). Berührt ein Nutzer nun den Bildschirm des DiamondTouch wird zwischen einem Sender im Display und dem Empfänger im Stuhl ein elektrischer Kreis geschlossen, mit dessen Hilfe das System die Interaktion eindeutig zuordnet.

Die Möglichkeit die Eingaben gezielt dem jeweiligen Nutzer zuzuordnen zu können bietet neue Interaktionsmöglichkeiten. So können Anmerkungen oder Markierungen direkt einzelnen Nutzern farblich zugeordnet werden, ohne dass die Nutzer dies explizit selbst vornehmen müssen. Allerdings ist der vorgestellte Prototyp dieses Systems relativ klein (20 cm * 20 cm). Es konnten zwar in einem ersten Test vier Personen problemlos gleichzeitig damit interagieren, aber selbst für einen einzelnen Nutzer sollte das System je nach Aufgabe deutlich vergrößert werden (Elliott u. Hearst, 2000).

Abgesehen von der technischen Weiterentwicklung von Tabletops wurde auch die Einbeziehung der Displayform in User Interfaces untersucht. The Pond (Ståhl u. a., 2002) bietet ein Interface auf Basis eines teichförmigen Tabletops zur kollaborativen Exploration von Musikdaten an. Die dazu genutzte Teich-Metapher findet sich dabei auch in der Gestaltung des Tisches wieder: auf dem Tabletop befindet sich ein Holzrahmen, der die Displayfläche zu einer natürlichen Teichfläche mit einem welligen Ufer formt. In diesen Rahmen sind außerdem mehrere Lautsprecher eingebaut, um auditives Feedback von unterschiedlichen Orten aus zu ermöglichen.

Die Form des Displays hilft in diesem Fall die angewandte Teich-Metapher zur Informationsvisualisierung einfacher verständlich zu machen (Ståhl u. a., 2002). The Pond ist somit ein gutes Beispiel für den gezielten Einsatz der Displayform zur Unterstützung von Interaktionen.



Abbildung 2.5: Setup des Lumisight Table für vier Benutzer, wobei jeder Nutzer durch die spezielle Projektionsfolie ein optimal ausgerichtetes Bild auf dem Tisch (Matsushita u. a., 2004).

Einen anderen Aspekt der Kollaboration untersucht der Lumisight Table: das Problem der Orientierung von Daten, die auf einem Tisch liegen (Matsushita u. a., 2004). Ausgangspunkt für den Lumisight Table war die Überlegung, dass Nutzer, die sich an unterschiedlichen Seiten eines Tisches befinden, zwangsläufig Orientierungsprobleme mit Dokumenten auf dem Tisch haben. Ist ein Dokument für einen Nutzer korrekt ausgerichtet, steht es für sein Gegenüber auf dem Kopf. Um dieses Problem zu lösen wird eine spezielle Folie im Tisch verbaut, die nur in einem Betrachtungswinkel von 25 bis 55 Grad diffus erscheint und somit nur in diesem Bereich für eine Projektion genutzt werden kann. Zwei Lagen dieser Folie - um 90 Grad zueinander gedreht - ermöglichen es zusammen mit vier Projektoren auf jeder Seite des Tisches einen anderen Inhalt darzustellen.

Während dies bei Textinhalten das Lesen auf allen Seiten des Tisches erleichtert, kommt es zu Problemen, wenn es um die genaue Position von Textteilen geht. Durch die individuelle Orientierung zu jedem Nutzer, stimmen die Positionen der einzelnen Buchstaben nicht überein (siehe Abbildung 2.5). Darüber hinaus ist der technische Aufbau des Tisches recht aufwendig und die Visualisierung funktioniert nur für fest definierte Positionen der Nutzer.

Neben diesen Tabletops, die sich eher an klassischen Tischen orientieren, wurden aber auch Systeme untersucht, die von dieser Idee weiter abweichen. Die Idee durch Flüssigkeitsverdrängung den Druck einer Benutzereingabe zu messen hat zu einem Tisch mit einer konvex geformten, weichen Oberfläche geführt (Hilliges u. a., 2008). Dabei ist eine Silikonfolie über eine transparente Platte gespannt und der Raum zwischen diesen beiden mit schwarzer Tinte gefüllt. Interagiert der Nutzer nun auf dem gespannten Silikon, erkennt eine unterhalb der Platte angebrachte Kamera diese Interaktion. Durch den Finger des Nutzers wird im Kamerabild nämlich statt der schwarzen Tinte das helle Silikon sichtbar. Je heller und größer diese Stellen sind, desto fester drückt der Nutzer auf die Oberfläche.

Statt Druck ausschließlich als zusätzliche Eingabedimension zu nutzen unterstützen die Madgets (Weiss u. a., 2010a) und FingerFlux (Weiss u. a., 2011) zusätzlich die Animation von physikalischen Objekten und die Ausgabe von haptischem Feedback oberhalb der Tischoberfläche. Die Madgets werden durch Magnetfelder, die durch eine Matrix aus Magnetspulen unterhalb der Tischoberfläche erzeugt werden, bewegt und beispielsweise in einem festgelegten Winkel ausgerichtet (Weiss u. a., 2010a).

Der Tisch ermöglicht außerdem das Vermitteln haptischen Feedbacks oberhalb der Tischoberfläche. Dazu wird die Spitze des interagierenden Fingers mit einem kleinen Dauermagnet ausgerüstet. Dieser wird dann durch die Tischmagnete beeinflusst - der Nutzer kann Elemente auf dem Tisch bereits vor der eigentlichen Berührung spüren (Weiss u. a., 2011). Zwar ist der Aufbau eines solchen Tisches relativ komplex, er erlaubt aber zwei neue Formen der Interaktion. Zum einen können TUIs nicht mehr nur zur Eingabe durch den Nutzer, sondern auch zur Ausgabe durch das interaktive System genutzt werden. Zum anderen kann die zusätzliche Feedbackdimension oberhalb der Oberfläche für frühzeitiges Feedback vor der eigentlichen Interaktion verwendet werden.

Neben diesen Forschungsprojekten gibt es mittlerweile aber auch kommerzielle Tabletop-Systeme. Die prominentesten Beispiele sind hierbei der Microsoft Surface 1.0 und dessen Nachfolger Samsung SUR40 mit Microsoft PixelSense¹⁰. Obwohl beide Tische vor allem in der Forschung zum Einsatz kommen, erscheinen auch immer mehr Anwendungen, die speziell zu Marketingzwecken entwickelt werden. Der BMW Product Navigator¹¹ oder der Einsatz interaktiver Tische in der i-Bar im Rio Casino, Las Vegas¹² sind dabei nur einige Beispiele. Neben solchen rein repräsentativen Anwendungen sollen interaktive Tische aber auch im Kundengespräch zwischen einem Bankberater und einem Kunde eingesetzt werden (siehe Abbildung 2.6).

¹⁰<http://www.samsunglfd.com/product/feature.do?modelCd=SUR40>, zuletzt abgerufen am 28.03.2013

¹¹<http://www.bmw.tv/web/us/video.do?videoID=661>, zuletzt abgerufen am 28.03.2013

¹²<http://www.riolasvegas.com/things-to-do/ibar-ultra-lounge.html>, zuletzt abgerufen am 28.03.2013



Abbildung 2.6: Der Prototyp einer Beratungsanwendung für Bankgespräche zwischen Finanzberater und Kunden auf einem interaktiven Tisch während der CeBit 2010.

2.2.2 Vertikale Displays

Neben den bisher vorgestellten horizontalen interaktiven Displays gibt es auch vertikale interaktive Displays, die häufig als Wanddisplays oder interaktive Wände bezeichnet werden. Neben ihrer Form und Größe kann man solche Wanddisplays, im Gegensatz zu Tabletops, auch noch anhand ihrer Entfernung zum Nutzer und der Erreichbarkeit durch den Nutzer unterscheiden. Denn im Vergleich zu Tabletops sind auf vertikalen Displays Inhalte auch aus einiger Entfernung noch gut erkennbar. Nutzer können mit Bewegungen (Krueger, 1977), Gesten (Vogel u. Balakrishnan, 2005) oder zusätzlichen Geräten (Boring u. a., 2010) mit ihnen interagieren. Da der vertikale Displaybereich des Curve für den Nutzer jedoch per Definition vollständig erreichbar sein soll, werden solche entfernten vertikalen Displays in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Eines der ersten vertikalen interaktiven Displays wurde 1987 im Rahmen des Colab Projekts beschrieben (Stefik u. a., 1987). Im Colab dient der Boardnoter (siehe Abbildung 2.7) als gemeinsame Arbeitsfläche für eine Gruppe von bis zu sechs Personen. Das System bedient sich dabei der Tafelmetapher. Es gibt grafische Werkzeuge zum Zeichnen und Löschen von Inhalten und eine separate Tastatur für die Texteingabe.

Das gemeinsame Nutzen einer digitalen, interaktiven Arbeitsfläche steht auch beim LiveBoard (Elrod u. a., 1992) im Mittelpunkt. Hierbei dient ein VideoWhiteboard (Tang u. Minneman, 1991) dazu, die Gruppenarbeit sowohl vor Ort als auch an entfernten Standorten zu unterstützen. Das auf Rückprojektion basierende System erlaubt die Eingabe per Stift, zwingt die Nutzer aber aufgrund der niedrigen Display-Auflösung zu Kompromissen zwischen natürlicher Schrift und Lesbarkeit. In einer ersten Studie stellte sich heraus, dass die Nutzer die Möglichkeiten eines interaktiven Whiteboards zum kollaborativen Zeichnen annehmen und auf natürliche Weise damit interagieren (Tang u. Minneman, 1991).

Auch beim ClearBoard (Ishii u. Kobayashi, 1992) geht es um die Zusammenarbeit an entfernten Orten. Im Gegensatz zum VideoWhiteboard kommen hier aber keine digitalen Ein-

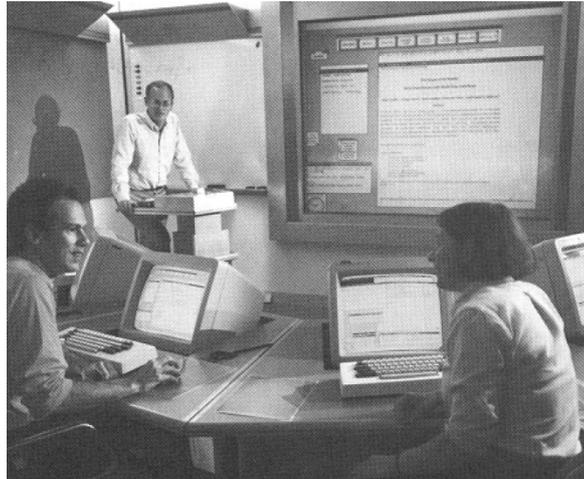


Abbildung 2.7: Der Boardnoter im Colab dient als digitale Tafel und ermöglicht die Kollaboration von bis zu sechs Nutzern (Stefik u. a., 1987).

gabegeräte und Menüs zum Einsatz, sondern einfache Whiteboard-Marker. Während eine Kamera den Inhalt des Whiteboards zusammen mit einer Frontansicht des Nutzers am ersten Ort filmt, stellt ein Projektor am zweiten Ort diese Inhalte mithilfe eines Halbspiegels dar (siehe Abbildung 2.8 oben). Mit einer gleichzeitigen Übertragung in beide Richtungen können auf diese Weise zwei Personen gemeinsam auf einer teilweise virtuellen Fläche gemeinsam zeichnen.

Das Clearboard ermöglicht dabei drei verschiedene Darstellungsmetaphern (Ishii u. Kobayashi, 1992), wie eine solche halb-transparente Arbeitsfläche verstanden und genutzt werden kann: gemeinsam vor einem Whiteboard, gegenüber an einem Tisch und durch eine Glasscheibe (siehe Abbildung 2.8 unten). Jede dieser Metaphern führt zu einer anderen Sichtweise der jeweiligen Nutzer auf den gemeinsamen Arbeitsbereich und bietet dadurch unterschiedliche Möglichkeiten für die Kollaboration.

Eine Weiterentwicklung im Vergleich zu diesen Systemen stellt die HoloWall (Matsushita u. Rekimoto, 1997) vor allem auf technischer Ebene dar. Diese interaktive Wand ist zur Interaktion weder auf spezielle, digitale Eingabegeräte angewiesen, noch wird eine einfache Videoübertragung realer Inhalte genutzt. Durch ein einfaches DI-Setup (siehe Kapitel zum optischen Tracking) kann der Nutzer mit Fingern, Händen, dem ganzen Körper oder auch physikalischen Objekten mit dem Display interagieren.

Die HoloWall zeigt durch die Verwendung von DI als eines der ersten Systeme die Möglichkeiten der natürlichen Interaktion mit einem Display auf. Auch wenn die ersten beschriebenen Anwendungen (Matsushita u. Rekimoto, 1997) noch nicht sehr detailliert sind, zeigen sie, dass ein interaktives vertikales Display im Allgemeinen für eine Vielzahl von Anwendungen geeignet ist.

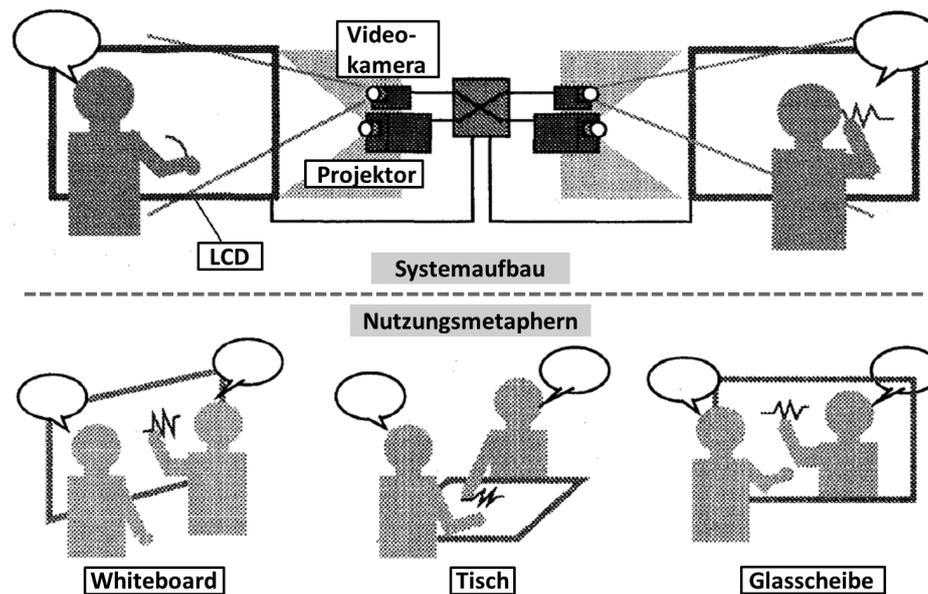


Abbildung 2.8: Das Clearboard besteht aus zwei Displays an entfernten Orten, die über ein Kamerasystem miteinander verbunden sind (obere Bildhälfte). Dieser Aufbau ermöglicht drei verschiedene Nutzungsmetaphern, die zu unterschiedlichen Darstellungen des Inhalts führen (untere Bildhälfte) (Ishii u. Ullmer, 1997).

Seit 1998 gibt es mit der DynaWall (Geißler, 1998) auch ein Wanddisplay, das kommerziell erhältlich ist. Ähnlich wie die interaktiven Whiteboards von Smarttech¹³ finden diese ihren Einsatz häufig bei gemeinsamer Gruppenarbeit. Einzelarbeitsplätze sind jedoch bis jetzt nicht mit interaktiven vertikalen Displays, die den Schreibtisch erweitern, ausgerüstet.

2.3 Non-planare Interaktive Displays

Neben den bisher vorgestellten vollständig planaren interaktiven Displays wurden in den letzten Jahren auch vermehrt non-planare interaktive Displays erforscht. Bereits zuvor wurden sogenannte multi-planare Displays (Sukthankar, 2005) gebaut, die aus mehreren planaren Displays bestehen und durch die direkte Kombination dieser Einzeldisplays ein größere non-planare Displayumgebung erschaffen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden daher außer gebogenen Displays (Wimmer u. a., 2009; Weiss u. a., 2009a; Roudaut u. a., 2011) auch direkte, winklige Kombinationen von zwei planaren Displays betrachtet. Denn solche multi-planaren Systeme können als evolutionärer Schritt von konventionellen Bildschirmen hin zu non-planaren Displays, die unterschiedliche Displayorientierungen kombinieren, verstanden werden. Im Gegensatz zu non-planaren

¹³<http://www.smarttech.com/de>, zuletzt aufgerufen am 23.04.2013

Systemen bieten sie eine technisch einfache Möglichkeit unterschiedlich orientierte Displaybereiche zu kombinieren. So lassen sich neuartige Displaykonzepte erproben, ohne die teils komplexen technischen Probleme einer non-planaren Displayform lösen zu müssen.

Auf den vorgestellten multi-planaren Systemen werden anschließend non-planare Displays vorgestellt. Dabei werden auch non-planare Displays betrachtet, die weitere Eigenschaften (z.B. Verformbarkeit der Displayoberfläche) bieten und in das Interaktionskonzept miteinbeziehen (Nakajima u. a., 2010). Die durch die Verformbarkeit entstehenden Interaktionsmöglichkeiten spielen bei dieser Betrachtung allerdings nur eine untergeordnete Rolle, da der Curve nicht zur Laufzeit verformbar sein soll. Daher sind die damit verbundenen Interaktionsmöglichkeiten im Rahmen dieser Arbeit nicht relevant.

2.3.1 Multi-planare Displays

Einer der ersten Ansätze eines multi-planaren interaktiven Displays ist der InteractiveDESK (Arai u. a., 1995). Dieser Prototyp (siehe Abbildung 2.9) kombinierte die Grundidee des DigitalDesk von Wellner (Wellner, 1991) mit einem vertikal angebrachten Display. Zusätzlich zur Eingabe von Daten mit einer Tastatur ermöglicht die horizontale Arbeitsfläche außerdem auch die Eingabe mit einem Stift. Das System schaltet automatisch aufgrund der Position der Tastatur zwischen diesen beiden Eingabearten um: Befindet sich die Tastatur auf dem Tisch, wird sie für die Eingabe genutzt. Ohne die Tastatur wird die stift-sensitive Fläche als Eingabemedium genutzt. Dieser Wechsel des Eingabemediums hat auch Auswirkungen auf die Platzierung von digitalen Dokumenten. Bei der Tastatureingabe werden die Dokumente auf dem vertikalen Display angezeigt, bei der Stift-Eingabe auf dem horizontalen Tischdisplay. Zwar beschränkt sich die Interaktion mit dem InteractiveDESK auf Tastatur und Stifteingaben, doch die grundlegenden Ideen eines interaktiven Schreibtischs mit vertikaler Fläche sind bereits erkennbar. Darüber hinaus zeigt die Ausrichtung von Informationen je nach Position der Tastatur bereits einen möglichen Ansatz für die Integration unterschiedlicher Eingabemethoden. Der Wechsel der Anzeige um die bestmöglichen Eingabebedingungen zu schaffen zeigt ebenfalls eine Möglichkeit für die Optimierung einer Benutzerschnittstelle am Curve auf.

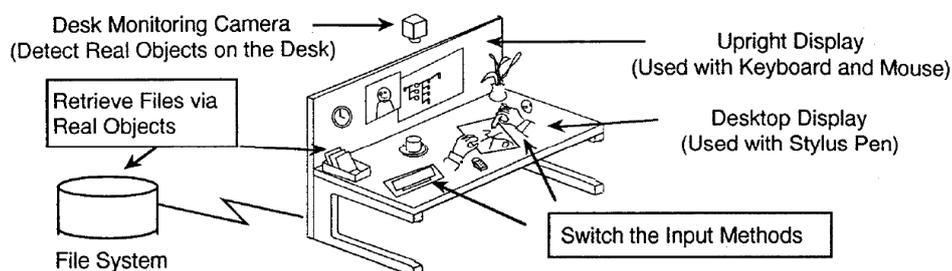


Abbildung 2.9: Der InteractiveDESK kombiniert zwei planare Displays zu einem digitalen Schreibtischarbeitsplatz und stellt somit ein multi-planares Display dar (Arai u. a., 1995).

Ein ähnliches System ist der Sensetable (Patten u. a., 2001), der ebenfalls eine interaktive horizontale Fläche mit einer vertikalen Anzeigefläche verbindet (siehe Abbildung 2.10 links). Das System konzentriert sich dabei vor allem auf die Interaktion mit Objekten auf der horizontalen Fläche, die mit einem Projektor von oben um digitale Informationen erweitert werden. Zusätzlich werden Kontextinformationen zu den Objekten und dem aktuellen Nutzungsszenario auf einem vertikalen Display dargestellt. Im Gegensatz zu den mittlerweile weit verbreiteten optischen Trackingverfahren von Objekten (Kaltenbrunner u. Bencina, 2007; Weiss u. a., 2008; Baudisch u. a., 2010; Hennecke u. a., 2011) basiert diese Lösung jedoch auf einem Tracking, das die Veränderung elektrischer Felder nutzt. Um die Beschränkungen auf zwei Objekte der damals genutzten Wacom Intuos Tablets¹⁴ zu umgehen, wird die Tracking-Elektronik der Objekte in zufälliger Reihenfolge ab- und wieder angeschaltet. So wird auf Kosten der Trackinggeschwindigkeit sichergestellt, dass jedes Objekt in einem bestimmten Zeitintervall auf jeden Fall erkannt wird.

Auch wenn der vertikale Displaybereich nicht berührungssensitiv ist, erlaubt der Sensetable eine Interaktion mit Inhalten, die sich dort befinden. Über grafisch dargestellte Bereiche auf der horizontalen Fläche können Informationen zwischen den beiden Displaybereichen transferiert werden.

Beim PhotoBoard (siehe Abbildung 2.10 rechts) kann der Nutzer Bilder zum angenehmeren Betrachten von einem horizontalen auf einen vertikalen Displaybereich bewegen. Da diese Position für die direkte Bearbeitung der Bilder jedoch nicht sinnvoll ist, können sie zurück auf die horizontale Displayfläche gezogen und dort bearbeitet werden. Obwohl sich das eigentliche Projekt mit der Projektion von Inhalten auf beliebige Oberflächen beschäftigte, so wurde der Begriff der multi-planaren Displays im Rahmen des PhotoBoard Projekts eingeführt (Sukthankar, 2005). Außerdem werden wichtige Grundprinzipien eines gebogenen interaktiven Schreibtischs integriert. Die direkte Interaktion findet hauptsächlich auf dem horizontalen Bereich statt und das lange Betrachten von digitalen Inhalten auf dem vertikalen Bereich.

Während die bisherigen Prototypen meist gleichgroße Displayteile miteinander kombinierten ist der vertikale, nicht-interaktive Displaybereich beim Microsoft DigiDesk (Microsoft, 2008) deutlich kleiner als die horizontale Displayfläche. Da die Vertikale bei diesem System vor allem zur Anzeige von Zusatzinformationen dient, ist die geringe Größe jedoch unproblematisch. Auch in diesem Projekt zeigen sich Effekte der Kombination unterschiedlich orientierter Displaybereiche und der Displaymaße. Der vertikale Bereich wird ausschließlich zum Betrachten von Informationen genutzt, da er für eine direkte Interaktion zu weit vom Nutzer entfernt ist. Das Konzept des DigiDesk wurde von Microsoft jedoch nicht weiterverfolgt - außer eines technischen Berichts (Microsoft, 2008) wurden keine weiteren Forschungsergebnisse publiziert.

¹⁴<http://www.wacom.eu>, zuletzt abgerufen am 25.04.2013

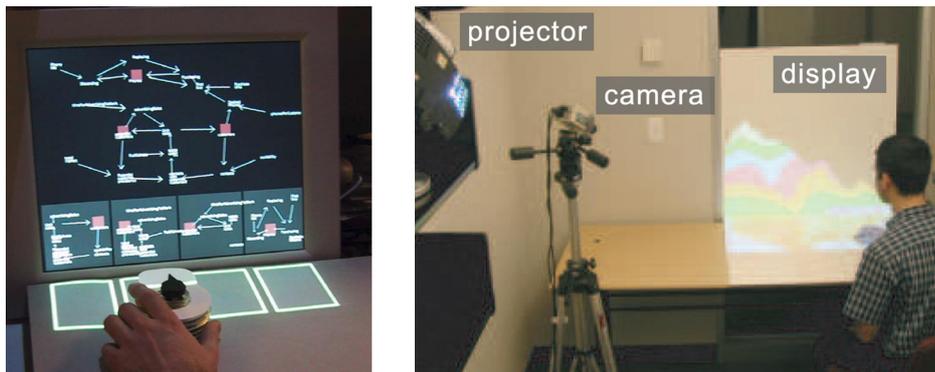


Abbildung 2.10: Der Sensetable (links) ermöglicht die Interaktion mit Objekten auf einer horizontalen Fläche, um Inhalte auf der vertikalen Fläche zu manipulieren (Patten u. a., 2001). Das Photoboard (rechts) ist hingegen nicht auf vordefinierte Oberflächen angewiesen und kann auf beliebige multi-planare Flächen projiziert werden (Sukthankar, 2005).

2.3.2 Gebogene Displays

Einen Schritt weiter als diese multi-planaren Displays gehen gebogene interaktive Displays. Eine erste Vision, wie so ein System im täglichen Arbeitsablauf genutzt werden kann, wurde Anfang der 1990er Jahren vorgestellt (Tognazzini, 1994) (siehe Abbildung 2.11). Beim Starfire-Videoprototyp wird die Vision eines Arbeitsplatzes gezeigt. Der Schreibtisch verfügt über einen horizontalen und einen vertikalen interaktiven Displaybereich. Beide Bereiche sind dabei nahtlos miteinander verbunden. Somit unterstützt das System einen einfachen Transfer von Dokumenten zwischen den Displaybereichen.

Der Video-Prototyp ist darüber hinaus um eine zusätzliche Achse gebogen und wölbt sich konkav leicht um den Nutzer herum. Es wird zwar nicht explizit darauf eingegangen, aber es liegt nahe, dass so die Erreichbarkeit aller Displaybereiche verbessert wird.

Obwohl es sich nur um einen Videoprototyp handelt, zeigt diese Vision bereits viele der Möglichkeiten auf, die eine gebogene Displayumgebung am Arbeitsplatz bietet. Beispiele dafür sind das direkte Bearbeiten von Dokumenten auf dem horizontalen Bereich und das Betrachten von Inhalten auf dem vertikalen Bereich.

Ein erster Prototyp eines gebogenen Displays, der technisch tatsächlich umgesetzt wurde, ist DSharp (Czerwinski u. a., 2003). Das DSharp-Display ist leicht um die vertikale Achse gebogen und bietet dem Nutzer insgesamt einen 46,5" großen, vertikal orientierten Displaybereich. Zwei Studien zeigten, dass die Displayform einen positiven Effekt auf die Nutzerinteraktion und -wahrnehmung hat. Die direkte Interaktion mit dem Display wurde hier jedoch nicht untersucht.

Darüber hinaus haben die Autoren einige grundlegende Interfaceprobleme identifiziert, die im Zusammenhang mit der Displaygröße stehen. Sie beschreiben das Problem, dass Meldungen, die auf dem Display außerhalb des Wahrnehmungsbereichs des Nutzers erscheinen, sehr leicht übersehen werden. Aufgrund der Displaygröße kann die indirekte Eingabe per Maus



Abbildung 2.11: Im Starfire-Videoprototyp wurde erstmals ein gebogenes interaktives Display gezeigt dessen unterschiedliche Bereiche für unterschiedliche Aufgaben genutzt werden (Tognazzini, 1994).

außerdem auch sehr weite Bewegungen im Vergleich zu konventionellen Bildschirmen erfordern. Während die direkte Interaktion das letzte Problem teilweise löst, ist das Problem des eingeschränkten Wahrnehmungsbereichs des Nutzers bei der Interfacegestaltung jedoch ein Problem, das im weiteren Verlauf dieser Arbeit berücksichtigt werden muss.

Neben diesen konkav zum Nutzer gebogenen Displays existieren auch konvex gekrümmte interaktive Displays. Beispiele für ein solches Display sind eine interaktive Löffelsäule (Beyer u. a., 2009) und die i-m-Tube (Lin u. a., 2009). Im Gegensatz zu herkömmlichen planaren, rechteckigen Displays führt ein solch rundes Display dazu, dass die Nutzer dazu ermutigt werden alle Seiten des Displays zu erforschen und den durch die Bauform verdeckten Inhalt zu erkunden (Beyer u. a., 2011). Es ermöglicht außerdem die Interaktion von allen Seiten und für mehrere Nutzer zur gleichen Zeit (Lin u. a., 2009). Dabei ist es entscheidend dem potenziellen Nutzer die Interaktivität des Displays klarzumachen. Eine Möglichkeit hierfür sind Animationen auf dem Display, die zur Interaktion motivieren (Beyer u. Butz, 2013).

Die Projekte zeigen, dass es für die Interfacegestaltung an einem gebogenen Display wichtig ist den Interaktionskontext (z.B. von welcher Richtung sich der Nutzer dem Display nähert) zu kennen und zu berücksichtigen. Die Tatsache, dass Nutzer Displayinhalte, die aufgrund der Displayform nicht sichtbar sind, erforschen und sich um das Display bewegen zeigt außerdem, dass die Nutzer bei der Gestaltung grafischer Benutzerschnittstellen nicht vernachlässigt werden dürfen. Nur so kann ausgeschlossen werden, dass die Displayform zu unerwünschten Nebeneffekten führt, die das spätere Interfacedesign erschweren.

Eine ähnliche Studie wurde mit einem kugelförmigen interaktiven Display durchgeführt (Benko u. a., 2008). Der Sphere-Prototyp hat nicht nur die technische Realisierbarkeit eines solchen Displays mittels Rückprojektion gezeigt, sondern wurde auch zur Untersuchung des Einflusses der Displayform auf die Interaktion genutzt. Die vorgeschlagenen Visuali-



Abbildung 2.12: Konvex-gebogene Displays wie eine Litfaßsäule (links) (Beyer u. a., 2011) oder die MS Sphere (rechts) (Benko u. a., 2008) bringen Nutzer dazu von allen Seiten mit dem Display zu interagieren.

sierungen auf der Sphere nutzen die Displayform gezielt aus um die darzustellenden Daten möglichst realitätsnah zu visualisieren. Ein Beispiel hierfür ist ein interaktiver Globus, auf dem nicht nur Landkarten sondern weiterführende Informationen zu Ländern visualisiert werden, mit denen der Nutzer interagieren kann.

Während bei einem planaren Display die Positionierung des Nutzers vor dem Display gut vorhersagbar ist (Beyer u. a., 2011), führt ein rundes Display dazu, dass nicht von vornherein klar ist, wo sich ein Nutzer positionieren wird. Eine entsprechende Studie mit der Sphere hat gezeigt, dass ein rundes Display bei gleicher Erreichbarkeit aller Seiten relativ gleichmäßig von allen Seiten genutzt wird. Während der Studie traten keine Anhäufungen von Interaktionspunkten an einer bestimmten Stelle auf. Dies zeigt, dass das grafische Interface entsprechend flexibel und seine Bedienung von allen zugänglichen Seiten möglich sein muss.

Neben diesen diversen non-planaren interaktiven Displays gibt es auch Displays, die dem in dieser Arbeit betrachteten Curve sehr ähnlich sind (siehe Abbildung 2.13). Zeitgleich zum Curve wurde der BendDesk vorgestellt (Weiss u. a., 2009a). Genau wie der Curve verbindet der BendDesk einen horizontalen und einen vertikalen interaktiven Displaybereich mit einer Kurve. Diese dient auch beim BendDesk sowohl zur direkten Eingabe als auch zur Darstellung von digitalen Inhalten. Das grundlegende technische Prinzip ähnelt dem des Curve, welches in Kapitel 3 beschrieben wird. Im direkten Vergleich mit dem Curve fällt jedoch auf, dass der vertikale Displaybereich des BendDesks um 90° statt um lediglich 75° geneigt ist. Außerdem ist die Displayauflösung aufgrund der genutzten Kurzwurf-Projektoren relativ niedrig.

Die Autoren schlagen vor die Kurve als eine Art Zwischenablage in unterschiedlichen Anwendungen zu nutzen (Weiss u. a., 2009a). Da sie mit beiden Displaybereichen verbunden und für den Nutzer leicht zu erreichen ist, kann der Nutzer die abgelegten Inhalte von dort sehr leicht auf den gewünschten Displaybereich ziehen. Sie beschreiben die Kurve also als

physikalisch verbindendes Element in der Displaymitte, das im Interface jedoch als Trennung der beiden Displaybereiche zum Einsatz kommt.

Während beim Curve und BendDesk die gebogene Displayform im Fokus der Entwicklung steht, ist sie beim MirageTable (Benko u. a., 2012) Mittel zum Zweck. Mit Hilfe stereoskopischer Projektion wird die dreidimensionale Darstellung einer entfernt sitzenden Person auf einer gebogenen Oberfläche dargestellt (siehe Abbildung 2.13). Die entsprechenden dreidimensionalen Daten werden über die Tiefenkamera der Microsoft Kinect¹⁵ gewonnen und mit deren herkömmlichen Kamerabildern kombiniert. Dadurch ist es möglich dreidimensionale Objekte auf der gebogenen Displayfläche darzustellen und mit ihnen zu interagieren. Die Entwickler haben im Rahmen des Projekts die Faktoren des gebogenen Displays nicht speziell optimiert. Sie nutzen die durchgehende Projektionsfläche lediglich zur Umsetzung der dreidimensionalen Darstellung und des nahtlosen Übergangs zwischen den Darstellungsbereichen.

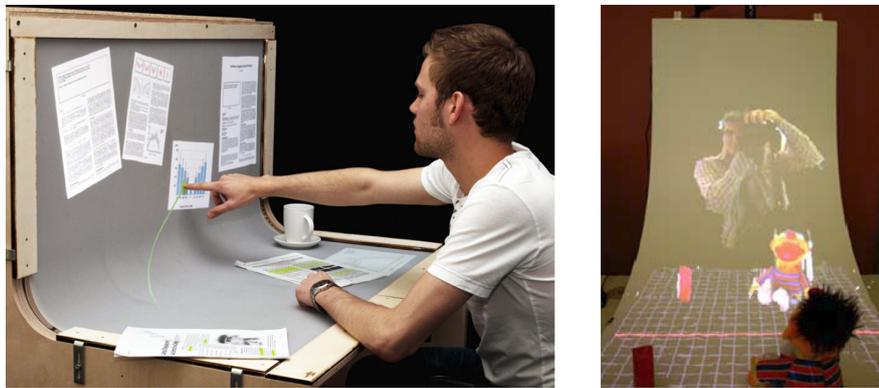


Abbildung 2.13: Während die Displayform beim BendDesk (Weiss u. a., 2010a) im Fokus steht (links), ist sie beim MirageTable (Benko u. a., 2012) eher Mittel zum Zweck und wurde nicht optimiert (rechts).

Dennoch zeigt dieses Projekt deutlich das Potenzial gebogener Displayoberflächen für bestimmte Arten der Visualisierung. Die direkte Verbindung von horizontalem und vertikalem Displaybereich bietet einen größeren Darstellungsraum als konventionelle Displays. Der MirageTable zeigt jedoch auch, dass für derartige Visualisierungen keine exakte Displaykonstruktion nötig ist. Zwar kann eine exakte Displaykonfiguration die Darstellung sicherlich verbessern, doch zeigt der MirageTable, dass bereits mit relativ einfachen Mitteln ein gebogenes, interaktives Display realisiert werden kann.

¹⁵ <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>, zuletzt aufgerufen am 26.04.2013

Kapitel 3

Der Curve

*Ich hoffe, dass die deutsche Mannschaft
auch in der zweiten Halbzeit
eine runde Leistung zeigt.
Das würde die Leistung abrunden.*

– Günter Netzer, Kommentator –

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Entwicklung und dem Bau des Curve (Schulz, 2010)¹. Dazu wird zuerst das Prototyping während der Entwicklung (Wimmer u. a., 2009) und die dazugehörige Studie (Wimmer u. a., 2010) vorgestellt. Anschließend wird die Konstruktion des Curve und die Anforderungen an dessen Software näher beschrieben (Wimmer u. a., 2010). Damit vermittelt dieses Kapitel ein Grundverständnis über den technischen Aufbau und die implementierte Software des Curve.

Kapitelfrage

Kann ein interaktives Display nach ergonomischen Gesichtspunkten entworfen und gebaut werden?

¹ Der Inhalt dieses Kapitels basiert auf publizierten Arbeiten (Wimmer u. a., 2009, 2010). Die Autoren der Arbeiten sind Raphael Wimmer, Fabian Hennecke, Florian Schulz, Sebastian Boring, Andreas Butz und Heinrich Hußmann. Das Prototyping und die Konstruktion des Curve wurden von Florian Schulz im Rahmen seiner Diplomarbeit unter der Leitung von Raphael Wimmer umgesetzt.

3.1 Entwicklung

Einer der Grundgedanken bei der Entwicklung des Curve ist die Optimierung der Displayform und der Benutzerschnittstelle, um dem Anspruch an einen ergonomischen, interaktiven Schreibtisch gerecht zu werden. Daher stand der Nutzer von Beginn an im Fokus und wurde in die Entwicklung mit einbezogen. Neben ergonomischen Durchschnittswerten, wie der Körpergröße oder der Sitzhöhe eines Nutzers, wurden zur Bestimmung der optimalen Displayform zwei Arten von Feedback genutzt:

Experten-Feedback: Die grundsätzliche Frage nach der Displayform und den ungefähren Dimensionen wurde mit Kognitionspsychologen diskutiert. Dabei standen sowohl die Höhe und die Breite als auch die ungefähre Displayform zur Debatte. Auf diese Weise wurden die Parameter der finalen Displayform bereits zu Beginn der Entwicklung stark eingegrenzt. Die Experten identifizierte die Faktoren *Höhe*, *Neigung* und *Kurvenradius* als potenzielle Variablen für eine Nutzerstudie.

Nutzerstudie: Aufbauend auf dem Experten-Feedback wurden die drei Display-Parameter (Höhe, Neigung, Kurvenradius) in einer Nutzerstudie mit Hilfe eines Papierprototyps untersucht. Der konfigurierbare Prototyp simulierte dabei die Form des späteren Displays. Zwar ist die Papieroberfläche bei einem solchen Prototyp freischwebend, eine erste vergleichende Studie konnte jedoch keinen Unterschied im Vergleich zu festen Oberflächenmaterialien identifizieren (Ragutt, 2010; Lins, 2010; Kunz, 2010).

Die nächsten Abschnitte orientieren sich am chronologischen Ablauf der Entwicklung: zuerst werden die genutzten ergonomischen Grundsätze und die Ergebnisse des Experten-Feedbacks vorgestellt. Anschließend wird die, auf dem konfigurierbaren Papierprototyp basierende, Studie zu den verbleibenden Displayparametern und deren Ergebnisse präsentiert. Basierend auf diesen Vorüberlegungen wird dann die eigentliche Konstruktion und die Kalibrierung des Curve beschrieben.

3.1.1 Prototyping

Während die ungefähre Form des Curve bereits zu Beginn der Arbeit feststand, mussten die Details der Umsetzung noch untersucht und festgelegt werden. Die ungefähren Maße des Curve sind dabei bereits durch die Grundidee eines interaktiven Schreibtischs festgelegt. Doch innerhalb dieser Grenzen gibt es diverse Möglichkeiten die Form zu verändern und ergonomisch zu gestalten. Im ersten Schritt dienten ergonomische Durchschnittswerte eines potenziellen deutschen Nutzers (Lange u. Windel, 2008) dazu die Displayform einzugrenzen. Erst danach wurde diese ungefähre Form durch eine Nutzerstudie weiter verfeinert.

Ergonomische Vorgaben

Wie Abbildung 3.1 zeigt, variiert die optimale Größe der Arbeitsfläche bereits entscheidend je nachdem ob man eine ein- oder eine zwei-händige Benutzung zugrunde legt (Lange u.

Windel, 2008). Es spielt auch eine Rolle, ob der Nutzer nur seine Arme bewegt oder ob er auch den Oberkörper für die Bewegung nutzt. Die optimale Größe für eine Arbeitsfläche, die alle der dargestellten Arbeitsbereiche abdeckt, liegt für normale Schreibtischarbeit bei etwa $120 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ (Lange u. Windel, 2008). Bei dieser Größe sind nur die Eck- und Randbereiche schwerer erreichbar.

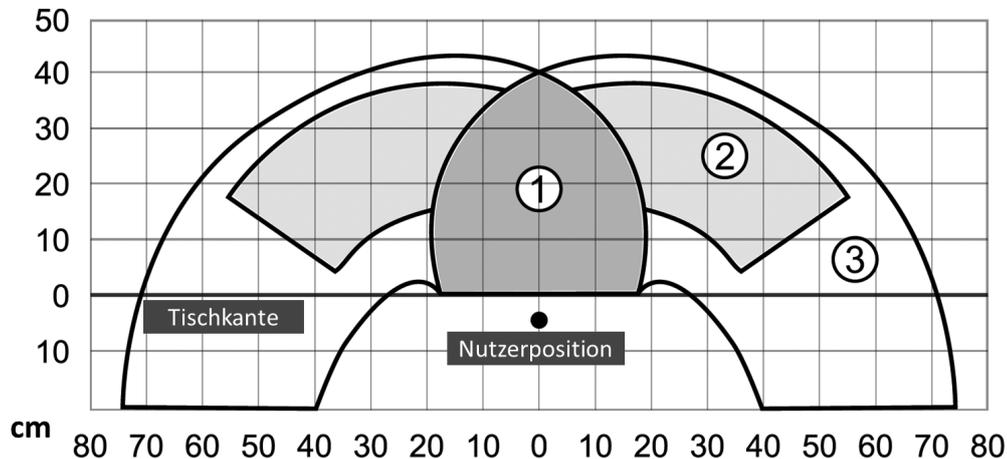


Abbildung 3.1: Aufteilung eines Schreibtischplatzes in Abhängigkeit der Greifräume eines Nutzers (Lange u. Windel, 2008): (1) Zweihandzone, (2) Einhandzone, (3) Erweiterte Einhandzone (nach Schulz, 2010).

Bei der minimalen Tiefe des Arbeitsplatzes spielt neben der Erreichbarkeit auch der Abstand zwischen dem Auge des Nutzers und dem Display eine Rolle. Dieser Abstand beträgt bei einem 15 Zoll LC-Display im Optimalfall mindestens 50 cm^2 und steigt mit zunehmender Bildschirmgröße. Der größere Abstand bei größeren Bildschirmdiagonalen hilft dabei häufige Kopfbewegungen des Nutzers vor großen Bildschirmen zu vermeiden.

Die Displaytiefe des Curve muss also einen Kompromiss zwischen diesen beiden ergonomischen Vorgaben bilden. Im weiteren Verlauf der Entwicklung wurde die Displaytiefe daher von der vorderen Kante der horizontalen Displayfläche bis zur vertikalen Fläche zwischen 40 cm und 50 cm variiert.

Ein weiterer Einflussfaktor im Bezug auf die Displayform ist die natürliche Haltung des menschlichen Genicks. Diese liegt üblicherweise zwischen 12° und 25° nach unten (Lange u. Windel, 2008), weswegen normale Bildschirme an einem Arbeitsplatz leicht nach hinten geneigt werden sollen. Entgegen erster Designentwürfe (siehe Abbildung 3.2) hat das spätere Design des Curve daher eine leicht nach hinten geneigte vertikale Displayfläche. Dies trägt dabei nicht nur zur Unterstützung der natürlichen Genickhaltung bei, sondern erlaubt auch den Abstand zwischen Auge und vertikalem Displayteil etwas zu erhöhen. Die wiederum kommt der Forderung des BGI 650³, eines Leitfadens für die Gestaltung von Büroarbeitsplätzen, entgegen.

² BGI 650, <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bgi650.pdf>, zuletzt aufgerufen am 23.05.2013

³ laut BGI 650, <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bgi650.pdf>, zuletzt aufgerufen am 23.05.2013

Experten-Feedback

Zusätzlich zu diesen ergonomischen Vorgaben, die auf bekannten Durchschnittswerten basieren, wurde die Meinung eines Experten aus dem Bereich der Kognitionspsychologie zum grundlegenden Displaydesign eingeholt. Er bestätigte die Entscheidung den vertikalen Displayteil nach hinten zu neigen. Gleichzeitig kritisierte er jedoch die geplante Höhe des Displays (siehe Abbildung 3.2). Dadurch, dass das Display oberhalb der durchschnittlichen Augenposition eines Nutzers endet, kann er seinen Blick über das Display richten. Da dem Nutzer somit die Möglichkeit genommen werde, Dinge in unterschiedlichen Entfernungen zu fokussieren, führe dies auf Dauer zur Ermüdung der Augen. Es entstehe außerdem beim Nutzer der Eindruck direkt vor einer Wand zu sitzen, was bei längeren Arbeiten problematisch sei. Um diese beiden Probleme zu vermeiden wurde die geplante Displayhöhe deutlich reduziert. Für eine endgültige Bestimmung der Höhe wurde sie in einer Studie zusammen mit weiteren Parametern untersucht.

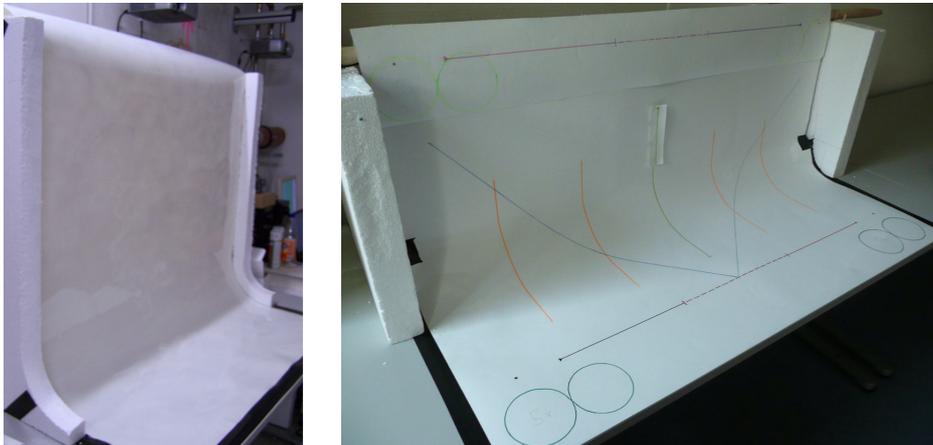


Abbildung 3.2: Einer der ersten L-förmigen Prototypen (links), der mit Hilfe von Experten zum konfigurierbaren Prototyp mit geneigter vertikaler Displayfläche geführt hat (Schulz, 2010).

Studie

Für die Bestimmung der Displayparameter *Höhe*, *Neigung* und *Kurvenradius* wurde eine Studie mit einem konfigurierbaren Papierprototyp durchgeführt. Die Fragen, die in dieser Studie beantwortet werden sollten, sind:

1. Bevorzugt ein Nutzer eine Displayhöhe über oder unter der durchschnittlichen Augenhöhe eines sitzenden Nutzers?
2. Welcher Neigungswinkel des vertikalen Displayteils ist für die direkte Interaktion am angenehmsten?
3. Welcher Kurvenradius des verbindende Elements zwischen den beiden planaren Displaybereichen ist für die direkte Interaktion am angenehmsten?

Die Beantwortung dieser drei Fragen hilft die Parameter für den Curve Prototyp zu optimieren. Einschränkend muss an dieser Stelle jedoch festgehalten werden, dass die optimalen Parameter für ein solches Display je nach Nutzerschaft stark variieren können. Aus diesen Studienergebnissen sind daher keine definitiven Rückschlüsse für eine andere Nutzerschaft (z.B. durchschnittlich deutlich kleinere Nutzer) möglich.

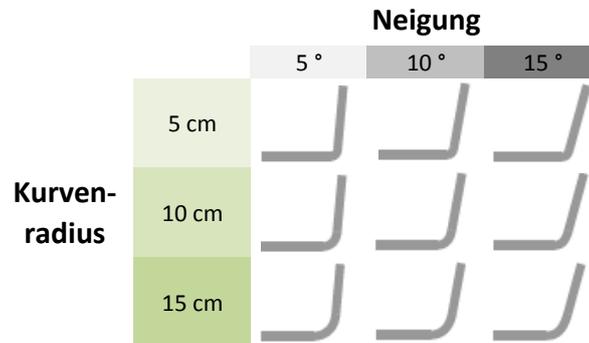


Abbildung 3.3: Die jeweils drei Neigungen und Kurvenradien ergeben neun verschiedene Konfigurationen. Durch zwei verschiedene Höhen (43,75 cm und 53,75 cm) wurden in der Studie daher 18 Konfigurationen getestet.

Studiendesign Im Rahmen dieser Studie wurden die drei Parameter *Höhe*, *Neigung* und *Kurvenradius* in unterschiedlichen Kombinationen untersucht (siehe Abbildung 3.3). Die *Höhe* des Displays wurde dabei in zwei Varianten untersucht, die sich an der durchschnittlichen Augenhöhe eines sitzenden Nutzers orientieren (DIN 33402-2, 2005): 43,75 cm und 53,75 cm oberhalb der empfohlenen Schreibtischhöhe von 72 cm (DIN EN 527-1, 2000). Damit befindet sich erste Höhe um 5 cm unterhalb und die zweite Höhe 5 cm oberhalb der durchschnittlichen Höhe von 49 cm. Die *Neigung* des vertikalen Displaybereichs wurde in drei unterschiedlichen Ausprägungen getestet: 5°, 10° und 15°. Die Höhe des vertikalen Displaybereichs hat sich durch den Winkel jedoch nicht geändert: eine größere Neigung bedeutete somit eine minimal größere vertikale Displayfläche. Der *Kurvenradius* wurde ebenfalls in drei Größen getestet: 5 cm, 10 cm und 15 cm. Ein größerer Radius bedeutete dabei, dass die planaren Teilbereiche des Displays etwas kleiner waren, da die Tiefe des horizontalen Displayteils beibehalten wurde.

Die Kombination dieser drei Faktoren ergibt 18 unterschiedliche Konfigurationen (siehe Abbildung 3.3), die in einer balancierten Reihenfolge von jedem Teilnehmer getestet wurden. Die restlichen Displayparameter wurden aufgrund ergonomischer Vorgaben (Lange u. Winkel, 2008) festgelegt. Die Tiefe der horizontalen Displayfläche betrug 45 cm - 50 cm, die Breite des Tisches 120 cm. Die Tischhöhe von 72 cm liegt im Rahmen der aktuellen Empfehlung für Büromöbel (DIN EN 527-1, 2000).

Teilnehmer An der Studie nahmen neun Studenten (vier männlich, fünf weiblich) im Alter zwischen 22 und 27 teil. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten wurde bei der Auswahl auf die Körpergröße der Teilnehmer geachtet. Diese wurden dazu in die drei Gruppen klein (< 165 cm), mittel (165 cm - 175 cm) und groß (> 175 cm) eingeteilt. Während

die Teilnehmer nach jedem Durchgang außerhalb des Testraums einen Fragebogen ausgefüllt haben, hat der Testleiter den Papierprototyp umgebaut. So wurde verhindert, dass die Teilnehmer die Veränderung des Prototyps direkt beobachten konnten. Zur genaueren Auswertung wurde die komplette Studie mit zwei Videokameras aufgezeichnet.

Aufgabe Die Aufgabe während der Studie umfasste eine simulierte direkte Interaktion mit dem Papierprototyp. Die Teilnehmer sollten mehrere Pfade (siehe Abbildung 3.2 (links)) auf dem Papierprototyp mit einem oder mehreren Fingern abfahren. Die Pfade wurden symmetrisch über den gesamten Prototyp verteilt und bestanden sowohl aus geraden Linien als auch aus kurvigen Abschnitten. Der gebogene Displaybereich wurde durch die Linien in 45° oder 90° gekreuzt. Während der gesamten Testphase wurden die Teilnehmern gebeten ihre Gedanken laut auszusprechen. Nach jedem Durchlauf füllten sie außerdem einen Fragebogen zur aktuellen Konfiguration aus, wobei die Bewertung mit Likert-Skalen (1 - 5, "Ich stimme zu", "Ich stimme nicht zu") erfolgte. Ein kompletter Durchlauf dauerte etwa 90 bis 120 Minuten.

Messwerte und Auswertung Aufgrund des nicht-interaktiven Papierprototyps wurde bewusst darauf verzichtet quantitative Daten, wie Aufgabendauer oder Fehlerraten, zu erheben. Stattdessen konzentrierte sich die Studie auf die subjektive Bewertung der einzelnen Konfigurationen durch die Testpersonen. Diese wurden aufgrund einer zuvor festgelegten Gewichtung in Punkte umgerechnet und dienten zum Vergleich der Konfigurationen, wobei eine höhere Punktzahl eine bessere Bewertung bedeutete. Die Gesamtpunktzahl pro Konfiguration konnte zwischen 18 und 100 Punkten liegen. Die tatsächlichen Bewertungen lagen zwischen 44 und 100 Punkten. Jeder Teilnehmer wurde abschließend noch einmal gebeten die drei persönlich am besten bewerteten Konfigurationen, die anhand der abgegebenen Bewertungen direkt während der Studie ermittelt wurden, zu testen und diese abschließend zu sortieren.

Die Konfigurationen wurden nach der Studie anhand der durchschnittlichen Bewertungen und ihrem Vorkommen in den persönlichen Top-3 Listen mit Hilfe einer Condorcet-Methode (Schulze, 2003) bewertet. Bei dieser Methode werden zwei unterschiedliche Varianten anhand ihrer Bewertung miteinander verglichen und die bessere Variante erhält einen Punkt. Auf diese Weise wird ein einzelner Sieger oder eine geordnete Liste von Siegern ermittelt. Darüber hinaus wurden auch Freitext-Antworten und Aussagen der Teilnehmer während der Studie aufgezeichnet und ausgewertet. Zusätzlich dazu wurden die Videoaufzeichnungen auf auffällige Handlungsmuster hin untersucht.

Ergebnisse Die Auswertung der Studie hat nicht in allen Bereichen klare Ergebnisse geliefert (siehe Abbildung 3.4). Während die meisten Teilnehmer die niedrigere Höhe des Prototyps bevorzugten, war die Bewertung der Neigung und des Kurvenradius nicht so eindeutig. Hier gab es lediglich leichte Tendenzen zugunsten einer größeren Neigung und einem großen Kurvenradius.

Bei der *Höhe* bevorzugten die Teilnehmer sehr deutlich die niedrigeren Displayprototypen (siehe Abbildung 3.4 (a)). Neun der ersten zehn Prototypen sortiert nach durchschnittlich erhaltenen Punkten waren niedrige Versionen (niedrig: 75,44 Punkte; hoch: 66,16 Punkte).

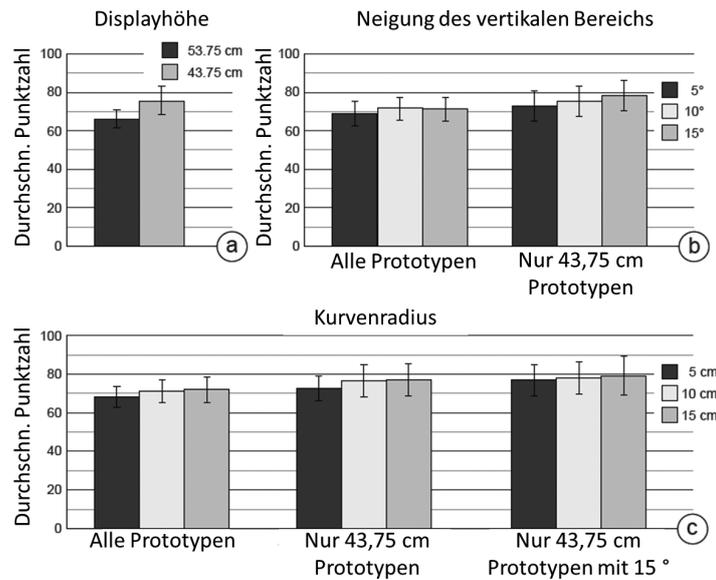


Abbildung 3.4: Subjektive Bewertung der Prototypkonfigurationen. (a) Die niedrigen Varianten wurden insgesamt bevorzugt während der sonstige Trend hin zu einer größeren Neigung der vertikalen Displayfläche (b) und einem großen Kurvenradius (c) geht (Wimmer u. a., 2010).

Die Auswertung mittels Schulze-Methode (Schulze, 2003) bestätigt dies: sechs der ersten sieben Varianten haben einen niedrigen vertikalen Displaybereich. Interessanterweise fühlten sich die meisten Teilnehmer entgegen der Erwartungen von einem höheren Display nicht eingeschränkt oder eingeschlossen, sondern bewerteten diese Versionen vor allem aufgrund von Problemen bei der direkten Interaktion schlechter.

Die Ergebnisse bei der *Neigung* waren nicht so eindeutig (siehe Abbildung 3.4 (b)). Bei keiner der getesteten Varianten (5° (69,22 Punkte), 10° (71,7 Punkte) und 15° (71,48 Punkte)) gab es einen eindeutigen Gewinner. Es gibt lediglich eine leichte Tendenz hin zu den größeren Neigungen. Diese Tendenz verstärkt sich allerdings, wenn man nur die Bewertungen für die niedrigen Prototypen betrachtet. In diesem Fall sind die Varianten absteigend nach Neigungswinkel sortiert, wobei die Variante mit 15° am besten abschneidet (78,11 Punkte gegen 75,29 (10°) und 72,98 (5°)).

Auch beim *Kurvenradius* sind die Ergebnisse nicht eindeutig (siehe Abbildung 3.4 (c)), doch gibt es auch hier wieder eine geringe Tendenz zugunsten der größeren Werte (72,26 Punkte für 15cm, 71,56 Punkte für 10cm, 68,57 Punkte für 5cm). Betrachtet man nun wieder nur die Bewertungen der niedrigen Prototypen, verstärkt sich diese Tendenz minimal (77,26 Punkte für 15cm, 76,55 Punkte für 10cm, 72,52 Punkte für 5cm). In Bezug auf den Kurvenradius gibt es also keinen eindeutigen Sieger, obwohl sich auch hier ein Trend zu den größeren Radien abzeichnet.

Finale Displayproportionen

Aufgrund der Studienergebnisse und der zuvor festgelegten ergonomischen Rahmenbedingungen werden in diesem Abschnitt die endgültigen Displayparameter des Curve festgelegt (siehe Abbildung 3.5 (links)). Neben den drei untersuchten Parametern (Höhe, Neigung und Radius) werden dabei auch die weiteren Parameter wie Breite oder Tiefe des gesamten Displays definiert.

Aufgrund der eindeutigen Ergebnisse beim Parameter Höhe hat der *vertikale Displaybereich* des finalen Entwurfs nur eine Höhe von 43,75cm und liegt somit unterhalb der durchschnittlichen Augenhöhe eines sitzenden Nutzers. Basierend auf den Ergebnissen der Studie wird er außerdem um 15° nach hinten geneigt. Trotz der etwas größeren Neigung verglichen mit einem ergonomischen Genickwinkel von 10° schaut der Nutzer nahezu senkrecht auf diesen Displaybereich (Psyhogios u. a., 2001) mit einem Abstand von etwa 60cm bis 70cm, was einem guten Leseabstand entspricht (Dillon u. Emurian, 1996).

Die *Kurve* des Displays wird trotz einer leichten Tendenz zugunsten des größten Radius (15cm) auf einen Radius von 10cm festgelegt. Dieser Radius stellt einen guten Kompromiss zwischen einer möglichst großen horizontalen Fläche und einem guten Greifabstand zwischen Nutzer und vertikalem Displaybereich dar. Die uneindeutigen Ergebnisse der Studie widersprechen dieser Entscheidung nicht. Um eine gleichmäßige Displayoberfläche mit möglichst wenigen Verzerrungen zu erreichen ist die Biegung innerhalb der Kurve durchweg konstant.

Der *horizontale Displaybereich* befindet sich aufgrund der ergonomischen Überlegungen zu Beginn der Entwicklung auf einer Höhe von 72cm (DIN EN 527-1, 2000). Um eine gute Erreichbarkeit des gesamten Displays zu gewährleisten hat die horizontale Fläche darüber hinaus eine Tiefe von 35cm bis zum Beginn der Kurve. Dies ermöglicht es einem Nutzer den Ellbogen auf der horizontalen Fläche abzustützen und dabei auf dem vertikalen Teil zu interagieren.

Basierend auf den Kommentaren der Testpersonen hat das gesamte Display eine Breite von 120 cm. Diese Breite erlaubt zum einen das einfache Erreichen aller Displaybereiche und zum anderen ist noch ein akzeptabler Blickwinkel auf Inhalte in den Randbereichen gewährleistet. Darüber hinaus erlaubt diese Breite auch das komfortable Arbeiten von zwei Personen am Curve zur gleichen Zeit.

3.1.2 Bau des Prototyps

Der Bau eines funktionsfähigen gebogenen Touchscreens stellt gewisse Anforderungen an die genutzten Technologien zur Ein- und Ausgabe, wie sie bereits in Kapitel 2 vorgestellt wurden. Auf Seiten der Ausgabe muss zum Beispiel ein durchgehendes Bild scharf und verzerrungsfrei auf einer gebogenen Fläche dargestellt werden. Gleichzeitig muss es aber auch möglich sein auf der gesamten Fläche Berührungen durch den Nutzer oder Objekte zu erkennen. Auf Basis der Betrachtungen aus Kapitel 2 wurden passende Technologien ausgewählt und mit ihnen ein lauffähiger Prototyp gebaut. Dieser Abschnitt begründet zum einen die

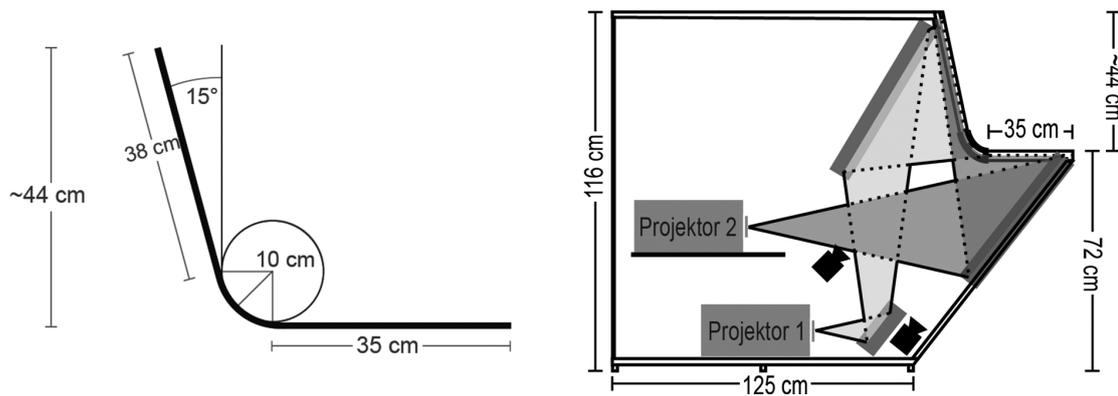


Abbildung 3.5: Die finalen Maße des Curve basieren auf der durchgeführten Nutzerstudie (links). Konstruktionsskizze des Curve (rechts): Zwei Projektoren projizieren über drei Oberflächen Spiegel (blau). Vier Kameras beobachten die Displayoberfläche direkt (Hennecke, 2013).

Technologieauswahl und liefert zum anderen die Konstruktionsdetails des Prototyps (siehe Abbildung 3.5).

Konstruktion Das Ziel bei der Konstruktion des Curve Prototyps war ein in sich geschlossenes System zu bauen, dessen Bauteile und Kalibrierung gegen äußere Einflüsse geschützt sind. Aus diesem Grund wurde entschieden ein geschlossenes Gehäuse um den gesamten Aufbau aus Rechner, Projektoren, Spiegeln und Displayfläche zu bauen (siehe Abbildung 3.5 rechts). Die entstehende Wärme der Komponenten wird dabei über Lüftungsschlitze und mittels kleiner Gehäuselüfter abgeführt. Um eine größtmögliche Flexibilität zu ermöglichen sind die eingebauten Projektoren und zwei der drei Spiegel in gewissen Grenzen frei beweglich. So können diese Teile für eine grobe Kalibrierung des Systems sowohl in ihrer Position als auch in ihrem Winkel angepasst werden.

Im Gegensatz dazu ist die gebogene Plexiglassplatte (Stärke: 12 mm) weder in ihrer Form noch in der Position oder Ausrichtung flexibel, sondern fest in den Rahmen eingebaut. Sie wurde von einem lokalen Unternehmen⁴ nach den Maßen hergestellt, die in der vorangegangenen Papierprototyp-Studie (siehe Kapitel 3.1.1) ermittelt wurden. Für spätere Testzwecke wurden eine 120 cm und eine 160 cm breite Platte bestellt, wobei nur die schmalere Version im Rahmen diese Arbeit im System verbaut war.

Ausgabe Die Darstellung auf der gebogenen Plexiglassplatte nutzt Curve ein Rückprojektionssystem. Zu diesem Zweck befindet sich eine Rückprojektionsfolie („translucent white“ Folie der Firma Rosco⁵) auf der Oberseite der gebogenen Plexiglassplatte. Sie ist dort mit Hilfe eines umgebenden Holzrahmens eingespannt. Auf diese Weise ist eine nahtlose Projektion auf die gesamte gebogene Oberfläche möglich. Gleichzeitig ist die Darstellungsqualität aufgrund der Rückprojektionsfolie mit anderen Rückprojektionssystemen vergleichbar.

⁴ <http://www.plexiweiss.de/de/index.php>, zuletzt aufgerufen am 31.05.2013

⁵ <http://www.rosco.com/>, zuletzt aufgerufen am 31.05.2013

Die Rückprojektion wird mit zwei FullHD-Projektoren (Sony VPL-HW 10) realisiert, die im Systemgehäuse untergebracht sind. Sie projizieren mit Hilfe der im System verbauten Spiegel jeweils senkrecht auf je eine der planaren Displayflächen. Dieser Aufbau ermöglicht neben einer gleichbleibenden Bildschärfe auf den Projektionsflächen auch einen gleichmäßigen Bildübergang zwischen den Projektionen in der Mitte der Displaykurve. Die genaue Handhabung dieser Überschneidung ist in Abschnitt 3.2 beschrieben.

Um den für eine entsprechend große Darstellung benötigten Projektionsabstandes zwischen Bildquelle und Projektionsfläche zu realisieren, werden drei unterschiedlich große Spiegel genutzt: der größte Spiegel befindet sich direkt unterhalb der horizontalen Displayfläche und spiegelt die Bildausgabe von einem Projektor direkt auf diese Fläche. Die beiden anderen Spiegel werden zur Projektion auf die Vertikale genutzt (siehe Abbildung 3.5). Der freischwebende Spiegel ist aus Konstruktionsgründen ein Folienspiegel. Die anderen beiden Spiegel sind Oberflächenspiegel, die im Gegensatz zu herkömmlichen Spiegeln keine sogenannten Geisterbilder verursachen und damit zu einer besseren Bildqualität beitragen.

Direkte Eingabe Im Laufe dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche kamerabasierte Eingabetechnologien (siehe Kapitel 2) zur direkten Interaktion mit dem Display implementiert: FTIR und DI. Beide Techniken nutzen dieselbe Hardware-Basis: vier IR-sensitive Tracking-Kameras („Firefly MV“ von Point Grey Research⁶), die über FireWire mit dem Rechner verbunden sind. Die Kameras sind direkt auf die Rückseite der Displayoberfläche ausgerichtet und beobachten jeweils etwas mehr als ein Viertel der Gesamtfläche. Um eine gute Trackinggenauigkeit in den Übergangsbereichen zwischen den Kamerabildern zu erreichen, überschneiden sich die Aufnahmebilder aller Kameras. Diese Überschneidung wird dann mit Hilfe einer Kalibrierung (siehe Abschnitt 3.2.2) dazu genutzt um Berührungspunkte auch über Bildgrenzen hinweg weiterverfolgen zu können.

Bereits bei der Planung des Displayrahmens wurde der **FTIR**-Aufbau berücksichtigt. Der Rahmen enthält passende Aussparungen, um Infrarot-LEDs direkt mit der Plexiglassplatte verbauen zu können. Um diesen benötigten Platz möglichst gering zu halten und gleichzeitig eine hohe Ausleuchtungsstärke zu erreichen sind SMD LEDs auf allen Seiten direkt mit dem Rand der Platte verklebt. Im Gegensatz zu herkömmlichen LEDs bietet die SMD Bauweise bei gleichbleibendem Stromverbrauch eine sehr flache Bauweise, eine hellere Lichtquelle und je nach LED auch eine genauer zu kontrollierende Farbtemperatur⁷.

Erste Versuche ausschließlich die Projektionsfolie zur Darstellung und gleichzeitig zur Realisierung des FTIR-Setups zu nutzen waren nicht sehr erfolgreich: die Erkennung von Berührungen und die Fehleranfälligkeit hierbei waren problematisch. Um diese Probleme zu umgehen wurden verschiedene zusätzliche Folien zwischen der Plexiglassplatte und der Projektionsfolie getestet. Die dabei erfolgreichste Variante ist ein in Eigenarbeit mit Silikon beschichtetes, transluzentes Zeichenpapier, dessen silikon-beschichtete Seite auf der Plexiglassplatte aufliegt. Die hieraus entstehenden FTIR-Punkte bei Berührungen sind klar und deutlich im Kamerabild zu sehen und die Silikonschicht verhindert ein Verkleben der Folie

⁶ http://www.ptgrey.com/products/fireflymv/fireflymv_usb_firewire_cmos_camera.asp, zuletzt aufgerufen am 31.05.2013

⁷ [//www.roh-tec.de/_:130.html](http://www.roh-tec.de/_:130.html), zuletzt aufgerufen am 31.05.2013

mit der Plexiglassplatte. Um entstehende Falten der Folien aufgrund der gebogenen Displayfläche zu vermeiden sind sie mit handelsüblichem Flüssigkleber miteinander verklebt. Die dadurch entstehenden optischen Beeinträchtigungen sind im Vergleich zur Faltenbildung der Folien vernachlässigbar.

Für einige Projekte war ein FTIR-Tracking nicht ausreichend weswegen zusätzlich **DI** als Trackingtechnologie im Curve implementiert wurde. Der Aufbau nutzt eine diffus reflektierende Folie im Inneren des Tisches zur einfachen Lichtstreuung⁸. Vier IR-Fluter leuchten das Innere des Gehäuses aus und ermöglichen zusammen mit der diffus streuenden Folie die Nutzung von DI-basiertem Tracking. Um Lichtspiegelungen in jedem Kamerabild auf der gebogenen Plexiglassplatte zu vermeiden, sind die Scheinwerfer dabei nicht direkt auf die Rückseite der Displayfläche gerichtet. Das System wird nur bei Bedarf aktiviert, um mögliche Augenschäden aufgrund der starken IR-Ausleuchtung zu vermeiden.

3.2 Softwareanpassungen

Im Gegensatz zur Darstellung auf planaren Oberflächen stellen sowohl die verzerrungsfreie Projektion auf als auch die direkte Interaktion mit einer non-planaren Oberfläche wie dem Curve besondere Anforderungen. Im Fall der Projektion sind mindestens drei Problemfelder zu beachten: die Bildschärfe, die Projektionsgröße und die Bildüberschneidung zwischen den Projektionen. Die direkte Interaktion wiederum muss dann an diese Darstellung angepasst und ortsgenau verarbeitet werden. Aufgrund der Größe und Form des interaktiven Displays müssen auch hier mehrere Kameras eingesetzt und aufeinander abgestimmt werden. Zuerst werden in diesem Abschnitt diese wesentlichen Probleme erklärt bevor die Lösungen in Form von Anpassungen der genutzten Software für die Aus- sowie die Eingabe vorgestellt werden.

Neben den bereits genannten Punkten gibt es noch weitere Probleme bei der Projektion auf non-planare Oberflächen wie Verdeckungen (Bimber u. Raskar, 2005) oder Bewegungen der Projektionsfläche (Bandyopadhyay u. a., 2001). Da solche Faktoren beim Aufbau des Curve jedoch ausgeschlossen wurden, werden sie an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Insgesamt muss außerdem festgestellt werden, dass eine Weiterentwicklung des Curve auf Basis von OLED-Technik die hier vorgestellten Probleme beseitigen würde. Deswegen ist dieser technische Teil vor allem zum grundlegenden Verständnis des Aufbaus Teil der Arbeit.

Bildschärfe

Um ein gleichmäßig scharfes Bild mit einem handelsüblichen Projektor zu projizieren muss der Abstand zwischen Projektor und der Projektionsfläche konstant sein. Auf diese Weise lässt sich die Projektion auf diese Ebene exakt fokussieren. Während dies bei planaren

⁸ <http://ig.hfg-gmuend.de/how-to/multi-touch-tutorial/thomasglaesermultitouch.jpg/view>, zuletzt aufgerufen am 31.05.2013

Oberflächen, wie zum Beispiel einem Whiteboard, problemlos funktioniert, ist eine inhärente Eigenschaft einer non-planaren Fläche, dass sie keinen konstanten Abstand zu einem anderen Punkt hat.

Im Fall des Curve besteht die Projektionsfläche aus zwei etwa gleichgroßen planaren Flächen, die durch eine Kurve verbunden sind. Aus diesem Grund wird je ein Projektor auf je eine der beiden planaren Flächen gerichtet um dort ein scharfes Bild darzustellen. Dadurch ist eine weitestgehend gute Bildschärfe gegeben, während sich die Projektionen in der Displaykurve dadurch überschneiden. Der geringe Schärfeverlust der Darstellung in der Kurve aufgrund des vergrößerten Abstands zwischen Bildgeber und Projektionsfläche wird im Rahmen dieser Arbeit dabei in Kauf genommen.

Projektionsgröße

Aufgrund des vergrößerten Abstands zwischen Projektor und Displayfläche muss auch die Projektionsgröße für eine verzerrungsfreie Darstellung korrigiert werden, denn durch die größere Projektionsdistanz wird das projizierte Bild größer je weiter es sich vom Projektor entfernt. Dieser Effekt führt in der Displaykurve dazu, dass die Projektionen beider Projektoren zur Kurvenmitte hin größer werden, was sich vor allem in der größeren Breite der Projektion bemerkbar macht. Dargestellte Inhalte werden so zur Kurvenmitte hin sichtbar größer und wirken dann im Vergleich zur restlichen Darstellung verzerrt.

Bildüberschneidung

Das korrekte Überblenden (Blending) zwischen zwei sich überlappenden Projektionen bringt einige Probleme mit sich (siehe Abbildung 3.6). Das offensichtlichste Problem ist die korrekte Ausrichtung der Projektionen, um Sprünge des dargestellten Inhalts zwischen den Bildern zu verhindern. Aber selbst bei einer perfekten Ausrichtung treten im Überlappungsbereich deutlich sichtbare Helligkeitsunterschiede und je nach Projektionsaufbau auch Schärfenunterschiede auf. Zwar gibt es bereits diverse Systeme, die einen oder mehrere dieser Faktoren automatisch korrigieren (Jarvis, 1997; Yang u. a., 2001; van Baar u. a., 2002), doch basieren sie alle auf zusätzlichen Kameras, die das System insgesamt komplexer gestalten. Der Vorteil einer schnellen automatischen Kalibrierung ist bei einem stationär eingesetzten System, das nur gelegentlich neu kalibriert werden muss, außerdem zu vernachlässigen.

3.2.1 Entzerrung der Ausgabe

Statt einer automatischen Kalibrierung der Darstellung wurden unter Berücksichtigung der oben genannten Probleme und Lösungsansätze zwei manuelle Kalibrierungsmethoden umgesetzt, die auf der Vorverzerrung des darzustellenden Inhalts aufbauen (Raskar u. a., 2003). Während der Kalibrierung beider Methoden muss der Anwender zwei dargestellte Gitternetze (eines je Projektor) so verschieben und verformen, dass die Gitter exakt zueinander

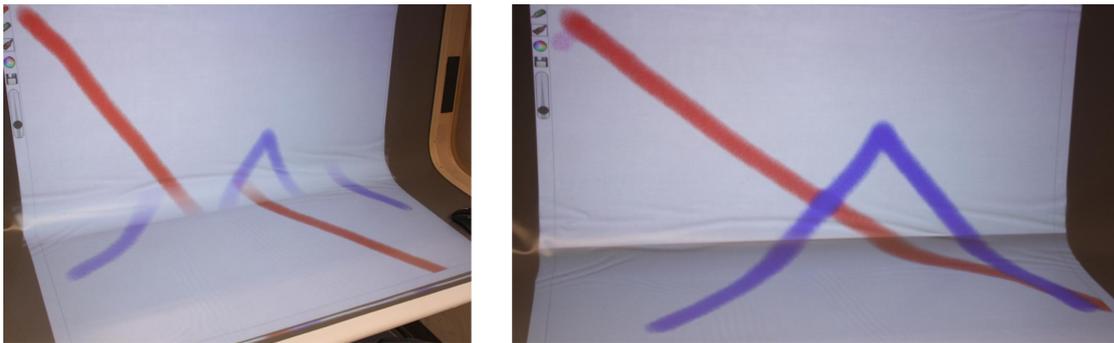


Abbildung 3.6: Beide Projektionen sind in der Displaymitte verzerrt, was zu Überschneidungen und dem Verlust von Bildinhalten führt (links). Die kalibrierte Darstellung zeigt den Inhalt auch in der Krümmung durchgehend an, leidet je nach Qualität der Kalibrierung aber unter sichtbaren Übergängen zwischen den Projektionen (rechts).

ausgerichtet sind und wie ein durchgehendes rechtwinkliges Netz erscheinen. Die sich berührenden Eckpunkte der beiden Gitter müssen dabei innerhalb der Displaykurve übereinander gelegt werden.

Beide Entzerrungsmethoden werden an dieser Stelle nur sehr kurz erklärt, da sie nicht Teil der wissenschaftlichen Forschung waren. Dennoch haben sie gerade zu Beginn der Arbeit einigen Aufwand verursacht und konnten erst gegen Ende problemlos zur Umsetzung der Prototypen genutzt werden.

Dreidimensionale Bildentzerrung

Die erste der beiden Bildentzerrungsmethoden basiert auf einem dreidimensionalen Modell, das nach der Kalibrierung erstellt und dann von Anwendungen zur Laufzeit genutzt wird um Inhalte in dessen Textur darzustellen. Die Gitternetze während der Kalibrierung entsprechen bei dieser Methode dreidimensionalen Objekten, die exakt so geformt und zur virtuellen Kamera positioniert sind, dass ihre Gitternetztextur wie eine zweidimensionale Darstellung wirkt. Die Punkte innerhalb des Gitters sind Eckpunkte, die die Form eines dreidimensionalen Körpers definieren (Vertices). Durch das Verschieben dieser Punkte während der Kalibrierung verformt der Anwender unbewusst das zugrunde liegende dreidimensionale Modell und dessen Vertices. Am Ende dieser Kalibrierung hat der Nutzer beide dreidimensionalen Objekte exakt so verformt, dass deren Texturen auf dem Curve wie ein durchgehendes Gitternetz erscheinen.

Um diese dreidimensionalen Objekte zur Laufzeit-Entzerrung eines Programms zu nutzen, muss der Programminhalt auf die Texturen der Objekte gerendert werden. Genau wie schon bei der Kalibrierung erscheint der gerenderte Inhalt dann korrekt entzerrt und durchgehend auf dem gebogenen Display. Dieser Ansatz wurde im Rahmen der Arbeit für das Java Framework MT4j⁹ implementiert und genutzt. Dabei stellte sich jedoch heraus, dass dieser Ansatz

⁹ <http://www.mt4j.org/>, zuletzt aufgerufen am 31.05.2013

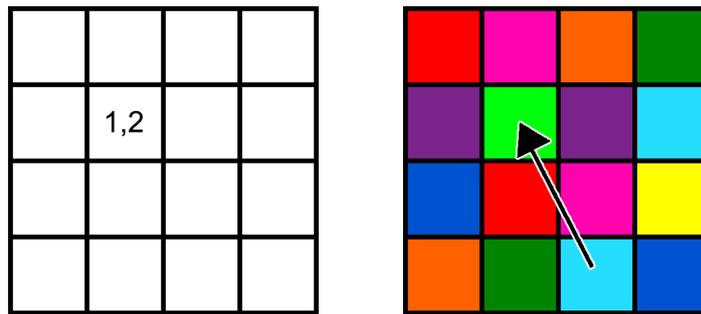


Abbildung 3.7: Zweidimensionale Bildentzerrung mit Shadern: In der Kalibrierungsdatei steht pro Pixel die relative Position des Zielpixels für eine entzerrte Bilddarstellung (links). Der Pixelshader liest diese Information zur Laufzeit aus und ersetzt die aktuelle Pixelfarbe durch die Farbe des relativ angegebenen Zielpixels (rechts) (nach (Schenk, 2012b)).

zwar theoretisch leicht in jede 3D-Engine zu integrieren ist, diese sich aber, mit Ausnahme von MT4j, nur begrenzt für die Gestaltung von Benutzerschnittstellen eignen. Der Grund hierfür ist die mangelnde Unterstützung komplexer zwei-dimensionaler grafischer Benutzerschnittstellen. Außerdem kostet die Darstellung einer entsprechend hochauflösten Textur sehr viel Rechenleistung, weswegen eine weitere Entzerrungsmethode untersucht und umgesetzt wurde.

Zweidimensionale Bildentzerrung

Aufgrund des hohen Rechenaufwands der dreidimensionalen Bildentzerrung wurde ebenfalls eine zweidimensionale Bildentzerrung auf Pixelebene realisiert. Ähnlich wie beim Ansatz des dreidimensionalen Modells wird hierbei die eigentliche Bildausgabe vorverzerrt, so dass ihre Projektion auf der non-planaren Displayfläche für den Nutzer verzerrungsfrei erscheint. Wie zuvor müssen bei der Kalibrierung zwei dargestellte Gitternetze auf ihrem jeweiligen Displayteil so ausgerichtet werden, dass sie ein durchgehendes Gitternetz auf der gesamten Displayfläche ergeben.

Doch anstelle einer Manipulation eines dreidimensionalen Modells wird bei diesem Ansatz die Verschiebung jedes einzelnen Pixels des Gesamtbilds berechnet.

Die berechnete Verschiebung aller Punkte wird anschließend mit einer bi-linearen Interpolation zwischen den Eckpunkten der Gitternetze berechnet und getrennt nach Verschiebung entlang der x- und y-Achse, mit Hilfe zweier Farbwerte (RGBA: red, green, blue, alpha) kodiert. Der so berechnete Farbwert wird dann in ein neues Bild an die Zielposition des untersuchten Pixels gespeichert. Das Ergebnis ist ein Bild mit der vollen Bildschirm-Auflösung des Curve (1920px x 1080px), in das für jeden einzelnen Pixel die relativen Koordinaten des Pixels gespeichert sind (siehe Abbildung 3.7).

Dieses Vorgehen hat drei wesentliche Vorteile gegenüber der dreidimensionalen Entzerrung. Der erste Vorteil liegt in der effizienten Bearbeitung der Ausgabe durch den Pixelshader auf der Grafikkarte des Systems. Die Berechnung erfolgt dadurch nahezu ohne zusätzlichen

Rechenaufwand für den Prozessor und das restliche System. Der zweite Vorteil liegt darin, dass auf diese Weise die Ausgabe aller Anwendungen, die die Einbindung eines Shaders unterstützten, verzerrungsfrei dargestellt werden kann. Ansätze diese Art der Entzerrung für die Darstellung eines Linux-Desktops auf dem Curve zu nutzen finden sich bereits in einer frühen Projektarbeit zum Curve (Lang, 2010). Der dritte Vorteil dieser Art der Entzerrung liegt in der Wiederverwendbarkeit der Kalibrierungsdaten. Selbst wenn die Anwendung keine Shader unterstützt kann die zugrunde liegende Logik zusammen mit den vorhandenen Kalibrierungsdaten zur Bildentzerrung genutzt werden.

3.2.2 Kalibrierung der Eingabe

Wie in Abschnitt 3.1.2 bereits beschreiben basiert die direkte Eingabe am Curve auf optischem Tracking (siehe Kapitel 2). Um dabei trotz der Displaybiegung eine gute Genauigkeit¹⁰ zu erreichen nutzt das System vier einzelne IR-sensitive Kameras - zwei Kameras pro planarem Displaybereich. Die Aufnahmebereiche benachbarter Kameras überschneiden sich dabei um einige Zentimeter. Jede dieser Kameras wird mit einer separaten libTisch-Instanz¹¹ angesteuert und stellt darüber erkannte Touch-Eingaben (Blobs) mit Hilfe des TUIO-Protokolls¹² auf einem eigenen Port zur Verfügung.

Während die Nutzung einer einzelnen Kamera zur Realisierung eines solchen Setups mittlerweile relativ problemlos möglich ist (zum Beispiel mit CCV¹³), bringt die Nutzung mehrerer Kameras ein Problem mit sich: die Verwaltung von Blobs, die gleichzeitig in mehreren Kamerabildern zu sehen sind. Ein Extrembeispiel dafür ist ein Touch zentral in der Mitte der Kurve, der von allen vier Kameras erfasst wird. Um zu verhindern, dass dies zur Mehrfacherkennung eines einzelnen Blobs führt, muss das Kamerasystem vor der Nutzung kalibriert werden.

Zur Kalibrierung des Kamerasystems wird ein gleichmäßiges Punktmuster dargestellt. Jeder dieser Punkte muss der Reihe nach vom Nutzer berührt werden. Der Vorgang startet in der linken oberen Ecke und der jeweils aktive Punkt ist deutlich sichtbar rot gekennzeichnet. Zu jedem dieser Punkte speichert das System dann die zugehörigen TUIO-Koordinaten derjenigen Kameras, die einen Blob erkannt haben. Mit Hilfe dieser Daten interpoliert das System später zur Laufzeit die Position einer Berührung auf der Oberfläche und stellt sie via TUIO in einem einheitlichen Koordinatensystem (0,0 bis 1,1; ausgehend von der linken oberen Ecke) bereit.

Kleine Abweichungen, Ungenauigkeiten und Rundungsfehler während der Berechnung werden durch einen Toleranzbereich um jeden Punkt ausgeglichen. Liegt ein zweiter berechneter Punkt innerhalb dieses Toleranzbereichs, werden beide zu einem einzigen zusammengelegt. Da dieser Toleranzbereich aber auch dazu führt, dass zwei tatsächliche Eingabepunkte, die

¹⁰Der hier beschriebene Aufbau und die Kalibrierung führen zu einer Tracking-Genauigkeit von etwa 14 dpi.

¹¹<http://tisch.sourceforge.net/>, zuletzt aufgerufen am 03.06.2013

¹²<http://www.tuio.org/>, zuletzt aufgerufen am 03.06.2013

¹³<http://ccv.nuigroup.com/>, zuletzt aufgerufen am 03.06.2013

nah beieinander liegen, zusammengelegt werden, muss hier die richtige Balance zwischen Robustheit (großer Toleranzbereich) und Genauigkeit (kleiner Toleranzbereich) gefunden werden. Gerade im Bereich der Erkennung von Markern und Objekten (siehe Kapitel 5) ist dieser Faktor entscheidend.

tl;dr

Ein gebogenes interaktives Display kann mit Hilfe von Experten-Feedback und Nutzerstudien ergonomisch gestaltet werden. Die unterschiedlichen Displayparameter können dabei mit unterschiedlichen Papierprototypen überprüft und definiert werden. Zur Konstruktion genügen einfache Technologien und Programme. Die Software zur Darstellung und Interaktion muss jedoch an die neue Displayform angepasst werden.

III

EFFEKTE DES DISPLAYS AUF
INTERAKTIONSFORMEN

Kapitel 4

Gängige Interaktionsformen

*Ja, Statistiken.
Aber welche Statistik stimmt schon?
Nach der Statistik ist jeder 4. Mensch ein Chinese
aber hier spielt gar kein Chinese mit.*

– Werner Hansch, Kommentator –

Betrachtet man die Interaktion mit heutigen Computersystemen, so herrschen aktuell zwei Interaktionskonzepte vor: die indirekte Eingabe per Maus und die direkte Eingabe mit dem Finger (Touch). Gerade im Bereich der Desktop-Computer ist die Maus-Steuerung zusammen mit einer Tastatur Standard und wird nur sehr langsam mit ersten Touch-Konzepten¹ erweitert. Ganz anders sieht dies jedoch bei tragbaren Geräten wie Smartphones und Tablet-Computern aus - diese sind fast ausschließlich per Touch bedienbar².

Beide Interaktionsformen wurden im Laufe der Zeit auf ihre Benutzbarkeit in unterschiedlichen Anwendungsszenarien hin untersucht (siehe Abschnitt 4.1). Dabei wurde der Einfluss von Faktoren wie der Größe, der Orientierung oder auch der Ausrichtung verschiedener Displays zueinander auf die direkte und die indirekte Interaktion bewiesen.

Kapitelfrage

Wie werden gängige Interaktionsformen durch ein gebogenes Display beeinflusst?

In diesem Kapitel wird untersucht, ob und wie die direkte und die indirekte Eingabe auch durch eine gebogene Displayform, wie die des Curve, beeinflusst werden. Dazu werden zu-

¹ Microsoft Windows 8, <http://windows.microsoft.com/de-de/windows/home>, zuletzt aufgerufen am 14.06.2013

² <http://www.abiresearch.com/press/97locos-of-all-smartphones-will-have-touchscreens-by-20>, zuletzt aufgerufen am 27.06.2013

erst vergleichbare Grundlagenuntersuchungen zu Interaktionen auf planaren Displays zusammengefasst. Anschließend werden Studien zu den grundlegenden Interaktionsformen Selektieren (Pointing) und Verschieben (Dragging) auf dem Curve vorgestellt. Zusammen mit weiteren Studien, die den Einfluss eines gebogenen Displays auf die Interaktion untersuchen (Voelker u. a., 2012), werden auf diese Weise grundlegende Einflüsse identifiziert. Dazu zählen sowohl Probleme, wie eine geringe Interaktionsgenauigkeit, als auch besondere Stärken einzelner Interaktionen, wie eine schnelle Touch-Interaktion zwischen den Displaybereichen. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und zur Beantwortung von *Forschungsfrage 1* genutzt. Die Ergebnisse flossen außerdem in die Interface-Entwicklung einer Leitstandsumgebung (siehe Kapitel 7) ein.

4.1 Verwandte Arbeiten

In diesem Abschnitt werden verwandten Arbeiten vorgestellt, die gängige Interaktionsformen bei der Eingabe per Maus und Touch auf planaren Displays untersuchen. Ihre Ergebnisse sind wichtig um zu zeigen, dass bereits planare Displays die Interaktion auf unterschiedliche Arten beeinflussen. Daher ist davon auszugehen, dass dies auch für ein großes, gebogenes Display wie den Curve gilt.

Alle Arbeiten basieren auf der grundsätzlichen Annahme, dass sich komplexe Interaktionen anhand einfacher einzelner Interaktionen mit unterschiedlichen Eingabegeräten beschreiben lassen (Foley u. a., 1984). Um also ein System und dessen Einfluss auf die Interaktion von Grund auf zu untersuchen, nutzt man eine dieser grundlegenden Interaktionen. In Bezug auf grafische Benutzerschnittstellen werden sechs verschiedene Typen unterschieden und für unterschiedliche Eingabegeräte beschrieben (siehe Abbildung 4.1): (*Select, Position, Orient, Path, Quantify* und *Text*).

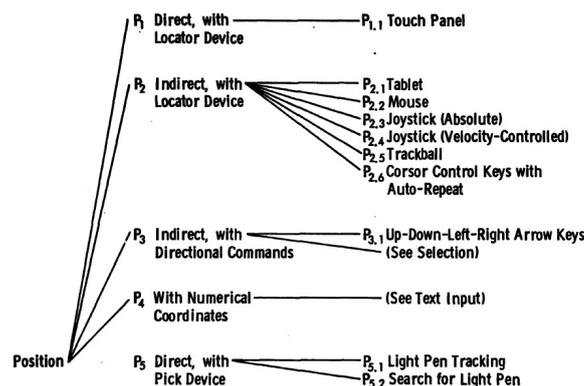


Abbildung 4.1: Definition der Interaktion *Position*, aufgeschlüsselt nach unterschiedlichen Eingabegeräten (Foley u. a., 1984).

Während bei *Quantify*, also dem Angeben eines numerischen Wertes, und *Text* die Eingabe vor allem an physikalische Eingabegeräte gebunden ist (Tastatur, Knöpfe, Regler), beziehen sich die anderen vier Typen auf eine direkte oder indirekte Interaktion mit dargestellten, virtuellen Inhalten. Dabei beschreiben *Select* und *Orient* die Auswahl und die Manipulation dieser Inhalte. Sie hängen somit direkt mit diesen Inhalten zusammen und können ohne vorhandene Inhalte nicht ausgeführt werden.

Im Gegensatz dazu lassen sich *Position* und *Path* (Pfad) davon getrennt betrachten, da sie grundlegende Interaktionen beschreiben, die von dargestellten Inhalten losgelöst sind. Eine *Position* ist ein einzelnes Ereignis, bei dem der Nutzer eine Stelle auf dem Bildschirm mit Hilfe eines verfügbaren Eingabegeräts auswählt. Durch die Einbeziehung des Faktors *Zeit*, die zwischen zwei *Positionen* vergeht, entsteht ein *Pfad*. Dieser unterscheidet sich nicht nur in den einzelnen Positionen, sondern auch in der verstrichenen Zeit zwischen zwei einzelnen Positionen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden *Position* und *Pfad* genutzt um einen möglichen Einfluss der gebogenen Displayform des Curve auf die Nutzereingabe zu identifizieren. Dabei untersuchen zwei separate Studien sowohl die Position (Pointing), als auch der Pfad (Dragging). Eine zusätzliche Interaktionsform, die im Rahmen der verwandten Arbeiten besprochen wird, ist das Schubsen (Flicking) von Objekten (Voelker u. a., 2012). Diese Arbeit ist insofern von Interesse, da sie den Einfluss eines gebogenen Displays auf eine andere Interaktionsform beschreibt.

Pointing

Die meisten Untersuchungen zu Pointing auf planaren Flächen gehen auf ein Experiment von Paul Fitts (Fitts, 1954) zurück. Fitts nutzte damals eine sich wiederholende Aufgabe, bei der die Studienteilnehmer ein zweidimensionales Ziel mit einem Stift treffen sollten (siehe Abbildung 4.2).

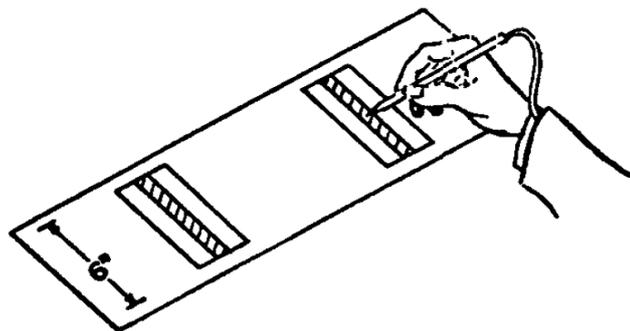


Abbildung 4.2: Aufbau des Pointing-Experiments nach Fitts: Der Nutzer muss einen Eingabestift von einem Startbereich in einen Zielbereich bewegen (Fitts, 1954).

In der Studie mussten die Teilnehmer zuerst einen Startbereich und anschließend schnellstmöglich die Zielfläche mit einem Eingabestift berühren. Die gemessenen Zeiten zwischen diesen beiden Berührungen wurden dann von Fitts genutzt um eine allgemeine Formel zur Vorhersage der Dauer einer Selektion eines Zielbereichs (MT , movement time) zu definieren:

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

Dabei sind a und b konstant und werden für jedes Eingabegerät separat berechnet. a bezeichnet dabei die Verzögerung bis die Eingabe tatsächlich startet und b umfasst sowohl die Beschleunigung als auch Veränderungen der Bewegung in Abhängigkeit des Eingabegeräts. Beide Werte werden durch wiederholte Messungen unterschiedlicher Nutzer mit einem Eingabegeräte bestimmt. b kann hierbei auch genutzt werden, um mit Hilfe des Kehrwerts den IP (Index of Performance) zu bestimmen. Dieser dient dazu die Leistung unterschiedlicher Eingabegeräte direkt miteinander vergleichen zu können.

$$IP = 1/b$$

Ein Beispiel für einen solchen Vergleich stammt von Card et al. (Card u. a., 1978). Mit ihrem Experiment zeigen die Autoren, dass die Maus als Eingabegerät zur Selektion von Text nicht nur schneller, sondern auch präziser ist als die Eingabe mit einer Tastatur oder einem Joystick.

Die Variable A (Amplitude) steht in Fitts' Formel für die Distanz zwischen Start- und Zielbereich und W (Width) beschreibt die Breite des Zielbereichs gemessen in Bewegungsrichtung. Beide Variablen werden im Laufe eines Experiments variiert, um die Verlässlichkeit der erhobenen Daten zu erhöhen. Mit Hilfe dieser Werte lässt sich dann der sogenannte ID (Index of Difficulty) berechnen, mit dem die Schwierigkeit der jeweiligen Aufgabe beschrieben wird.

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

Im Idealfall variiert diese Schwierigkeit in einem Experiment in einem Bereich zwischen 2 und 8 Bit um belastbare Ergebnisse zu erhalten (Soukoreff u. MacKenzie, 2004).

Die Grundaussage von Fitts' Law lässt sich sehr einfach zusammenfassen: Je größer der Abstand zwischen Start und Ziel oder je kleiner das Ziel ist, desto länger dauert eine erfolgreiche Selektion. Neben dem Abstand zum Ziel und der Zielgröße werden dabei auch spezifische Eigenschaften des Eingabegeräts berücksichtigt.

Basierend auf diesem grundlegenden Experiment sind verschiedene Abwandlungen von Fitts' Law in Bezug auf unterschiedliche Eingabegeräte aufgestellt und untersucht worden. In einer Studie wurden beispielsweise die drei Eingabegeräte Maus, Trackball und Stylus miteinander verglichen (MacKenzie u. a., 1991). Die Ergebnisse bestätigen dabei weitestgehend bereits bekannte Ergebnisse (Card u. a., 1978): die Maus schneidet besser ab als der Stylus und der Trackball. Allerdings beschreiben die Autoren in ihrer Arbeit auch die Möglichkeit, dass der Stylus gerade bei direkter Manipulation besser als die Maus abschneiden könnte.

Der ursprüngliche Aufbau dieser Experimente ist jedoch aufgrund des fehlenden Bezugs zu realistischen Interaktionen durchaus umstritten. Viele Ergebnisse sind aufgrund des Aufgabendesigns nicht ohne Weiteres auf alltägliche Interaktionen übertragbar (MacKenzie u. Buxton, 1992; Grossman u. Balakrishnan, 2004). Der Grund dafür liegt in der variierenden Zielbreite beim täglichen Arbeiten, das sowohl zwei- als auch drei-dimensionale Selektionsaufgaben beinhaltet. Während die Zielbreite beim traditionellen Fitts' Law Experiment von einem fest definierten Eintrittswinkel der Nutzereingabe von 90° in den Zielbereich ausgeht, argumentieren die MacKenzie und Grossman, dass dieser Eintrittswinkel beim täglichen Arbeiten stark variiert. Dadurch verändert sich die Zielbreite in Abhängigkeit vom Eintrittswinkel und der Form des Ziels gegebenenfalls deutlich (siehe Abbildung 4.3). Dennoch dient Fitts' Law und das dazu gehörige Experiment bis heute auch als eine Grundlagenuntersuchung für neue Eingabegeräten und Displayarten.

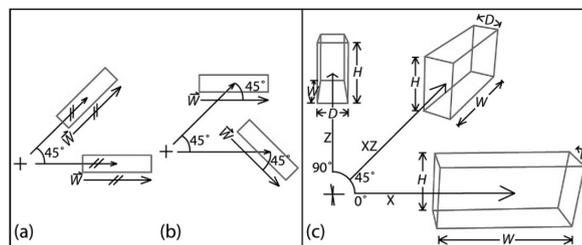


Abbildung 4.3: Die für ein Fitts' Law Experiment entscheidenden Eintrittswinkel in den Zielbereich verändern sich bei zwei- und dreidimensionalen Aufgaben und beeinflussen somit das Ergebnis (Grossman u. Balakrishnan, 2004).

Die bisher vorgestellten Studien beschäftigen sich mit Pointing-Interaktionen auf klassischen, planaren Bildschirmen. Im Hinblick auf die Interaktivität des Curve ist es allerdings wichtig auch Studien im Bereich von interaktiven Displays mit unterschiedlichen Orientierungen zu betrachten. Gerade im Bereich der interaktiven horizontalen Tabletop-Displays gibt es einige Arbeiten, die für Interaktionen auf dem horizontalen Displaybereich des Curve relevant sind.

Mit Hilfe eines MERL Diamond Touch Systems (Micire u. a., 2007) hat eine Vergleichsstudie zwischen Maus- und Touch-Eingabe gezeigt, dass die Maus bei kleinen Zielen ($< 20\text{mm}$) auf horizontalen Displays präziser ist als die direkte Selektion mit einem Finger. Bei größeren Zielen lieferte die direkte Interaktion jedoch vergleichbare Genauigkeitswerte und ist durchgehend schneller. Basierend auf ihren Ergebnissen leiten die Autoren eine Mindestgröße für Touch-Elemente auf einem Tabletop-Display ab ($> 30\text{mm}$). Die höhere Selektionsgenauigkeit der Mausinteraktion und die höhere Interaktionsgeschwindigkeit der direkten Eingabe findet sich auch in einer weiteren Studie (Sasangoor u. a., 2009).

In einer anderen Arbeit (Forlines u. a., 2007) wird der Einfluss der Displayorientierung auf Pointing und Dragging genauer untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Genauigkeit der Eingabe mittels Berührung auf einer horizontalen Fläche je nach Position variiert. Die Selektionsgenauigkeit nimmt auf einer horizontalen Fläche ab je weiter das Ziel vom Nutzer entfernt ist. Auf einer vertikalen Fläche ist sie dagegen fast überall gleich. Dennoch beschreiben

die Autoren die direkte Eingabe als eine sinnvolle Eingabeart und führen dies auf verschiedene andere Faktoren zurück. Denn sowohl die Nutzung des räumlichen Gedächtnisses als Unterstützung bei der Interaktion, als auch die bessere Unterstützung gemeinsamer Arbeit am selben Display bieten Vorteile gegenüber der indirekten Interaktion mit einer Maus.

Eine andere Arbeit (Pedersen u. Hornbæk, 2012) beschreibt die Auswirkung der Displayorientierung auf direkte Nutzereingaben (Pointing und Dragging). Sie zeigt, dass Pointing auf einem vertikalen Display etwa 5% schneller ist als auf einem horizontalen Display. Beim Dragging ist dieses Ergebnis genau andersherum: Dragging ist auf dem horizontalen Display etwa 5% schneller als auf dem vertikalen Display. Darüber hinaus haben 13 der 16 Studienteilnehmer die horizontale Fläche für direkte Interaktion bevorzugt, da sie die Interaktion dort als weniger ermüdend empfanden.

Auf einem vertikalen Display beeinflusst auch die Position des Ziels im visuellen Bereich des Nutzers die Selektionsleistung (Po u. a., 2004). Der Vergleich zwischen Zielen auf einem vertikalen Display, die im oberen bzw. unteren Bereich des Sichtfelds eines Nutzers liegen, hat ergeben, dass der untere Bereich besser abschneidet. Die Studienteilnehmer trafen Objekten in diesem Bereich sowohl schneller als auch genauer.

Insgesamt gibt es jedoch auch kritische Stimmen zur vielfachen Verwendung und Adaption von Fitts' Law (Soukoreff u. MacKenzie, 2004; Drewes, 2010). In vielen Arbeiten werden Anpassungen der ursprünglichen Formel vorgeschlagen, um in speziellen Fällen genauere Vorhersagen zu erreichen. Das führte dazu, dass häufig nur die Formel angepasst wird ohne das Design der Studie oder einzelner Aufgaben genauer zu hinterfragen. Die grundsätzliche Korrektheit von Fitts' Law wird jedoch auch im Rahmen dieser Kritik nicht angezweifelt.

Vor diesem Hintergrund wird Fitts' Experiment in dieser Arbeit als Grundlage für weitere Untersuchungen genutzt. Dabei wird die ursprüngliche Formel nicht speziell angepasst, um zum Beispiel in Abhängigkeit einzelner Displayparameter bessere Ergebnisse zu erhalten. Für den Curve ergeben sich in diesem Zusammenhang mehrere Fragestellungen. Zum einen ist unklar wie die Kombination unterschiedlich orientierter Displaybereiche die Geschwindigkeit beim Pointing beeinflusst (Pedersen u. Hornbæk, 2012) und ob eventuell auch die Genauigkeit je nach Zielposition variiert (Forlines u. a., 2007). Zwar zeigen die verwandten Arbeiten hier entsprechende Effekte einzelner Displays auf, die Kombination unterschiedlich orientierter Displaybereiche und ihr Einfluss auf die fundamentale Interaktionsform *Pointing* ist jedoch noch nicht untersucht worden.

Dragging

Dragging ist neben Pointing eine weitere fundamentale Interaktionstechnik heutiger Computersysteme (MacKenzie u. a., 1991). Dragging stellt als dabei strenggenommen eine Erweiterung der Pointing-Interaktion dar (Foley u. a., 1984). Doch im Gegensatz zum Pointing wird beim Dragging ein einzelnes Objekt nicht nur selektiert, sondern mit Hilfe einer anhaltenden Selektionsinteraktion (z.B. Drücken einer Maustaste) verschoben. Aufbauend auf einer solchen Dragging-Geste wurden allgemeine Richtlinien zur Untersuchung von Eingabearten

beschrieben, die nicht auf einer Tastatur basieren (Douglas u. a., 1999). Dabei werden zwei Eingabegeräte (Notebook-Joystick und Touchpad) anhand der Faktoren Leistung (Performance), Komfort und Anstrengung miteinander verglichen. Als Fazit der Arbeit steht unter anderem die Empfehlung, dass bei der Bewertung von Eingabegeräten nicht ausschließlich der Durchsatz als Bewertungsmaß gewählt werden sollte. Die Autoren argumentieren, dass auch die gemessenen Grundwerte Geschwindigkeit und Genauigkeit zum Vergleich unterschiedlicher Eingabearten herangezogen werden sollten. Zusätzlich formulieren sie exemplarische Fragen für eine qualitative Analyse der Eingabegeräte. Die Arbeit hat sowohl als Grundlage für den ISO-Standard 9241-9 (9241-9, 2000), als auch für die hier vorgestellte Studie zum Dragging über Displayverbindungen hinweg (siehe Abschnitt 4.3), gedient.

Neben diesen ausschließlich indirekten Eingaben auf klassischen Displays wurden in der Vergangenheit auch Dragging-Gesten auf großen interaktiven Displays untersucht (Forlines u. a., 2007). Die Ergebnisse zeigen, dass besonders bei der Interaktion mit zwei Eingabepunkten die direkte Interaktion per Touch mit zwei Fingern der indirekten Eingabe mit zwei Mäusen vorzuziehen ist. Jedoch schneidet die Maus bei der Interaktion mit nur einem Eingabepunkt beim Dragging besser ab. Aus diesem Grund ziehen die Autoren kein eindeutiges Fazit. Sie empfehlen je nach Einsatzgebiet unterschiedliche Eingabearten. Für die Entwicklung am Curve bedeutet dies, dass die Interaktion mit der Maus trotz der vollständig interaktiven Displayfläche dennoch eine wichtige Rolle spielt.

Neben der grundlegenden Untersuchung von Dragging-Interaktionen existieren auch Techniken, die Dragging vereinfachen sollen. Eine dieser vereinfachenden Interaktionstechniken ist Push-and-Pop (Collomb u. a., 2005). Sie wurde konzipiert um die direkte Dragging-Interaktion auf großen planaren Wanddisplays zu vereinfachen. Dabei bleibt die eigentliche Dragging-Geste unangetastet. Stattdessen werden potenzielle Interaktionsziele an den Ausgangspunkt der Geste heran geholt. Dadurch verkürzen sich die zurückzulegenden Wege deutlich. Auf Dauer ermüdende Gesten quer über ein großes Display werden so vermieden. Gerade in Bezug auf Ermüdungserscheinungen könnten solche Techniken auch am Curve gezielt eingesetzt werden um die Dragging-Interaktion zu optimieren.

Neben der Nutzung von Dragging auf einem einzelnen Display wurde auch der Einfluss bei der Überquerung von Rändern zwischen mehreren Displays untersucht. Dabei wurde für die indirekte Interaktion mit der Maus eine Beeinflussung nachgewiesen und gleichzeitig eine Verbesserung vorgeschlagen (Baudisch u. a., 2004). Mouse Ether (siehe Abbildung 4.4) ist eine Technik vorgestellt, die den Sprung eines Mauszeigers über Displayränder hinweg der Erwartung des Nutzers anpasst. Normalerweise springt ein Mauszeiger beim Wechsel zwischen zwei Bildschirmen mit unterschiedlichen Auflösungen an die Stelle auf dem Nachbardisplay, die in der rechnerinternen Displaykonfiguration direkt neben der vorherigen Position des Mauszeigers liegt. Diese Position stimmt jedoch nicht immer mit der vom Nutzer erwarteten Position überein. Die Gründe hierfür liegen sowohl in breiten Displayrändern als auch in der perspektivischen Wahrnehmung der Displayumgebung durch den Nutzer. In der durchgeführten Studie wurde gezeigt, dass Mouse Ether die Interaktionszeiten über solche Displayränder hinweg leicht verkürzt. In Bezug auf den Curve bedeutet dies, dass der Übergang zwischen vertikaler und horizontaler Fläche genauer betrachtet werden muss

um potenzielle Probleme zu identifizieren. Denn trotz durchgehender Displayfläche ändert sich die Displayorientierung relativ zum Nutzer und damit auch dessen Wahrnehmung des Displayinhalts.

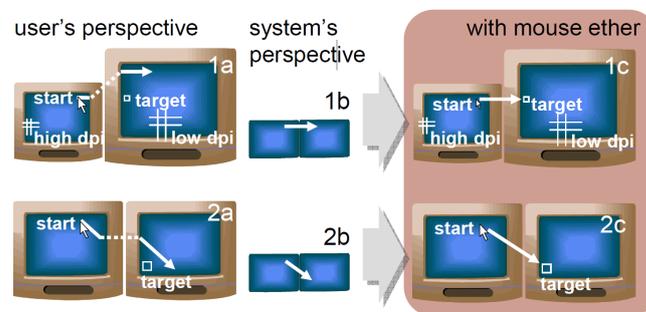


Abbildung 4.4: Die rechnerinterne Displaykonfiguration lässt einen Mauszeiger beim Transfer von einem zum nächsten Display unnatürlich springen. Mouse Ether bewegt den Mauszeiger so über Bildschirmgrenzen hinweg, dass er sich aus Sicht des Nutzers perspektivisch korrekt bewegt (Baudisch u. a., 2004).

In einer weiteren Studie (Benko u. Feiner, 2007) wurde der Einfluss der Displayorientierung unterschiedlicher Displays auf die Eingabe mit einem Mauszeiger untersucht. Dazu wurden hochauflösende kleine Bildschirme, die sich nah am Nutzer befinden, gemeinsam mit entfernten großen Bildschirmen, die eine niedrigere Auflösung haben, getestet. Jede Displayart hatte dabei außerdem eine andere Orientierung zum Nutzer. Während die nächstgelegenen Displays zum Teil fast horizontal orientiert waren, standen die entfernten Displays vertikal zum Nutzer.

Durch *Pointer Warping* werden die perspektivischen Unterschiede, die der Nutzer aufgrund dieser unterschiedlichen Orientierungen wahrnimmt, ausgeglichen. Der Mauszeiger verhält sich dann aus Sicht des Nutzers perspektivisch korrekt. Springt er über eine Bildschirmgrenze hinweg, erscheint er an der Stelle, die aus Sicht des Nutzers direkt benachbart ist.

In der Studie wurde zwar keine Dragging-Geste genutzt, es wurden jedoch die gezogenen Pfade des Mauszeigers untersucht. Diese entsprechen den Pfaden einer Dragging-Geste, weswegen die Ergebnisse für das Verständnis der Beeinflussung von Dragging-Interaktionen durchaus relevant sind. Die Ergebnisse zeigen, dass durch *Pointer Warping* eine signifikante Verbesserung der zielgerichteten Interaktionsgeschwindigkeit von bis zu 30% möglich ist. Außerdem bevorzugen die Nutzer die Technik im Vergleich zu einem konventionellen Mausverhalten, das eine rechnerinterne Displaykonfiguration für Mausbewegungen nutzt.

Auch wenn der Curve auf beiden Displaybereichen dieselbe Auflösung nutzt und einen nahtlosen Übergang zwischen den beiden Bereichen bietet, sind die Ergebnisse der Studie zum *Pointer Warping* relevant. Sie zeigen, dass Interaktionen, die zwischen verschiedenen Displays durchgeführt werden, besser funktionieren, wenn die Wahrnehmung des Nutzers berücksichtigt wird. Gerade im gebogenen Displaybereich ist die indirekte Eingabe mit einem Mauszeiger von Bedeutung, da sich dessen Bewegungsebene dort kontinuierlich verändert.

Einen ersten Einblick in die Effekte einer nahtlos gebogenen Displayverbindung zwischen vertikal und horizontal orientierten Displaybereichen auf direkte Dragging-Gesten bietet eine Studie am BendDesk (Weiss u. a., 2010b). In dieser Studie wurde gezeigt, dass Nutzer dazu tendieren den Dragging-Pfad durch die gebogene Displayverbindung zu minimieren. Statt die Verbindung auf direktem Weg zu durchqueren weichen die meisten Nutzer von diesem kürzesten Pfad ab. Sie versuchen die Displaykurve möglichst senkrecht zu passieren und nehmen dafür auch längere Dragging-Pfade in Kauf. In der anschließenden Befragung gaben die Nutzer außerdem an, dass sie die Kurve als Hindernis wahrgenommen haben.

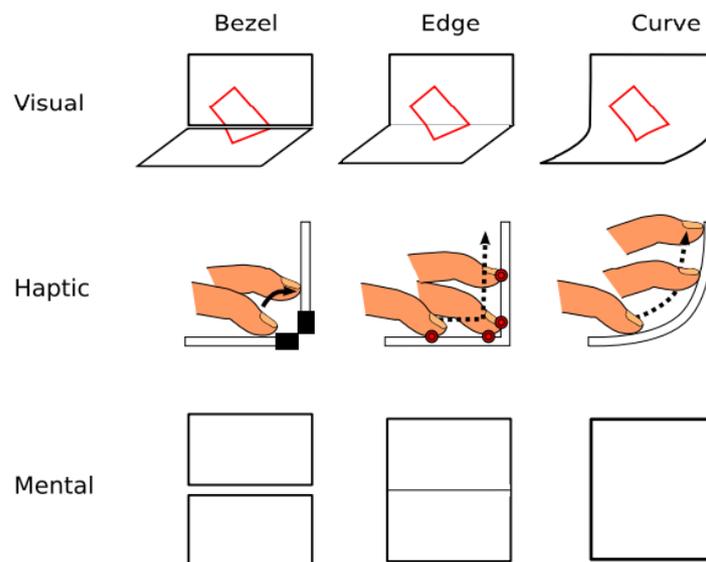


Abbildung 4.5: Die Displayverbindung beim Curve wurde so gestaltet, dass der Nutzer eine möglichst nahtlose und unterbrechungsfreie direkte Interaktion (rechts) im Vergleich zu bisherigen Displaykombinationen (links) ausführen kann (Wimmer u. a., 2010).

Sowohl die vorgestellten Untersuchungen auf großen interaktiven Displays als auch die Studien zur indirekten Eingabe in Multi-Display-Umgebungen sind also für diese Arbeit relevant. Zum einen handelt es sich beim Curve um ein großes interaktives Display und zum anderen bietet er dem Nutzer unterschiedlich orientierte Displaybereiche, die direkt miteinander verbunden sind. Die Studie zum Dragging durch die gebogene Displayverbindung am BendDesk (Weiss u. a., 2010b) hat außerdem gezeigt, dass die Nutzer spezielle Strategien beim Durchqueren einer solchen Verbindung entwickeln und die Displaykurve bei einem Neigungswinkel von 90° der Vertikalen sogar als Hindernis wahrnehmen. Aufgrund all dieser Untersuchungen muss also davon ausgegangen werden, dass die Form des Curve einen Einfluss auf direkte und indirekte Dragging-Gesten hat, obwohl die Displayverbindung beim Entwurf und Bau des Curve (siehe Kapitel 3) hinsichtlich einer direkten Interaktion optimiert wurde (siehe Abbildung 4.5).

Flicking

Eine weitere, vor allem bei Touch-Interfaces verbreitete, Interaktionsgeste ist das sogenannte Flicking (*engl., to flick: schnalzen, schlenzen*). Beim Flicking werden digitale Objekte durch eine schnelle Dragging-Geste in eine bestimmte Richtung bewegt und während der Bewegung losgelassen. Die Objekte rutschen daraufhin in die vorgegebene Richtung weiter. Aufgrund einer simulierten Reibung bleiben sie nach einer kurzen Zeit liegen. Flicking stellt dadurch eine Möglichkeit dar einzelne Objekte schnell und an ansonsten unerreichbare Orte auf einem großen Display zu verschieben (Reetz u. a., 2006). Dabei beeinflusst nicht nur die Art des Eingabegeräts sondern auch die Richtung des Flickings die Genauigkeit mit der ein entferntes Ziel getroffen wird (Moyle u. Cockburn, 2002). Während bei der indirekten Eingabe mit einer Maus auf einem konventionellen Display links und rechts als Flicking-Richtungen bevorzugt werden, tendieren die Nutzer bei der direkten Interaktion mit einem Stift auf einem horizontalen Display die Richtungen vor und zurück. Die Ergebnisse hängen vor allem mit der unterschiedlichen Nutzung der Gelenke im Arm und der Hand bei den Interaktionsarten zusammen.

Da bereits gezeigt wurde, dass die Art der Eingabe und im Zusammenspiel damit auch die Art der Displayorientierung einen Einfluss auf Flicking hat, ist es naheliegend, dass auch ein gebogenes Display einen messbaren Einfluss hat. In diesem Zusammenhang hat eine Studie am BendDesk (Voelker u. a., 2012) den Einfluss eines gebogenen Displays auf die Genauigkeit von Flicking-Gesten untersucht. Die Studienteilnehmer mussten dazu während der Studie digitale Objekte von der horizontalen in einen vorgegebenen Zielbereich auf dem vertikalen Displaybereich flicken. Gemessen wurden sowohl die Abweichung von der Zielposition als auch die Abweichung von der direkten Verbindung von Start und Ziel.

Die Studie zeigt, dass es eine Abweichungen von der Ideallinie zwischen Start und Ziel gibt. Sie wird größer je näher der Startpunkt des Flickings an der Displaykurve liegt. Die Teilnehmer zielten generell immer zu niedrig, das Objekt kam also unterhalb des Zielbereichs zum Liegen. Dieser Effekt vergrößerte sich je flacher der Durchquerungswinkel die Kurve durchlief. Basierend auf ihren Messungen stellen die Autoren ein erstes mathematisches Modell auf, das Fehler beim Flicking vorhersagt, die durch die Displaykurve des BendDesks verursacht werden. Dies erlaubt eine automatische Korrektur von Fehlern bereits während der eigentlichen Nutzerinteraktion.

Basierend auf dieser Studie (Voelker u. a., 2012) wird davon ausgegangen, dass auch die Displayform des Curve einen Einfluss auf Flicking-Gesten hat. Da die Bauform der beiden Displays jedoch sehr ähnlich ist, dürfte auch der Einfluss der Kurve beim Curve dem des BendDesks ähneln. Zur exakten Bestimmung der entsprechenden Fehlerwerte und der Anpassung der mathematischen Fehlerformel für den Curve müssten jedoch vergleichbare Studien am Curve selbst durchgeführt werden. Da Flicking-Gesten im Rahmen dieser Arbeit jedoch in keiner der umgesetzten Visualisierungen oder Interfaces eine Rolle spielen, wurde darauf verzichtet diese Werte exakt zu bestimmen. Für weitere Entwicklungen, die Flicking am Curve effektiv nutzen wollen, sollten diese Werte jedoch ermittelt werden.

4.2 Pointing

Eine der grundlegenden Formen der Interaktion mit einer grafischen Benutzeroberfläche ist das Auswählen von digitalen Inhalten (Pointing) (MacKenzie u. a., 1991). Daher ist es wichtig zu verstehen, ob und wie die gebogene Displayfläche des Curve Pointing beeinflusst. Aus diesem Grund wurden zwei Studien³ zu Pointing mit den Eingabearten Maus und Touch durchgeführt. Ziel der Studien war, herauszufinden inwieweit die unterschiedlich orientierten Displaybereiche Pointing Interaktionen beeinflussen. Darüber hinaus wird auch eine erste Aussage über die Nutzbarkeit der unterschiedlichen Displaybereiche für einfache Pointing-Interaktionen getroffen.

In diesem Abschnitt wird zuerst definiert wie Pointing im Rahmen der beiden Studien verstanden und genutzt wurde. Anschließend werden die beiden Studien getrennt nach der Art der Eingabe vorgestellt und ihre Ergebnisse präsentiert. Die genaue Diskussion und Interpretation der Ergebnisse findet abschließend im Abschnitt 4.4 statt.

Pointing Pointing ist generell unabhängig von der Art der Eingabe (Foley u. a., 1984) und daher sowohl per Maus als auch per Touch am Curve durchführbar. Zwar unterscheiden sich die jeweiligen Zustände der Eingabe je nach Art während der Interaktion (Buxton, 1990), doch ist die grundlegende Vorgehensweise in allen Fällen ähnlich:

1. Der Nutzer muss wissen wo sich das Zielobjekt befindet.
2. Er muss das Eingabemedium (Mauszeiger, Finger) zum ungefähren Zielbereich bewegen.
3. Anschließend erfolgt das genaue Anvisieren des Ziels.
4. Der letzte Schritt besteht aus der Auswahl (Mausklick, Touch) des Zielobjekts.

Dieser Pointing-Vorgang mit abschließender Selektion eines Zielobjekts wurde in seinen Grundzügen bereits 1954 (Fitts, 1954) genauer untersucht (siehe Abbildung 4.2). Die aus dieser Studie hervorgehende Gesetzmäßigkeit (Fitts' Law) erlaubt mit Hilfe einiger Parameter, wie Zielgröße, Entfernung zum Ziel und Eingabegerät, die Dauer eines Pointingvorgangs vorherzusagen (Soukoreff u. MacKenzie, 2004).

Doch im Fall des Curve gibt es Besonderheiten, die eine Untersuchung von Pointing zusätzlich erforderlich machen. Im Gegensatz zum ursprünglichen Experiment von Fitts und weiteren Folgearbeiten ist die Displayfläche gebogenen. Bewiesenermaßen führen gebogene Oberflächen bei Touch-Interaktion zu einer variierenden Genauigkeit der Eingabe (Roudaut u. a., 2011). Wichtiger ist jedoch noch, dass die direkte Strecke zwischen Punkten auf

³ Der Inhalt dieses Abschnitts basiert auf einer publizierten Arbeit (Hennecke u. a., 2013a). Die Autoren der Veröffentlichung sind Fabian Hennecke, Alexander De Luca, Ngo Dieu Huong Nguyen, Sebastian Boring und Andreas Butz. Die zugrunde liegenden Arbeiten wurden von Ngo Dieu Huong Nguyen im Rahmen ihrer Bachelorarbeit (Nguyen, 2012) und eines Einzelpraktikums, beides betreut von Fabian Hennecke, umgesetzt.

dem horizontalen und dem vertikalen Displaybereich aufgrund der Displayform stark variiert (siehe Abbildung 4.6).

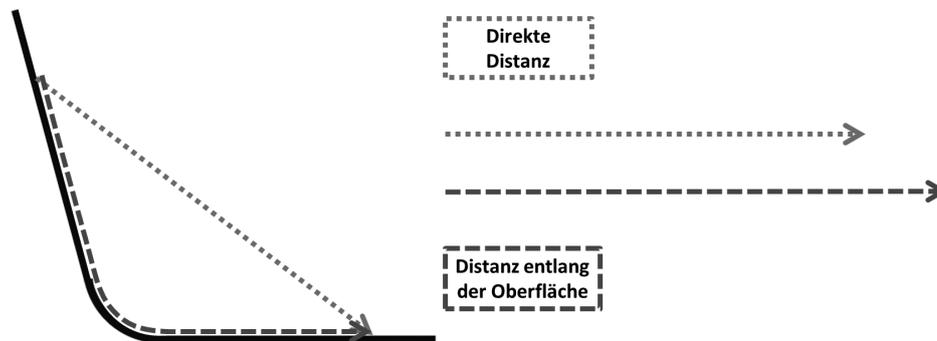


Abbildung 4.6: Die, im Vergleich zum ursprünglichen Experiment von Fitts verkürzte, direkte Distanz zwischen Start und Ziel beim Curve könnte die Interaktion per Touch im Vergleich zur Maus positiv beeinflussen.

Diese Veränderung der Entfernung in Abhängigkeit vom Eingabegeräte zum Ziel ist bei Fitts' Law nicht vorgesehen. Doch auch das ursprüngliche Experiment beinhaltet einen ähnlichen Effekt in umgekehrter Richtung ohne ihn explizit zu erwähnen oder zu berücksichtigen. Die Studienteilnehmer haben den Eingabestift während des Experiments nicht entlang der Oberfläche bewegt sondern durch die Luft. Auf diese Weise war die Wegstrecke, die während des Pointings zurückgelegt wurde, länger als der direkt Weg entlang der Displayoberfläche. Diese Entfernung entlang der Displayoberfläche wurde jedoch für die Berechnung herangezogen. Es ist nicht klar, ob und wie stark sich diese Verkürzung der Entfernung auf Pointingvorgänge und deren Vorhersagbarkeit auswirkt.

4.2.1 Evaluierung

Die Untersuchung von Pointing am Curve wurde in zwei aufeinanderfolgenden Studien durchgeführt. Die erste Studie untersucht den Einfluss auf Touch-Interaktion (Touch-Studie), während die zweite Studie eine Maus als Eingabemedium (Pointer-Studie) untersucht. Die Ergebnisse beider Studien werden an dieser Stelle gemeinsam vorgestellt und anhand gemeinsamer Forschungsfragen besprochen. Darüber hinaus werden weiterführende Erkenntnisse und Beobachtungen während der Studien gemeinsam mit den Antworten auf diese Fragen behandelt.

Frage 1 Hat die Position des Ziels auf dem Curve einen Einfluss auf die Selektion in Bezug auf die Geschwindigkeit und die Genauigkeit?

Frage 2 Beeinflusst die Position des Ziels die subjektive Wahrnehmung der Selektionsgeschwindigkeit und -genauigkeit?

Frage 3 Kann die benötigte Selektionszeit anhand der Zielposition und -größe trotz der Displaybiegung vorhergesagt werden (Fitts' Law)?

Ziel der beiden Studien war jedoch kein direkter Vergleich der beiden Eingabemodalitäten. Hier hat eine Studie (Forlines u. a., 2007) bereits gezeigt, dass Touch-Eingabe schneller ist als die indirekte Eingabe per Maus. Da sich die Wegstrecke für Touch beim Curve im Vergleich zur Mauseingabe (siehe Abbildung 4.6) auf einem planaren Tisch zum Teil deutlich verkürzt, ist nicht davon auszugehen, dass sich an diesem Verhältnis zwischen Touch und Maus etwas ändert.

Technischer Aufbau Beide Studien wurden am Curve durchgeführt. Während bei der Touch-Studie aufgrund des in Kapitel 3 beschriebenen Aufbaus eine Tracking-Genauigkeit von 14 dpi verfügbar war, wurde für die Pointer-Studie eine optische Laser-Maus mit einer Auflösung von 800 dpi und den standardmäßigen Windows 7 Mauseigenschaften verwendet. Während der Touch-Studie waren die Teilnehmer außerdem mit einem kleinen retroreflektierenden Marker (Gewicht: 4 g) an ihrem Eingabefinger ausgestattet. Während der Studie hielt eine zusätzliche Kamera, die seitlich vom Curve angebracht war, die Bewegungen des Markers fest.

Studiendesign Um die beschriebenen Probleme mit unterschiedlichen Zieleintrittswinkeln bei zwei-dimensionalen Fitts' Law Experimenten (MacKenzie u. Buxton, 1992) zu vermeiden, wurden in beiden Studien runde Zielbereiche genutzt. Außerdem wurde so ein möglicher Einfluss unterschiedlicher Durchquerungswinkel durch die Displaybiegung vermieden. Die Start- und Zielbereiche befanden sich entlang von sechs ausschließlich vertikal zur Biegung verlaufenden Achsen (a1 bis a6) (siehe Abbildung 4.7). Die Achsen hatten dabei jeweils einen Abstand von 11,5 cm (269 px) zueinander und waren horizontal gleichmäßig über das Display verteilt. Durch vier verschiedene Abstände, gemessen entlang der Displayoberfläche, (d1: 17,2 cm (402 px); d2: 34,6 cm (810 px); d3: 51,8 cm (1212 px); d4: 69,1 cm (1616 px)) zwischen Start und Ziel wurde die gesamte Displayfläche in beiden Studien untersucht. Dabei wird die Entfernung entlang der Displayfläche und nicht die direkte Distanz für Berechnungen herangezogen. Somit wird die verkürzte zurückzulegende Strecke in der Touch-Studie als spezielle Eigenschaft der direkten Eingabe auf dem Curve berücksichtigt. Zur Beantwortung von *Frage 3* wurde außerdem die Größe des Zielbereichs in vier verschiedenen Größen (s1: 1,7 cm (40 px); s2: 2,3 cm (54 px); s3: 3,0 cm (70 px); s4: 3,9 cm (91 px)) variiert.

Die Reihenfolge der Achsen wurde während eines Studiendurchgangs mit einem Latin Square Design ausbalanciert. Alle weiteren Faktoren der Studien wurden für jeden Teilnehmer randomisiert. Insgesamt ergaben sich somit 192 Aufgaben ($6 \times 4 \times 4 \times 2$) pro Teilnehmer.

Teilnehmer An jeder Studie haben 30 Nutzer teilgenommen, wobei keiner der Teilnehmer an beiden Studien teilgenommen hat. In beiden Studien waren je acht Teilnehmer weiblich und je 22 Teilnehmer Rechtshänder. Während die Größe der Teilnehmer in der Touch-Studie zwischen 159 cm - 194 cm variierte, waren die Teilnehmer der Pointer-Studie zwischen 155 cm und 194 cm groß.

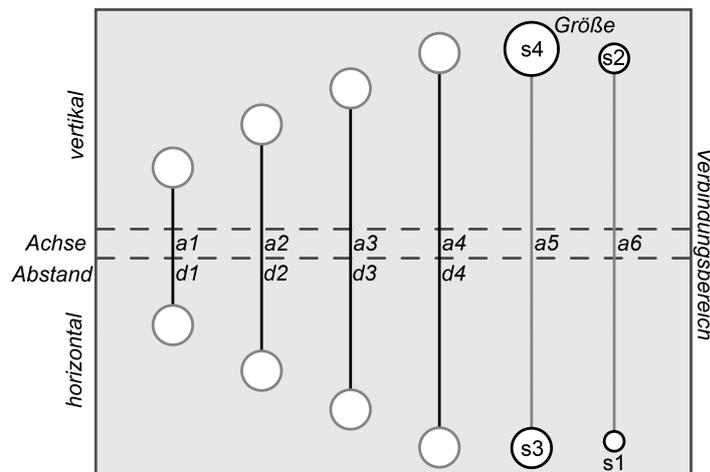


Abbildung 4.7: Die Start- und Zielpositionen wurden entlang sechs verschiedener Achsen (a1 - a6) und mit vier unterschiedlichen Abständen (d1 - d4) platziert. Zusammen mit den vier verschiedenen Zielgrößen (s1 - s4) ergeben sich somit 96 Aufgaben pro Richtung (auf- und abwärts) und 192 Aufgaben insgesamt (in Anlehnung an Hennecke u. a., 2013a).

Aufgabe und Ablauf Die Teilnehmer saßen während der Studie mittig vor dem Curve und durften die bevorzugte Eingabehand frei wählen. Zu Beginn eines jeden Durchgangs machten sie sich außerdem in einer Trainingsphase mit 20 zufälligen Pointing-Aufgaben mit dem System vertraut. Durch den retroreflektierenden Marker wurden während der Touch-Studie außerdem Informationen darüber gesammelt, welchen Weg der Finger des Nutzers zwischen Start und Ziel durch die Luft zurücklegt.

Die Teilnehmer mussten zuerst den Startbereich selektieren und anschließend schnellstmöglich den Zielbereich durch einen Klick oder eine Berührung auswählen. Für beide Eingabemodalitäten wurden Start- und Zielbereich gleichzeitig eingeblendet, um die Dauer der Suche nach dem Zielbereich aus den Messungen heraus zu halten. Während der Studie wurde keine Rückmeldung über die Geschwindigkeit oder die Genauigkeit der Interaktion gegeben. Nach dem vollständigen Absolvieren aller Durchläufe beantwortete jeder Teilnehmer einen Fragebogen.

Messungen Während der Studie wurden sowohl quantitative Daten gemessen als auch qualitatives Feedback der Teilnehmer über einen Fragebogen erfasst. Die quantitativen Messdaten unterteilen sich in drei verschiedene Bereiche:

Dauer ist der Zeitraum zwischen dem Loslassen des Startbereichs (Klick der Maus wird gelöst, Finger verlässt die Oberfläche) und dem ersten Auftreten eines Klick- oder Touch-Events innerhalb des Zielbereichs.

Abweichung ist der direkte Abstand⁴ zwischen der Mitte des runden Zielbereichs und der Mitte der ersten erfolgreichen Ziel-Selektion.

Bewegungspfade wurden in beiden Studien erfasst. Sowohl in der Touch-Studie mit Hilfe des retroreflektierenden Markers als auch in der Pointer-Studie wurden diese in Form zwei-dimensionaler Pfade⁵ gespeichert.

Im Abschlussfragebogen wurden die Teilnehmer zu ihrer Selbstwahrnehmung in Bezug auf ihre Pointing-Performance befragt. Zusätzlich wurde nach einer eventuell auftretenden Erschöpfung gefragt, die gerade in der Touch-Studie einen Einfluss auf die Entwicklung der Interaktionszeiten haben könnte. Die Antworten der Teilnehmer wurden im Fragebogen mit Hilfe von 5-stufigen Likert-Skalen erfasst.

Analyse Auftretende Fehler beim Auswählen des Zielbereichs, wie beispielsweise das Verfehlen des Ziels, wurden zwar registriert und gespeichert, es traten jedoch zu wenige auf um einen Einfluss auf die Ergebnisse zu haben. Aufgrund der geringen Fehleranzahl wurden auch keine weiterführenden Untersuchungen dieser Daten durchgeführt.

Die Ergebnisse der Pointer-Studie beziehen sich nur auf die Daten der jeweils ersten Durchläufe aller Studienteilnehmer, da die Datensätze der zweiten Durchgänge die Ergebnisse nicht beeinflusst haben. Die Datensätze von zwei Teilnehmern wurden wegen fehlerhaften Log-Daten entfernt.

Falls nicht anders angegeben basieren die hier vorgestellten Ergebnisse auf einer Varianzanalyse mit Messwiederholungen (*repeated measures analysis of variance, ANOVA*): *Achse* × *Abstand* × *Größe* × *Richtung* ($6 \times 4 \times 4 \times 2$). War die Sphärizität verletzt, kam eine Greenhouse-Geißer Korrektur zum Einsatz.

Die Fragebögen beider Studien basierten auf fünf-stufigen Likert-Skalen, die von 1 ('Ich stimme nicht zu') bis 5 ('Ich stimme zu') reichten. Für die Auswertung wurden diese Bewertungen in drei Gruppen eingeteilt: *Ich stimme nicht zu* (1 & 2), *Neutral* (3) und *Ich stimme zu* (4 & 5).

4.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der beiden Studien zum Pointing am Curve werden im folgenden Abschnitt in verschiedene Kategorien eingeteilt und nach Eingabeart getrennt voneinander betrachtet.

Geschwindigkeit enthält die Ergebnisse hinsichtlich der erzielten Pointing-Geschwindigkeit.

Offset beschreibt die direkte Entfernung des Selektionspunkts vom Zentrum des Zielbereichs.

⁴ Da die Aufgabenstellung lautete „so schnell wie möglich“ zu selektieren, hat dieser Wert jedoch nur eine begrenzte Aussagekraft.

⁵ Beim Verfolgen des Markers von der Seite wurden keine Tiefeninformationen gespeichert.

Nutzerbewertung fasst die wichtigsten Ergebnisse des Abschlussfragebogens zusammen.

Weitere Beobachtungen enthält weitere Erkenntnisse der beiden Studien.

Basierend auf den Ergebnissen wird am Ende eine Gesamtbeurteilung des Einflusses der gebogenen Displayform auf Pointing-Aufgaben abgegeben. Daraus resultierende Rückschlüsse und die Beantwortung von *Forschungsfrage 1* werden gemeinsam mit weiteren Ergebnissen im Abschnitt 4.4 präsentiert.

Geschwindigkeit

Touch Wie auch auf planaren Oberflächen hat die *Größe* des Ziels einen signifikanten Einfluss auf die Pointing-Geschwindigkeit bei Touch-Eingabe ($F_{3, 87} = 41.08, p < .001$) - kleinere Ziele wurden langsamer selektiert. Der *Abstand* zwischen Start und Ziel hat ebenfalls einen signifikanten Effekt ($F_{2.281, 66.146} = 114.86, p < .001$) wobei die Selektion entfernter Ziele länger dauert.

Die *Achsen*, auf denen die Start- und Zielbereiche angeordnet waren, haben ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Geschwindigkeit ($F_{5, 145} = 2.31, p < .05$). Dabei waren die Teilnehmer auf den Achsen a4 ($m = 817$ ms) 351 ms und a5 ($m = 803$ ms; $sd = 280$ ms) am schnellsten und auf a1 ($m = 851$ ms; $sd = 370$ ms) am langsamsten (siehe Abbildung 4.8). Zusätzlich hat die *Richtung* der Interaktion einen signifikanten Effekt. Selektionen mit dem Ziel auf der horizontalen Fläche waren etwa 4% (36 ms) schneller als bei Zielen auf der vertikalen Fläche.

Zusätzlich zu diesen Effekten gibt es auch Interaktionseffekte zwischen den einzelnen Parametern. Sowohl *Abstand* \times *Größe* ($F_{6.244, 181.08} = 2.18, p < 0.5$), *Größe* \times *Richtung* ($F_{3, 87} = 2.855, p < 0.5$), *Abstand* \times *Richtung* ($F_{2.14, 62.072} = 7.766, p < 0.001$) als auch *Achse* \times *Abstand* \times *Größe* ($F_{12.926, 374.851} = 1.935, p < 0.001$) zeigen Interaktionseffekte.

Pointer Wie schon bei der Eingabe per Touch haben auch bei der indirekten Eingabe mit der Maus die Faktoren *Größe* ($F_{3, 81} = 225.564, p < .001$) und *Abstand* ($F_{3, 81} = 328.514, p < .001$) einen signifikanten Einfluss auf die Selektionsgeschwindigkeit. Interessanterweise hat auch die *Achse* einen signifikanten Einfluss ($F_{3.252, 87.796} = 10.723, p < .05$) (siehe Abbildung 4.8). Wie schon bei Touch sind auch bei der indirekten Eingabe die *Achsen* a4 ($m = 1211$ ms; $sd = 345$ ms) und a5 ($m = 1215$ ms; $sd = 363$ ms) am schnellsten und die Achse a1 am langsamsten ($m = 1338$ ms; $sd = 400$ ms). Post-hoc Tests zeigen außerdem einen signifikanten Unterschied zwischen a1 und a3 ($m = 1220$ ms; $sd = 327$ ms).

Im Gegensatz zur Touch-Studie zeigen die Messwerte der indirekten Eingabe allerdings keinen signifikanten Einfluss der *Richtung*. Ebenso zeigen sich keinerlei Interaktionseffekte zwischen den Parametern.

Vorhersagbarkeit Die Geschwindigkeitsdaten beider Studien wurden auch auf eine allgemeine Vorhersagbarkeit hin untersucht. Dazu wurden zunächst die Schwierigkeit (ID, index of difficulty) und der Durchsatz (TP, throughput) bestimmt. Die Schwierigkeit beider Experimente lag zwischen 2,4 und 5,4 bits und somit in einem Bereich, der für eine hohe Aussagekraft der Vorhersage empfohlen ist (Soukoreff u. MacKenzie, 2004). Als Durchsatz

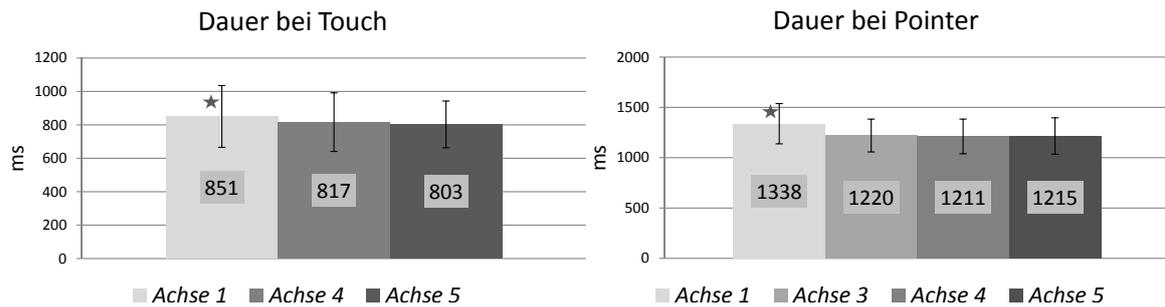


Abbildung 4.8: Die Achsen haben sowohl bei direkter als auch bei indirekter Eingabe einen Effekt auf die Pointing-Geschwindigkeit.

ergeben sich anhand der Studiendaten für Touch 5,62 bps (bits per second) und für Pointer 3,57 bps. Zwar zeigt sich damit bereits, dass Touch im Vergleich zur Eingabe per Maus schneller ist, doch erlauben diese Werte noch keine allgemeingültige Aussage woran dies genau liegt.

Basierend auf den gemessenen Zeiten der Teilnehmer pro Schwierigkeitsgrad kann außerdem auch eine Formel zur Vorhersage der Interaktionsgeschwindigkeit aufgestellt werden. Mit Hilfe von einer Regressionsgeraden pro Eingabeart, die auf den gemessenen Zeiten und den jeweiligen Schwierigkeitsgraden beruhen, wurden für Touch und Pointer jeweils Formeln für die zu erwartende Interaktionszeit (MT, movement time) aufgestellt:

$$MT_{\text{Touch}} = 192.96 + 129.46 \times ID \quad (r_2 = 0.932)$$

$$MT_{\text{Pointer}} = 199.08 + 230.04 \times ID \quad (r_2 = 0.985)$$

Die Bestimmtheitsmaße für Touch ($r_2=0.932$) und Pointer ($r_2=0.985$) zeigen, dass eine gute Vorhersagbarkeit anhand der beiden Formeln gegeben ist. Somit erlauben diese Formeln eine verlässliche, frühzeitige Bewertung von Interaktionen bereits während der Entwicklung neuer grafischer Benutzerschnittstellen am Curve.

Offset

Der Offset einer Selektion ist im Rahmen der beiden Studien als euklidische Distanz in Pixeln (px) zwischen der Mitte des Ziels und der Mitte des Selektionspunktes definiert. Bei der Betrachtung der Ergebnisse muss jedoch beachtet werden, dass die Studienteilnehmer explizit um die schnellstmögliche Interaktion gebeten wurden. Ihr Fokus lag somit nicht auf einer möglichst präzisen Auswahl. Daher haben die Ergebnisse an dieser Stelle nur eine begrenzte Aussagekraft über die Präzision in den unterschiedlichen Displaybereichen. Dennoch können sie zumindest erste Anhaltspunkte dafür liefern in welchen Bereichen große Abweichungen vom Ziel am wenigstens wahrscheinlich sind.

Um die Auswertung des Offsets so aussagekräftig wie möglich zu gestalten, werden an dieser Stelle zwei unterschiedliche Datenmengen betrachtet. Neben der Auswertung aller Da-

ten werden zusätzlich die Daten der kleinsten Ziele noch einmal separat ausgewertet. Durch diese zusätzliche Auswertung fließt die vermutlich größere Abweichung bei größeren Ziel-durchmessern nicht in die Auswertung ein.

Touch Die Analyse *aller* Daten der Touch-Studie offenbart einen Effekt der *Achsen* ($F_{5, 145} = 5.619, p < .001$). Ein Post-hoc Test zeigt signifikante Unterschiede zwischen a3 ($m = 15,1$ px, 6,4 mm; $sd = 8,4$ px, 3,5 mm) und a5 ($m = 13,5$ px, 5,7 mm; $sd = 7,8$ px, 3,2 mm) und zwischen a3 und a6 ($m = 14,0$ px, 5,9 mm; $sd = 8,2$ px, 3,4 mm) (siehe Abbildung 4.9). Zusätzlich zeigt sich ein signifikanter Interaktionseffekt *Richtung* \times *Abstand* ($F_{3, 87} = 35.992, p < .001$). Die Analyse der Offset-Daten für die *kleinsten* Ziele zeigt

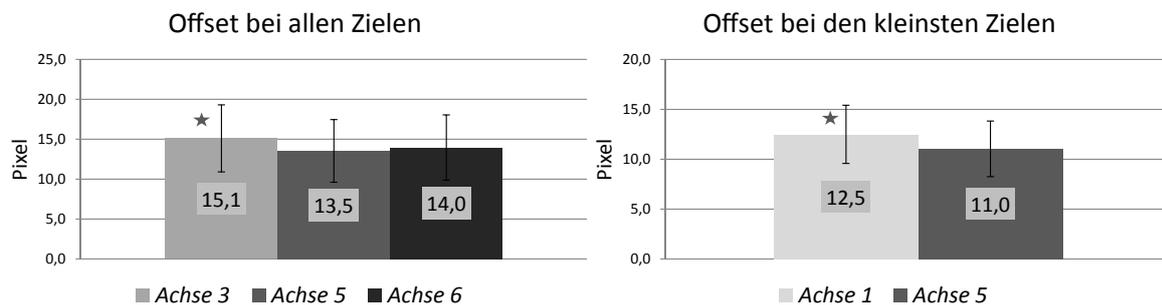


Abbildung 4.9: In der Touch-Studie wurden bei der Auswertung aller Zielgrößen signifikante Unterschiede zwischen Achse 3 und Achse 5, sowie zwischen Achse 3 und Achse 6 identifiziert.

ebenfalls einen signifikanten Effekt der *Achsen* ($F_{5, 145} = 3.741, p < .05$). Im Vergleich zur Analyse aller Daten fällt dieser allerdings weniger stark aus. Ein Post-hoc Test offenbart hier einen signifikanten Unterschied zwischen a1 ($m = 12,5$ px, 5,3 mm; $sd = 5,8$ px, 2,4 mm) und a5 ($m = 11,0$ px, 4,6 mm; $sd = 5,6$ px, 2,4 mm) (siehe Abbildung 4.9). Es existiert außerdem eine Interaktion *Richtung* \times *Abstand* ($F_{3, 87} = 35.992, p < .001$).

Im Gegensatz zur Betrachtung aller Daten zeigen die Daten der kleinsten Ziele auch einen signifikanten Effekt des *Abstands* ($F_{3, 87} = 11.283, p < .001$). Ebenfalls vorhanden sind die Interaktionen *Richtung* \times *Abstand* ($F_{3, 87} = 19.667, p < .001$), *Achse* \times *Abstand* ($F_{15, 435} = 2.597, p < .001$) und *Achse* \times *Richtung* ($F_{5, 145} = 2.49, p < .05$). Dabei zeigt sich durch einen Post-hoc Test, dass der Pointing-Offset im unteren Teil des vertikalen Displaybereichs signifikant geringer ausfiel als auf dem horizontalen Bereich nahe der Displaykurve ($p < .05$).

Pointer In der Pointer-Studie hat lediglich die *Größe* beim Betrachten *aller* Daten einen wenig überraschenden signifikanten Einfluss auf den Pointing-Offset ($F_{3, 81} = 499.663, p < .001$). Der Offset ist bei den kleinsten Zielen am geringsten ($m = 12,3$ px, 5,2 mm; $sd = 5,7$ px, 2,4 mm) und fällt bei den größten Zielen am höchsten aus ($m = 24,4$ px, 10,3 mm; $sd = 11,4$ px, 4,8 mm). Ansonsten zeigt keiner der anderen Parameter einen signifikanten Effekt auf den Offset - weder für *alle* Daten noch für die Daten der *kleinsten* Ziele.

Nutzerbewertung

Im Rahmen der Nutzerbewertung wurden die persönlichen Einschätzungen zur Interaktionsgeschwindigkeit, dem wahrgenommenen Offset und zu einer möglichen Erschöpfung aufgrund der Studiendauer (etwa 20 Minuten) abgefragt.

Geschwindigkeit Die Bewertung der Interaktionsgeschwindigkeit durch die Studienteilnehmer deckt sich mit den gemessenen Interaktionszeiten. Sowohl für Touch (93%) als auch für Pointer (96%) gab ein großer Teil der Befragten an, dass sie in der Displaymitte am schnellsten interagierten (siehe Abbildung 4.10). In Bezug auf die äußeren Achsen stimmten dieser Aussage nur 30% für Touch und 47% für Pointer zu.

Auf die Frage, ob sie die Aufgaben schnell bearbeiten konnten, ist der Unterschied zwischen den aufwärts und den abwärts verlaufenden Interaktionen bei beiden Eingaben eher gering (Touch: aufwärts: 73%, abwärts: 80%; Pointer: aufwärts: 77%, abwärts: 67%).

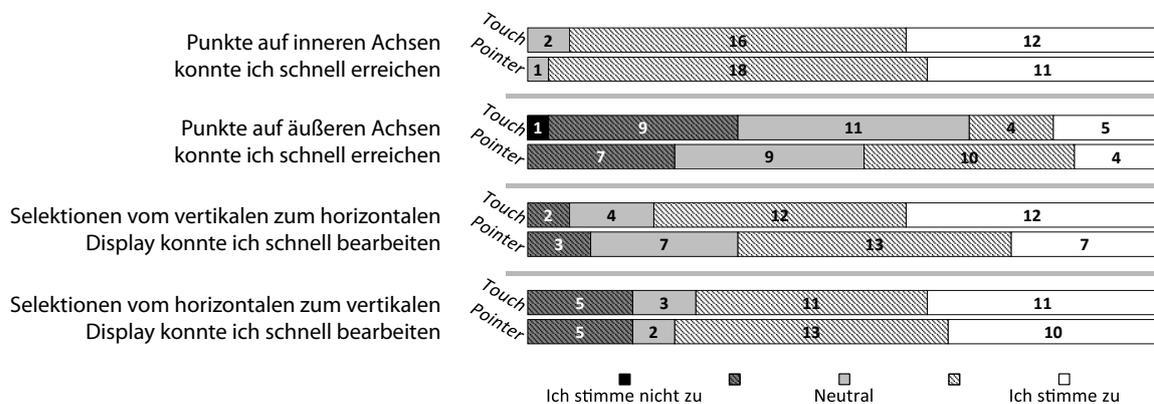


Abbildung 4.10: Die Antworten der Teilnehmer bezüglich der Geschwindigkeit bei der Touch-Eingabe decken sich größtenteils mit den objektiven Messungen.

Offset Bei der Bewertung des eigenen Offsets ergeben sich im Vergleich zu den gemessenen Daten Abweichungen für beide Eingabearten. Von den Teilnehmern der Touch-Studie gaben 86% an, dass die Genauigkeit auf der horizontalen Displayfläche nahe der Verbindung gut sei. Für den entsprechenden Displaybereich auf der vertikalen Displayfläche bestätigten dies aber nur 73%. Entgegen der objektiven Daten nehmen die Teilnehmer die Interaktion nahe der Kurve auf der horizontalen Fläche also als genauer wahr.

Bei der indirekten Eingabe fällt die Bewertung sogar genau entgegengesetzt aus. Hier empfanden mehr Teilnehmer die Eingabe auf der horizontalen Flächen nahe der Kurve (93%) als präzise im Vergleich zum entsprechenden vertikalen Displaybereich (80%). Auch wenn die Messwerte keine signifikanten Unterschiede zeigen, nehmen die Nutzer die Interaktion je nach Zielbereich also als unterschiedlich präzise wahr.

Erschöpfung Viele Teilnehmer der Touch-Studie haben angegeben eine Erschöpfung der Schulter (53%) und des Eingabearms (83%) nach der Studie zu spüren. Aufgrund der durchgehenden Bewegung des Eingabearms ist dies wenig verwunderlich. Die Messwerte der

Studie zeigen jedoch keinerlei Einfluss der Erschöpfung auf die Interaktionsgeschwindigkeit oder die Präzision der Eingabe. Eine Erschöpfung des Handgelenks (3%) und des Eingabefingers (27%) wurde nur von einigen Teilnehmern angemerkt.

Erwartungsgemäß fiel die Zahl der Teilnehmer der Pointer-Studie, die von einer Erschöpfung berichteten, geringer aus. Während die Erschöpfung im Arm (33%), der Schulter (17%) und dem Finger (10%) geringer ausfielen als bei der direkten Eingabe, ist bei der Pointer-Eingabe das Handgelenk stärker beansprucht. 40% der Teilnehmer gaben eine Erschöpfung in diesem Bereich an. Doch auch hier zeigen die Ergebnisse keinen Einfluss der Erschöpfung auf die Geschwindigkeit oder die Genauigkeit der Eingabe.

Weitere Beobachtungen

Beim genaueren Betrachten der Bewegungsdaten des Eingabefingers und des Mauszeigers sind in beiden Fällen spezifische Bewegungsmuster zu erkennen (siehe Abbildung 4.11). Bei der Touch-Eingabe fällt auf, dass der erste Teil der Bewegung relativ schnell erfolgt. Erst kurz vor dem eigentlichen Ziel bremst der Nutzer den Finger ab (erkennbar an der Häufigkeit der Messpunkte in Abbildung 4.11 (links)).

Außerdem bewegten viele Nutzer ihren Eingabefinger beim Zielen auf der vertikalen Fläche zunächst etwas zu hoch, bevor das Ziel genauer anvisiert wurde. Interessant ist hierbei, dass dieses Phänomen nur bei aufwärts-gerichteten Touch-Eingaben zu beobachten war und auf dem horizontalen Displaybereich nicht auftrat.

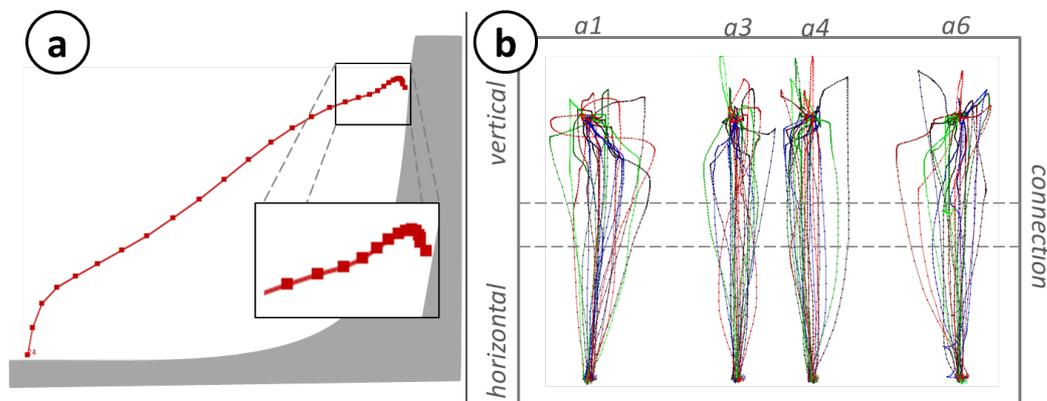


Abbildung 4.11: Die Bewegungspfade einiger Teilnehmer während der Studie: (a) seitliche Ansicht auf einen Bewegungspfad während der Touch-Studie mit häufig beobachtetem „Verfehlen“ eines Ziels auf der vertikalen Displayfläche, (b) Bewegungspfade des Mauszeigers bei aufwärts gerichteten Pointing-Aufgaben.

Die Bewegungspfade des Mauszeigers in der Touch-Studie zeigen, dass die Teilnehmer den Mauszeiger zuerst sehr schnell und relativ ungenau zum Ziel bewegt und anschließend korrigiert haben (‘Overshooting’). Es fällt außerdem auf, dass die Pointer-Bewegungen auf den äußeren Achsen leicht zum Displayzentrum hin geneigt sind. Da die Position der Maus während der Studie jedoch bei allen Achsen gleich war, könnte die Ursache hierfür in einer

veränderten Wahrnehmung der Zeiger-Bewegung auf den äußeren Displaybereichen liegen. Dieser Effekt wurde auch in der Studie zum Einfluss der Displayverbindung auf Dragging-Interaktionen festgestellt (siehe Abschnitt 4.3).

Fazit

Die zu Beginn gestellten Forschungsfragen für beide Studien können basierend auf den Ergebnissen der beiden Studien klar beantwortet werden. Insgesamt zeichnet sich aufgrund der gesammelten Erkenntnisse ein klares Bild über die zu bevorzugenden Interaktionsbereiche für Pointing auf dem Curve (siehe Abbildung 4.12).

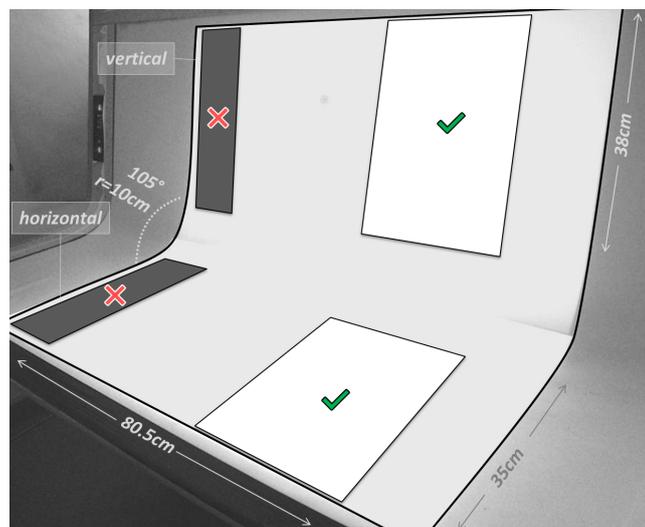


Abbildung 4.12: Die Ergebnisse der vorgestellten Studien zeigen ein eindeutiges Bild: Die Interaktion in den Außenbereichen des Curve ist langsamer und ungenauer als im Zentrum des Displays. Interfaces für ein solches gebogenes Display sollten daher häufig genutzte Elemente besonders in der Displaymitte platzieren (Hennecke u. a., 2013a).

Frage 1 *Hat die Position des Ziels auf dem Curve einen Einfluss auf die Selektion in Bezug auf die Geschwindigkeit und die Genauigkeit?*

Basierend auf den Ergebnissen der beiden Studien kann diese Frage positiv beantwortet werden. Sowohl die indirekte Eingabe als auch die direkte Eingabe beim Pointing werden durch die Position des Ziels hinsichtlich der Interaktionsgeschwindigkeit beeinflusst. Die Interaktion in der Mitte des Displays ist bei beiden Eingabearten schneller als an den seitlichen Rändern des Displays.

Die Pointing-Genauigkeit bei der direkten Interaktion verändert sich je nach Lage des Ziels auf dem Display ebenfalls. Hier scheint die Händigkeit der Nutzer eine Rolle zu spielen. Zwar wurde dieser Faktor nicht direkt untersucht, die Ergebnisse der Studie deuten jedoch in diese Richtung. Dennoch sind hier weiterführende Studien nötig. Die Pointing-Genauigkeit wird aber auch durch die Position der Ziele entlang der vertikalen Achsen beeinflusst. Nahe der Displaykurve werden Ziele genauer ausgewählt, wenn sie sich auf der vertikalen Fläche

befinden. Ziele nahe der Verbindung auf der horizontalen Fläche werden dagegen weniger präzise getroffen.

Frage 2 *Beeinflusst die Position des Ziels die subjektive Wahrnehmung der Selektionsgeschwindigkeit und -genauigkeit?*

Die Ergebnisse beider Studien zeigen einen Einfluss der Position des Zielbereichs auf dem Display auf die wahrgenommene Geschwindigkeit und die Genauigkeit beim Pointing. In beiden Fällen wurde die Interaktion in der horizontalen Mitte des Displays häufiger als schnell beschrieben als auf den Außenseiten. Dies ist besonders bei der indirekten Eingabe interessant, da sich hierbei lediglich der Blickwinkel auf den Zielbereich verändert, nicht aber die Erreichbarkeit des Eingabegeräts.

In Bezug auf die Genauigkeit ergibt sich ein geteiltes Bild zwischen den Eingabearten. Die Wahrnehmung der Interaktionsgenauigkeit für Touch-Interaktion ist den objektiven Ergebnissen genau entgegengesetzt. Die Teilnehmer empfanden die Interaktion nahe der Kurve auf der horizontalen Displayfläche häufiger als genau als auf der vertikalen Fläche. Des Weiteren empfanden mehr Teilnehmer die Pointer-Interaktion auf der horizontalen als auf der vertikalen Displayfläche als präzise, obwohl hier kein objektiver Unterschied gemessen wurde.

Frage 3 *Kann die benötigte Selektionszeit anhand der Zielposition und -größe trotz der Displaybiegung vorhergesagt werden (Fitts' Law)?*

Zwar gibt es bei den gemessenen Zeiten beider Eingabearten signifikante Unterschiede, doch eine allgemeine Vorhersagbarkeit ist dennoch gegeben. Im Abschnitt 4.2.2 werden dazu Formeln basierend auf Fitts' Law sowohl für Pointer- als auch für Touch-Eingabe vorgestellt. Die Bestimmungsmaße der beiden Gleichungen sind so hoch, dass die Vorhersagen eine sehr gute Genauigkeit haben.

Sollte die gegebene Genauigkeit für zukünftige Untersuchungen jedoch nicht ausreichen, können je nach Displaybereich auch noch leicht unterschiedliche Formeln aufgestellt werden. So werden die signifikanten Unterschiede zwischen den Bereichen für eine noch präzisere Vorhersage berücksichtigt.

4.3 Dragging

Neben dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Pointing ist auch das Ziehen und Verschieben eines Objekts (Dragging) eine fundamentale Interaktionstechnik (MacKenzie u. a., 1991). Dragging wird ebenso wie Pointing indirekt mit der Maus oder direkt mit einem Finger auf der Displayoberfläche durchgeführt. Wie im Abschnitt 4.1 gezeigt, ist Dragging auf gewöhnlichen, planaren Oberflächen bereits vielfach untersucht und beschrieben worden. Es wurde auch bereits eine erste Studie zum Dragging durch eine gebogene Displayverbindung durchgeführt (Weiss u. a., 2010b). Diese hat gezeigt, dass Nutzer unbewusst Strategien entwickeln, um den Dragging-Pfad durch die gebogene Displayverbindung so kurz wie möglich zu halten. Dazu wird vom kürzesten Pfad zwischen Start und Ziel abgewichen und der

Durchquerungswinkel durch die Kurve möglichst steil gewählt.

Trotz dieser Ergebnisse ist unklar, ob eine gebogene Displayverbindung zwischen zwei planaren Displaybereichen tatsächlich die optimale Verbindungsart für die Eingabearten Pointer und Touch darstellt. So ist es beispielsweise denkbar, dass die verschiedenen Eingabearten (Pointer, Touch) unterschiedlich gut für bestimmte Displayverbindungen geeignet sind. Dann müssten je nach Verbindung Maßnahmen bei der Interfacegestaltung getroffen werden, um eventuelle Probleme zu berücksichtigen und auszugleichen.

In diesem Abschnitt wird eine Untersuchung der Interaktionsform Dragging am Curve vorgestellt. Dazu erfolgt zuerst die genaue Definition von Dragging, wie es im Rahmen dieser Studie verstanden, implementiert und genutzt wurde. Anschließend wird die eigentliche Studie⁶ zum Einfluss der Displayverbindung am Curve auf Dragging-Interaktionen vorgestellt. Als Vergleich zur gebogenen Displayverbindung des Curve (*Kurve*) werden dafür die Verbindungsarten *Kante* und *Rahmen* eingeführt. Die Ergebnisse der Studie werden abschließend zusammengefasst und diskutiert, so dass sich zusammen mit den Ergebnisse der Pointing-Studie ein Bild der Interaktionsbeeinflussung durch die Displayform des Curve zeichnen lässt.

Dragging Am besten lässt sich Dragging mit Hilfe des Three-State-Models (Buxton, 1990) definieren (siehe Abbildung 4.13). Zwar variieren die genauen Bezeichnungen je nach Eingabegerät, die grundsätzlichen Abläufe sind aber identisch (MacKenzie u. Buxton, 1994). In Anlehnung an diese Beschreibung wurde in der folgenden Studie sowohl für die indirekte

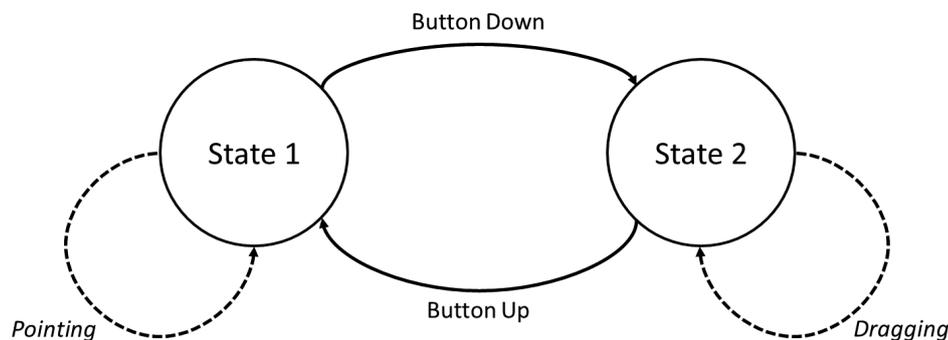


Abbildung 4.13: In beiden Modi kann das Eingabegerät bewegt werden, wobei eine Bewegung in State 2 einer Dragging-Geste entspricht (MacKenzie u. Buxton, 1994).

Eingabe mit der Maus (Pointer) als auch für die direkte Eingabe mit einem Finger (Touch) eine Dragging-Geste mit diesen Schritten umgesetzt:

1. Zu Beginn der Geste wird das Eingabegerät (Mauszeiger, Finger) über das zu verschiebende Objekt bewegt (State 1).

⁶ Der Inhalt dieses Abschnitts basiert auf einer publizierten Arbeit (Hennecke u. a., 2012a). Die Autoren der Veröffentlichung sind Fabian Hennecke, Wolfgang Matzke und Andreas Butz. Die zugrunde liegende Arbeit wurde von Wolfgang Matzke im Rahmen seiner Diplomarbeit (Matzke, 2011), betreut von Fabian Hennecke, umgesetzt.

2. Das Objekt wird durch einen Klick oder direkt mit dem Finger ausgewählt (Übergang State 1 zu State 2).
3. Mit gehaltener Maustaste oder weiterhin berührendem Finger wird das Objekt zum Zielort bewegt (State 2).
4. Dort lässt man die Maustaste los oder hebt den Finger an und legt das Objekt dadurch an der neuen Position ab (State 1).

Im Fall der Verbindungsart *Kante* kann jedoch aufgrund der winkligen Displayverbindung von durchgehenden Touch-Gesten im Verbindungsbereich ausgegangen werden. Im Fall des *Rahmens* sind durchgehende Interaktionen über den Verbindungsbereich hinweg bei der Touch-Eingabe sogar unmöglich. Durch die Unterbrechung der Dragging-Geste verändert sich jedoch die oben genannte Definition anhand des State-Modells (MacKenzie u. Buxton, 1994). Statt einer durchgehenden Bewegung des Zielobjekts im State 2 verlässt der Nutzer an den Verbindungsstellen diesen Status kurzzeitig und betritt wieder State 1. Normalerweise deutet das System dies als das Ende der Dragging-Geste. Im Fall der *Kante* und des *Rahmens* soll das Dragging jedoch nahtlos fortgesetzt werden können. Zu diesem Zweck wurden die Techniken Flicking und Stitching implementiert. Die genaue Beschreibung der Techniken und deren Implementierung erfolgt im Abschnitt „Technischer Aufbau“, in Abschnitt 4.3.1.

4.3.1 Evaluierung

Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Displayverbindungen auf Dragging-Gesten wurde eine Studie mit drei unterschiedlichen Verbindungsarten (*Kurve*, *Kante*, *Rahmen*) durchgeführt (Hennecke u. a., 2012a; Matzke, 2011). Die zentralen Fragestellungen der Studie waren:

Frage 1 Wie stark beeinflusst die Art der Verbindung die Genauigkeit der Eingabe?

Frage 2 Wie stark beeinflusst die Art der Verbindung die Geschwindigkeit der Eingabe?

Frage 3 Wie stark beeinflusst die Art der Verbindung die subjektive Wahrnehmung des Displays und der Eingabe?

Neben diesen Fragen werden in der Auswertung aber auch Beobachtungen beschrieben, die während der Studie gemacht wurden. Die drei verschiedenen Verbindungsarten (*Kurve*, *Kante* und *Rahmen*) sind eng an die Verbindungsarten der ursprünglichen Überlegungen während des Design des Curve (siehe Abbildung 4.14) angelehnt. Insgesamt wird in diesem Abschnitt also einer der Grundgedanken beim Entwurf des Curve überprüft - eine nahtlose gebogene Verbindung unterstützt die (direkte) Interaktion zwischen den Displaybereichen. Um die Ergebnisse der Studie auch für grafische Benutzerschnittstellen verwerten zu können, die die Maus als Eingabegerät nutzen, wurde diese Eingabeart ebenfalls im Rahmen der Studie getestet. Die Studie umfasste somit drei verschiedene Verbindungsarten und zwei Eingabemöglichkeiten.

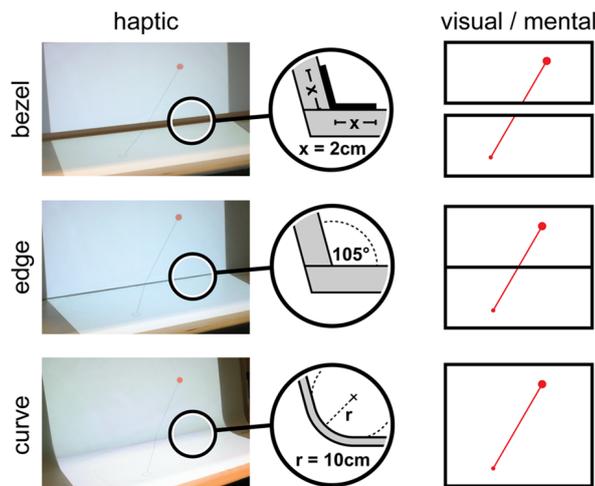


Abbildung 4.14: Während der Studie zum Effekt verschiedener Verbindungsarten wurden drei unterschiedliche Verbindungen getestet: (oben) eine Verbindung mit Rahmen zwischen den Displays, (mittig) eine direkte Verbindung mit einem kantigen Übergang und (unten) die nahtlose, gebogene Verbindung des Curve (nach Hennecke u. a., 2013a).

Technischer Aufbau Um die Vergleichbarkeit der Studienergebnisse zu gewährleisten wurde die technische Umsetzung der drei Verbindungstypen möglichst identisch gehalten. Als Grundlage diente in allen drei Fällen der Prototyp des Curve (siehe Kapitel 3). Für die Verbindungen *Kante* und *Rahmen* wurde der Aufbau jedoch durch den Austausch der gebogenen Plexiglasplatte angepasst. Statt der durchgehend gebogenen Platte wurden zwei einzelne, flache Platten mit derselben Stärke eingesetzt. Dies erlaubte die vorhandene Projektions- und Tracking-Technik des Curve in allen drei Varianten zu verwenden. Über alle Verbindungsarten hinweg stimmten die Displayparameter mit denen des eigentlichen Curve-Setups überein (Breite 120 cm, Tischhöhe 72 cm, Neigungswinkel 105 °). Der einzige Unterschied bestand also in der Art der Verbindung. Beim Verbindungstyp *Kante* setzten



Abbildung 4.15: Die drei unterschiedlichen Verbindungstypen während der Studie: (links) die Verbindungskurve, (mittig) die Verbindung mittels *Kante* und (rechts) die Verbindung mit einem trennenden *Rahmen* (Abbildungen in Anlehnung an Matzke, 2011).

die beiden planaren Plexiglasplatten direkt aufeinander auf. Diese direkte Verbindung wur-

de bei der *Rahmen*-Bedingung durch eine Holzleiste (je 2 cm pro Displayfläche, 3 mm Höhe) verdeckt (siehe Abbildung 4.15). Hierdurch entstand derselbe Eindruck, den zwei aneinander gestellte konventionelle Displays mit Rahmen erzeugt hätten.

Für beide Varianten wurden eigene Kalibrierungen (siehe Abschnitt 3.2) erstellt. Hierbei führte der Rahmen zu zwei separaten Ausgabebildern - hinter dem Holzrahmen befand sich keine reguläre Anzeigefläche (de Almeida u. a., 2012). Die horizontale Platte wurde außerdem durch eine zusätzliche Strebe direkt unterhalb der Verbindungskante stabilisiert. Da sich diese Strebe außerhalb der Projektions- und Kamerasichtlinien befand, hatte sie jedoch keinerlei Einfluss auf die Darstellung oder Erkennung der direkten Eingabe während der Studie.

Um die nahtlose Interaktion über die *Kante* und den *Rahmen* hinweg zu ermöglichen wurden die Techniken Flicking (Voelker u. a., 2012) und Stitching (Hinckley u. a., 2004) implementiert. Beim Flicking (siehe Abschnitt 4.1) erhält das zu verschiebende Objekt eine gewisse Trägheitsmasse. Dadurch rutscht es nach dem Loslassen während einer Bewegung noch ein Stück in die zuletzt eingeschlagene Dragging-Richtung weiter. Dort bleibt es aufgrund einer virtuellen Reibung nach einiger Zeit liegen.

Beim Stitching (Hinckley u. a., 2004) wird ein Objekt, das nahe an den Rand eines Bildschirms bewegt wurde, innerhalb kurzer Zeit auf den benachbarten Bildschirm überführt. Dazu muss der Nutzer das Objekt am Rand des ersten Bildschirms ablegen. Erfolgt innerhalb einer definierten Zeitspanne eine neue Dragging-Geste am Rahmen des zweiten Bildschirms, wird das zuvor bewegte Objekt automatisch dorthin bewegt und folgt wieder dem Eingabepunkt des Nutzers.

Beide Techniken erlauben eine nahtlose Interaktion über kantige oder versperrte Displayverbindungen. Durch Flicking rutscht das Objekt beim Anheben des Fingers auf dem ersten Display von allein weiter. Entweder greift der Nutzer es anschließend wieder auf dem zweiten Display auf oder es wird mittels Stitching direkt zum neuen Eingabeort auf dem zweiten Display verschoben.

Studiendesign Die Unterschiede zwischen den Verbindungstypen wurden mit einem interindividuellen Studiendesign (between-subject) untersucht. Die Variablenausprägungen hierbei waren die drei Verbindungsarten (*Kurve*, *Kante*, *Rahmen*) zwischen den beiden Displaybereichen. Unabhängig von der Verbindungsart wurden jedoch noch zwei intraindividuelle (within-subject) Variablen untersucht: die Art der *Eingabe* und der *Aufgabentyp*. Dazu sollten die Teilnehmer der jeweiligen Verbindungsgruppen Objekte entlang von Pfaden bewegen, die auf Grundlage der ISO 9241-9:2000 (9241-9, 2000) definiert wurden. Dies erfolgte sowohl in aufwärts als auch in abwärts verlaufender Richtung (siehe Abbildung 4.16). Während einer Sitzung wurden diese Aufgaben mit Pointer- und Touch-Eingabe genutzt. Im Fall der *Rahmen*-Verbindung wurde die Länge der Achsen entsprechend angepasst um den verdeckten Displaybereich hinter dem Holzrahmen auszugleichen. Um Erkenntnisse zu Dragging-Strategien bei den verschiedenen Verbindungen und Eingabearten der Nutzer zu erhalten wurde außerdem die *Art der Aufgabe* variiert. In der eingeschränkten Variante sollten die Teilnehmer einem Pfad zwischen Start- und Zielbereich möglichst schnell und genau folgen. In der unbeschränkten Variante wurde kein Pfad vorgegeben und das Objekt sollte

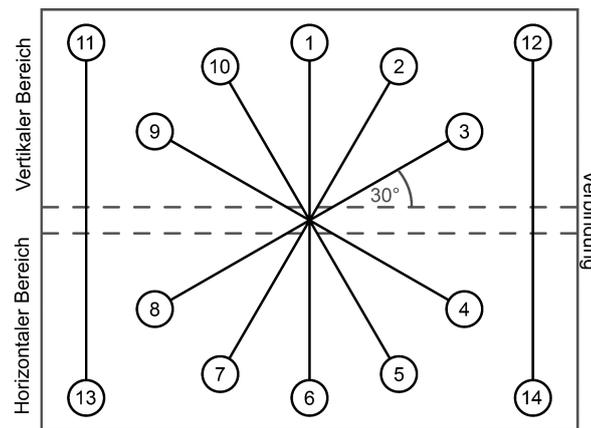


Abbildung 4.16: Das Design der Studie zu Verbindungstypen basierte auf sieben verschiedenen Achsen über die die Teilnehmer während der Studie in beiden Richtungen Objekte ziehen sollten, wobei die mittlere vertikale Achse zweimal zu absolvieren war (Hennecke u. a., 2012a).

nur schnellstmöglich zum Ziel bewegt werden.

Die Ausprägungen des Verbindungstyps wurden nacheinander untersucht um die Umbauzeiten zwischen den Studiensitzungen zu minimieren. Die beiden intraindividuellen Variablen *Eingabe* und *Aufgabentyp* wurden mit Hilfe eines 4×4 Latin Square Designs über jeden Verbindungstyp hinweg separat ausbalanciert. Pro Teilnehmer ergeben sich bei drei Wiederholungen somit insgesamt 96 Dragging-Operationen pro Eingabeart ($Achse \times Richtung \times Aufgabentyp \times Wiederholung$ ($8 \times 2 \times 2 \times 3$)). Die Reihenfolge der verschiedenen Achsen wurde dabei ebenfalls ausbalanciert.

Teilnehmer An der Studie nahmen pro Verbindungstyp 16 Personen (insgesamt 48) teil. Kein Teilnehmer hat an mehr als eine Verbindung getestet. 21 Teilnehmer waren weiblich, 27 männlich und ihr Alter lag zwischen 22 und 35 Jahren. Insgesamt haben nur zwei Linkshänder an der Studie teilgenommen.

Aufgabe und Ablauf Die Teilnehmer saßen während der Studie mittig vor dem Curve und durften die bevorzugte Eingabehand für beide Eingabearten frei wählen. Sie wurden gebeten während der Studie diese Wahl beizubehalten. Zu Beginn machte sich jeder Teilnehmer in einer ausführlichen Trainingsphase mit dem System vertraut.

Bei beiden Eingabearten wurden Start- und Zielbereich jeweils gleichzeitig eingeblendet. In der eingeschränkten Variante wurde außerdem eine Linie als Dragging-Pfad angezeigt. Um das Objekt bewegen zu können, mussten die Teilnehmer zuerst das Objekt im Startbereich selektieren. Nach einem kurzen Halten wurde visualisiert, dass das Objekt bewegt werden kann. Anschließend sollte es schnellstmöglich in den Zielbereich bewegt werden. Während der Studie wurde keine Rückmeldung über die Geschwindigkeit oder die Genauigkeit des Draggings gegeben. Nach dem vollständigen Absolvieren aller Durchläufe beantwortete jeder Teilnehmer einen zusätzlichen Fragebogen, der auf der ISO 9241-9:2000 (9241-9, 2000) basierte.

Messungen Während der Studie wurden sowohl quantitative Daten gemessen als auch qualitatives Feedback der Teilnehmer über einen Fragebogen erfasst. Die quantitativen Messungen unterteilen sich in drei verschiedene Bereiche:

Dauer ist der Zeitraum zwischen dem ersten Bewegen des Objekts (Maus wird bei gedrückter Maustaste bewegt, Finger bewegt sich über die Oberfläche) und dem Ablegen des Objekts innerhalb des Zielbereichs.

Abweichung ist der durchschnittliche Abstand zwischen dem direkten Pfad zwischen Start- und Zielbereich und dem Dragging-Pfad eines Teilnehmers. Der Abstand dazwischen wird entlang einer senkrecht auf dem Start-Ziel-Pfad stehenden Linie in Pixeln gemessen.

Bewegungspfade wurden während aller Studien aufgezeichnet. Dabei wurden sowohl die Bewegungspfade als auch ein mögliches zwischenzeitliches Loslassen des Objekts gespeichert.

In einem abschließenden Fragebogen wurden die Teilnehmer zu ihrer Wahrnehmung der Displaykonfiguration und der Interaktion über die Displayverbindung hinweg befragt. Die Fragen umfassten sowohl die Selbstwahrnehmung der Geschwindigkeit und Genauigkeit, als auch die Wahrnehmung des Displayübergangs in Bezug auf Komfort und Einfachheit. Die Antworten der Teilnehmer wurden mit 5-stufigen Likert-Skalen erfasst.

Analyse Die hier beschriebenen Ergebnisse beziehen sich auf die Daten des jeweils dritten Durchlaufs aller Studienteilnehmer. Die ersten beiden Durchläufe wurden im Rahmen der intensiven Trainingsphase zwar mitgeloggt, jedoch nicht für die Auswertung herangezogen.

Falls nicht anders angegeben basieren die hier vorgestellten Ergebnisse auf einer Varianzanalyse mit Messwiederholungen (*repeated measures analysis of variance, ANOVA*): *Verbindung* \times *Aufgabentyp* \times *Eingabeart* ($3 \times 2 \times 2$). Ist die Sphärizität verletzt, kommt eine Greenhouse-Geißer Korrektur zum Einsatz.

Der Fragebogen der Studie basiert auf einer fünf-stufigen Likert-Skala, die von 1 ('Ich stimme nicht zu') bis 5 ('Ich stimme zu') reicht. Für die Auswertung werden diese Bewertungen in drei Gruppen eingeteilt: *Ich stimme nicht zu* (1 & 2), *Neutral* (3) und *Ich stimme zu* (4 & 5).

4.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Studie werden zum einfacheren Verständnis in verschiedene Kategorien eingeteilt und nach Eingabeart getrennt voneinander betrachtet. Die vier Ergebniskategorien sind:

Geschwindigkeit enthält die Ergebnisse hinsichtlich der gemessenen Zeit, die die Teilnehmer für den erfolgreichen Abschluss der Dragging-Aufgaben benötigten.

Genauigkeit beschreibt die Abweichung des tatsächlichen Dragging-Pfads von der kürzesten Verbindung zwischen Start und Ziel.

Nutzerbewertung fasst die Ergebnisse des abschließenden Fragebogens zusammen.

Weitere Beobachtungen enthält Erkenntnisse, die während der Studie gewonnen wurden.

Basierend auf diesen Ergebnissen wird abschließend eine Beurteilung des Einflusses der Displayverbindung auf Dragging-Aufgaben abgegeben. Daraus resultierende Rückschlüsse und die Beantwortung von *Forschungsfrage 1* werden gemeinsam mit den Ergebnissen der Pointing-Studie im Abschnitt 4.4 diskutiert.

Geschwindigkeit

Die gesammelten Messwerte zeigen keinen signifikanten Einfluss der Verbindungsart auf die Dragging-Geschwindigkeit ($F_{2, 45} = 2.415, p > .05$). Es kann lediglich eine leichte Tendenz vom *Rahmen* über die *Kante* hin zur *Kurve*, die leicht schneller abschneidet, festgestellt werden.

Wie jedoch zu erwarten war, hat der Aufgabentyp einen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Interaktion ($F_{1, 45} = 222.001, p < .05$). Ohne die Vorgabe eines Pfads ist das Dragging schneller gewesen ($m = 9869$ ms; $sd = 2433$ ms) als bei der eingeschränkten Aufgabenstellung ($m = 11705$ ms; $sd = 2948$ ms) (siehe Abbildung 4.17). Auch die Art der Eingabe beeinflusst die Geschwindigkeit der Interaktionen signifikant ($F_{1, 45} = 41.057, p < .05$), wobei die Maus ($m = 8134$ ms; $sd = 1979$ ms) ein schnelleres Dragging erlaubt als die Touch-Eingabe ($m = 13440$ ms; $sd = 3402$ ms) (siehe Abbildung 4.17).

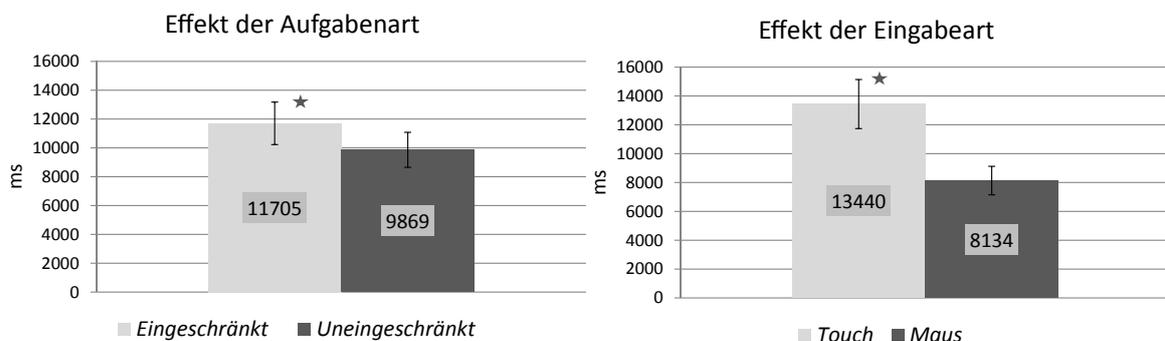


Abbildung 4.17: Sowohl die Art der Aufgabe (links) als auch die Art der Eingabe (rechts) haben einen signifikanten Effekt auf die gemessenen Interaktionszeiten der Dragging-Gesten.

Genauigkeit

Im Gegensatz zur Geschwindigkeit hat die Art der Verbindung einen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der Dragging-Gesten ($F_{2, 45} = 4.509, p < .05$). Post-hoc Tests zeigen,

dass sich die die *Kurve* ($m = 27,9$ px; $sd = 33,6$ px) signifikant genauer war als die *Kante* ($m = 36,5$ px; $sd = 45,9$ px). Der *Rahmen* ($m = 30,3$ px; $sd = 34,5$ px) zeigte zu keiner der anderen Verbindungen signifikante Unterschiede. Betrachtet man nur die Messungen der *eingeschränkten* Aufgabe, zeigt sich auch hier ein signifikanter Unterschied ($F_{2, 45} = 201.883$, $p < .05$) zwischen den Verbindungen *Kante* ($m = 19,5$ px; $sd = 15,3$ px) und *Kurve* ($m = 14,6$ px; $sd = 12,7$ px).

Die Analyse der Messungen zeigt außerdem einen signifikanten Effekt der Aufgabenart ($F_{1, 45} = 176.526$, $p < .05$). Die Abweichung vom kürzesten Pfad zwischen Start und Ziel ist bei der *eingeschränkten* Aufgabe ($m = 16,8$ px; $sd = 14,3$ px) geringer als ohne vorgegebenen Pfad ($m = 46,4$ px; $sd = 48,3$ px). Darüber hinaus gibt es einen Interaktionseffekt in Bezug auf die Genauigkeit: *Eingabe* \times *Aufgabe* ($F_{1, 45} = 15.320$, $p < .05$).

Nutzerbewertung

Im Rahmen der Nutzerbewertung wurden die persönlichen Einschätzungen zur Interaktionsgeschwindigkeit und der wahrgenommenen Genauigkeit auf dem gesamten Display und auch speziell im Verbindungsbereich abgefragt. Dabei wurden zusätzlich Fragen zu einer mögliche Erschöpfung aufgrund der Studiendauer (etwa 30 - 45 Minuten) und der allgemeinen Wahrnehmung der Displayverbindung abgefragt. Durch das interindividuelle Studiendesign beziehen sich die prozentualen Angaben jeweils auf die Anzahl der Teilnehmer bei einer der drei Displayverbindungen.

Geschwindigkeit Trotz fehlender signifikanter Unterschiede im Hinblick auf die Dragging-Geschwindigkeit wurden die Verbindungen unterschiedlich gut bewertet. In Bezug auf die Geschwindigkeit der Touch-Eingabe zeigt sich eine klare Bevorzugung der gebogenen Verbindung. Während 75% der Teilnehmer zustimmten, dass die Interaktion auf dem gesamten Display mit einer Kurve als Verbindung schnell war, war die Zustimmung bei den beiden anderen Verbindungen geringer (*Kante*: 50%, *Rahmen*: 37,5%). Dieser Trend setzt sich für den Verbindungsbereich des Displays fort. 37,5% der Teilnehmer bewerteten die Kurve hinsichtlich der Interaktionsgeschwindigkeit als akzeptabel (*Kante* 18,8%, *Rahmen* 12,5%).

Insgesamt fällt auf, dass die Touch-Eingabe im Vergleich zur Maus als langsamer empfunden wurde. Während Touch bei einer gebogene Displayverbindung bevorzugt wurde, zeigen sich bei der Eingabe mit der Maus weder für das gesamte Display noch für den Verbindungsbereich klare Tendenzen. In Bezug auf das gesamte Display sind die Bewertungen relativ ausgeglichen mit einer leichten Abwertung der *Rahmen*-Verbindung (*Kurve*: 93,8%, *Kante*: 93,8%, *Rahmen*: 81,3%). Im Verbindungsbereich wird die *Kante* hingegen leicht besser bewertet als die beiden anderen Verbindungen (*Kurve*: 81,3%, *Kante*: 93,8%, *Rahmen*: 81,3%).

Genauigkeit Die subjektiven Bewertungen der Genauigkeit bei der Touch-Interaktion auf dem gesamten Display stützen die gemessenen Werte. Während die *Rahmen*-Verbindung (62,5%) und die *Kurve* (56,3%) für direkte Eingabe relativ positiv bewertet wurden, waren es bei der *Kante* nur 37,5%. Die Bewertung der Interaktionsgenauigkeit im Verbindungsbereich

fällt ähnlich aus. Auch hier werden der *Rahmen* und die *Kurve* mit je 31,3% positiv bewertet. Die *Kante* erreicht hier lediglich eine Zustimmung von 12,5%. Eine mögliche Erklärung für diese Bewertung könnten die beobachteten Versuche sein die Displayoberfläche auch beim Übergang zwischen den Displaybereich zu berühren (siehe Abschnitt 4.3.2).

Die Bewertung der Genauigkeit der Pointer-Eingabe widerspricht zum Teil den gemessenen Werten. Während die objektiven Messwerte nur wenige Unterschiede aufweisen, fällt die subjektive Bewertung der Teilnehmer sehr deutlich aus. Sowohl in Bezug auf das gesamte Display (*Kurve* 37,5%, *Kante* 81,3%, *Rahmen* 43,8%) als auch auf den Verbindungsbereich (*Kurve* 43,8%, *Kante* 68,8%, *Rahmen* 37,5%) liegt die kantige Verbindung in den Bewertungen deutlich vorn.

Komfort Im Fragebogen der Studie wurden die Teilnehmer auch nach ihrer Einschätzung der genutzten Verbindungsart gefragt. Was die Seltsamkeit der Verbindung bei der Eingabe per Maus betrifft wurde die *Kurve* (75,0%) besser bewertet als die *Kante* (56,3%) und der *Rahmen* (31,3%). Dieser Trend zeigt sich auch bei der Bewertungen für die Touch-Eingabe (*Kurve* 62,5%, *Kante* 43,8%, *Rahmen* 6,5%). Bei der Frage nach dem haptischen Bedienkomfort schnitt die *Kurve* (50,0%) auch besser ab als die anderen Verbindungen (*Kante* 25,0%, *Rahmen* 37,5%). Im Fall der *Kante* ist eine mögliche Begründung die unnatürliche Arm- und Handhaltung während der Touch-Eingabe (siehe Abschnitt 4.3.2).

Zusätzlich schneidet die *Kurve* (56,3%) bei der allgemeinen Zufriedenheit mit der direkten Eingabe auf dem gesamten Display (*Kante* 37,5%, *Rahmen* 25,0%) und dem Verbindungsbereich (*Kurve* 25,0%, *Kante* 12,5%, *Rahmen* 18,8%) am besten ab. Diese Reihenfolge ändert sich für die Maus-Eingabe jedoch zugunsten der *Kante* (gesamtes Display: *Kurve* 87,5%, *Kante* 93,8%, *Rahmen* 68,8%; Verbindungsbereich: *Kurve* 75,0%, *Kante* 87,5%, *Rahmen* 50,0%).

Die angegebenen Erschöpfungswerte für Schulter, Arme, Handgelenk und Finger sind über die Verbindungen hinweg relativ ähnlich. Es zeigen sich dabei keine Besonderheiten, die darauf hindeuten würden, dass eine der Verbindungen die körperliche Anstrengung während der Studie im Vergleich zu den anderen Verbindungen reduzieren würde. Interessanterweise ist dies auch für die kantige Verbindung der Fall, obwohl hier unnatürliche Arm- und Handhaltungen beobachtet wurden.

Weitere Beobachtungen

Während der Studie sind vor allem zwei wesentliche Punkte beobachtet worden. Der erste Punkt betrifft lediglich die direkte Interaktion der Nutzer mit dem kantigen Display, der zweite Punkt die direkte Interaktion im Allgemeinen.

Die direkte Interaktion mit dem kantigen Displayaufbau schnitt bei den Genauigkeitswerten und den dazu gehörigen subjektiven Bewertungen im Vergleich zu den anderen Verbindungstypen schlecht ab. Eine mögliche Ursache hierfür konnte während der Studie beobachtet werden. Trotz der vorgestellten Interaktionstechniken (Flicking, Stitching) tendierten die Nutzer dazu die Dragging-Gesten auch durch die kantige Verbindung hindurch vollständig auszuführen. Sie versuchten mit dem Finger auch bis in die Kante hinein eine durchgehende Berührung mit der Displayoberfläche zu halten. Das direkte Kombinieren der beiden

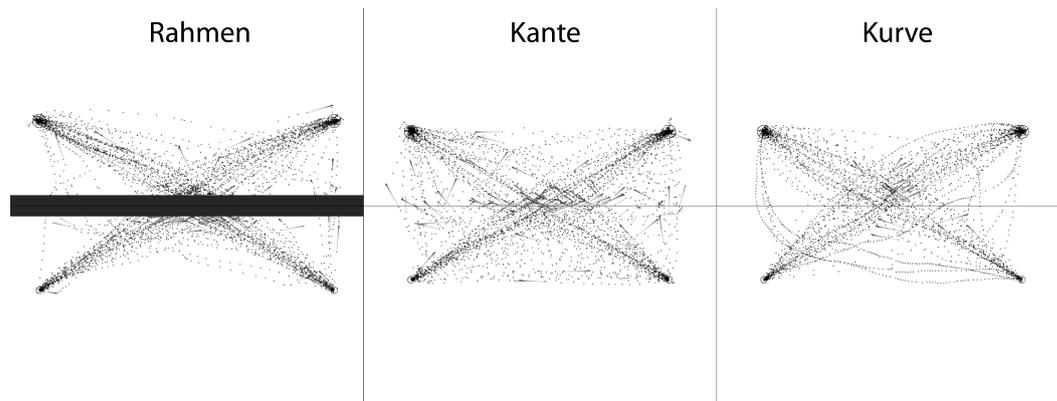


Abbildung 4.18: Die Bewegungspfade beim Dragging auf den beiden flachen, schrägen Achsen vom horizontalen auf den vertikalen Displaybereich für die drei Verbindungstypen: (links) Rahmen, (mittig) Kante, (rechts) Kurve (Matzke, 2011). Die geschweiften Linien visualisieren Flicking-Gesten beim Durchqueren der Displayverbindung.

planaren Displaybereiche scheint zu suggerieren, dass die Interaktion über die komplette Displayfläche stattfinden muss. Dies führte zu unnatürlichen Verdrehungen der Finger und Handgelenke während des Übergangs zwischen dem horizontalen und vertikalen Displaybereich. Zusätzlich hoben die meisten Teilnehmer ihren Eingabearm ein wenig an um eine durchgehend freie Sicht auf das Dragging-Objekt zu behalten. Zwar wurden anschließend keine erhöhten Ermüdungserscheinungen angegeben, die Haltung wirkte jedoch verkrampfter als bei der *Rahmen-* oder *Kurven-*Verbindung.

Die aufgezeichneten Bewegungspfade der Dragging-Operationen wurden nach der Studie zur Auswertung visualisiert und getrennt nach Displayverbindungen miteinander verglichen (siehe Abbildung 4.18). Dabei konnten die Ergebnisse der Dragging-Studie am BendDesk (Weiss u. a., 2010b) bestätigt werden. Beim gebogenen Display neigten die Teilnehmer dazu die Bewegungspfade an die Displayform anzupassen und den Übergang durch die Kurve durch leicht gebogene Dragging-Pfade zu minimieren. Zusätzlich zeigt sich jedoch auch, dass dieser Effekt bei der kantigen Verbindung noch deutlicher auftritt (siehe Abbildung 4.18). Die Pfade der *Rahmen-*Verbindung hingegen ähneln eher den Pfaden des gebogenen Displays. Dies stützt die subjektiven Bewertungen, dass eine gebogene Verbindung die durchgehende direkte Interaktion zwischen den beiden Displaybereichen angenehmer gestaltet.

Eine weitere Beobachtung, die auch schon in der Pointing-Studie (siehe Abschnitt 4.2) gemacht wurde, sind die gebogenen Pfade des Mauszeigers auf dem horizontalen Displaybereich (siehe Abbildung 4.19). Während die Pfade auf dem vertikalen Displaybereich relativ gerade verlaufen, sind sie hier auf beiden Seiten stark zur Mitte hin gebogen. Eventuell spielt bei diesem Effekt die Gewöhnung der Teilnehmer an die Bewegung eines Mauszeigers auf vertikal ausgerichteten Bildschirmen eine entscheidende Rolle.

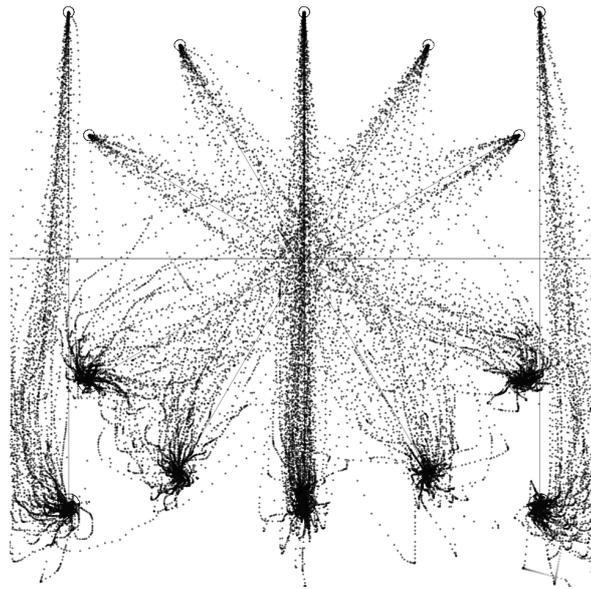


Abbildung 4.19: Die Bewegung des Mauszeigers beim Dragging unterscheidet sich je nach Displaybereich deutlich. Während die Bewegung auf dem vertikalen Displaybereich relativ linear verläuft, ist sie im horizontalen Bereich deutlich gebogener. Besonders auffällig sind die Abweichungen zur Displaymitte auf den äußeren Achsen.

Fazit

Die zu Beginn gestellten drei Forschungsfragen werden in diesem Abschnitt basierend auf der Analyse der Studiendaten beantwortet. Eine abschließende Gesamtbewertung aller untersuchten Einflüsse der gebogenen Displayform des Curve auf Interaktionen findet in Abschnitt 4.4 statt.

Frage 1 *Wie stark beeinflusst die Art der Verbindung die Genauigkeit der Eingabe?*

Ein Einfluss auf die Genauigkeit der Eingabe ist vorhanden, jedoch nicht zwischen allen Verbindungstypen signifikant. Die Kurve schneidet unabhängig von der Eingabeart signifikant besser ab als die kantige Verbindung. Der Rahmen zwischen den Displaybereichen zeigte jedoch keine signifikanten Unterschiede zu einer der beiden anderen Arten.

Aufgrund der gespeicherten Bewegungspfade wurde beobachtet, dass die Nutzer bei der direkten Interaktion den Weg durch die Displayverbindung minimieren (Weiss u. a., 2010b). Hierdurch entsteht vermutlich die gemessene Abweichung vom kürzest möglichen Pfad zwischen Start und Ziel. Sowohl die aufgezeichneten Pfade als auch die beobachtete unkomfortable Arm- und Handhaltung bei der Durchquerung der kantigen Verbindung zeigen, dass diese Minimierungsstrategie bei einer kantigen Verbindung ausgeprägter ist.

Frage 2 *Wie stark beeinflusst die Art der Verbindung die Geschwindigkeit der Eingabe?*

Trotz der signifikanten Unterschiede bei der Genauigkeit konnte kein Einfluss der Verbindungsart auf die Interaktionsgeschwindigkeit nachgewiesen werden. Zwar waren die Teilnehmer beim Durchqueren der Kurve tendenziell schneller als beim Rahmen und der Kante,

die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant.

Interessanterweise weicht die subjektive Wahrnehmung (Frage 3) jedoch von diesen Messwerten ab. Die Teilnehmer, die die gebogene Verbindung getestet haben, bewerteten die Interaktion durch die Displaykurve häufiger als schnell als dies bei den beiden anderen Verbindungen der Fall war.

Frage 3 *Wie stark beeinflusst die Art der Verbindung die subjektive Wahrnehmung des Displays und der Eingabe?*

Insgesamt hat die Verbindungsart einen starken Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung der Nutzer hinsichtlich der Interaktionszeit und der Genauigkeit der Interaktion. Vor allem die Bewertung der Interaktionszeiten fällt sehr unterschiedlich aus. Zur besseren Übersicht wird diese Frage in drei Teilen beantwortet. Der erste Teil befasst sich dabei mit der wahrgenommenen Genauigkeit und der zweite Teil mit der wahrgenommenen Geschwindigkeit. Im letzten Teil werden weitere Bewertungen zusammengefasst.

Genauigkeit. Die Wahrnehmung und Bewertung der Eingabegenauigkeit entspricht für die direkte Eingabe den gemessenen Werten. Der Rahmen und die Kurve schneiden besser ab als die Kante. Der Grund hierfür dürfte in den beobachteten Arm- und Handhaltungen beim Durchqueren der kantigen Verbindung liegen.

Die Bewertung der indirekten Eingabe widerspricht den Messwerten jedoch deutlich. Die Teilnehmer bewerteten die kantige Verbindung bei Verwendung der Maus als deutlich genauer im Vergleich zum Rahmen und der Kurve. Dies betrifft sowohl das gesamte Display als auch explizit den Verbindungsbereich. Gründe hierfür können zum einen in der ungewohnten, gebogenen Displayfläche in der Kurve und in den Sprüngen des Mauszeigers über den Rahmen hinweg liegen. Denn im Gegensatz dazu bietet eine kantige Verbindung ausschließlich zwei flache Displaybereiche, so dass der Nutzer vermutlich nur in einem kleinen Bereich um die Verbindung herum Probleme beim Verfolgen und Bewegen des Mauszeigers hat. Denn im Vergleich zum Rahmen und der Kurve treten dort bei der Kante keine unvorhersehbaren Sprünge oder Veränderungen der Bewegungsebene des Mauszeigers auf.

Geschwindigkeit. Die Wahrnehmung der Interaktionsgeschwindigkeit zeigte ebenfalls eine deutliche Beeinflussung durch die Art der Verbindung. Obwohl hier keine objektiven Unterschiede festgestellt wurden, sind die drei Verbindungsarten bei der direkten Interaktion sehr unterschiedlich bewertet worden. Die Kurve wurde dabei häufiger als schnell beschrieben als die anderen beiden Verbindungen. Besonders bei der Frage nach der Interaktionsgeschwindigkeit im Verbindungsbereich des Displays erhält die Kurve gute Bewertungen. Die subjektiven Bewertungen deuten also darauf hin, dass die theoretischen Überlegungen zur haptischen Kontinuität beim Bau des Curve (Wimmer u. a., 2010) dazu beigetragen haben die Displayform für die direkte Interaktion zu optimieren.

Weitere Bewertungen. Der Gedanke der haptischen Kontinuität (Wimmer u. a., 2010) wird auch durch die weiteren Bewertungen der Teilnehmer gestützt. Dort schneidet die Kurve bei der Frage nach dem haptischen Komfort am besten ab. Die kantige Verbindung wird dagegen deutlicher schlechter bewertet. Dies spricht dafür, dass die Displayform in Verbindung mit der Eingabeart einen deutlichen Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung des Nutzers hat.

4.4 Zusammenfassung

Dieser Abschnitt fasst die Erkenntnisse des Einflusses der Displayform auf die gängigen Interaktionsformen *Pointing* und *Dragging* zusammen. Diese Zusammenfassung gibt dadurch eine Antwort auf Forschungsfrage 1 (*Werden gängige Interaktionskonzepte durch die gebogene Displayform des Curves beeinflusst und wie sieht dieser Einfluss aus?*). Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Studien kombiniert und für die Formulierung erster Empfehlung hinsichtlich der Interface-Gestaltung am Curve genutzt.

4.4.1 Pointing

Insgesamt hat sich in beiden durchgeführten Pointing-Studien am Curve ein Einfluss der Displayform auf die Interaktion gezeigt. Sowohl die generelle **Position eines Objekts** auf dem horizontalen oder vertikalen Displaybereich, als auch die genauere Position in den jeweiligen Bereichen, beeinflusst die Interaktion. Bei beiden untersuchten Eingabearten (Pointer, Touch) wurden die Zielobjekte in der Mitte des Displays am schnellsten erreicht. Die Genauigkeit hingegen wird vor allem durch die Displayorientierung des Zielbereichs beeinflusst. Ziele auf der horizontalen Fläche, die sich nahe der Displaykurve befinden, wurden weniger genau getroffen als Ziele in dem entsprechenden Displaybereich auf der vertikalen Fläche. Bei den Ergebnissen der Touch-Studie deutet sich außerdem ein Einfluss der **Händigkeit des Nutzers** an. Von den mittleren Achsen schnitten die weiter rechts gelegenen am besten ab. Zwar wurden hierzu mangels Vergleichsgruppe keine statistischen Untersuchungen angestellt, da ein Großteil der Teilnehmer jedoch Rechtshänder waren, ist ein entsprechender Einfluss zu vermuten.

Zusätzlich zu diesen objektiven Einflüssen wird jedoch auch die subjektive Wahrnehmung der Nutzer beeinflusst. Hier zeigt sich vor allem ein Einfluss der Lage des Ziels innerhalb des **Sichtfelds des Nutzers**. Unabhängig von der Art der Eingabe wurden Ziele in der Mitte als schneller erreichbar bewertet. Die gemessenen Präzisionsvorteile des horizontalen Displaybereichs für Touch wird durch die subjektive Bewertung gestützt. Interessanterweise setzt sich diese Wahrnehmung bei indirekter Eingabe fort, obwohl hier kein objektiver Unterschied der Ergebnisse vorliegt.

Die beiden Studien haben außerdem ergeben, dass eine generelle **Vorhersagbarkeit** von Pointing-Interaktionen auf dem Curve möglich ist. Diese Vorhersagbarkeit gilt sowohl für indirekte (Pointer) als auch für die direkte Eingabe (Touch). Trotz der gefundenen Unterschiede bei den Interaktionszeiten können die Interaktionszeiten mit einer sehr guten Genauigkeit mit einer Formel pro Eingabeart für das gesamte Display vorhergesagt werden (siehe Abschnitt 4.2.2).

4.4.2 Dragging

In der Dragging-Studie konnte ebenfalls ein Einfluss der **Displayverbindung** (*Kurve, Kante, Rahmen*) sowohl auf direkte als auch auf indirekte Interaktionen, die die Verbindung durchqueren, nachgewiesen werden. Allerdings fiel dieser Einfluss gerade im Hinblick auf die Interaktionszeiten geringer aus als erwartet. Während die Genauigkeit der Interaktion maßgeblich von der Verbindungsart beeinflusst wurde, konnte in Bezug auf die Dragging-Schnelligkeit der Teilnehmer kein signifikanter Einfluss nachgewiesen werden. Es zeigte sich lediglich eine leichte Tendenz zu Gunsten der gebogenen Displayverbindung im Vergleich zu den anderen beiden Verbindungen.

Die Unterschiede bei den subjektiven Bewertungen waren im Gegensatz zu den objektiven Messwerten deutlicher. Hier zeigten sich klare Präferenzen für bestimmte Verbindungsarten in **Abhängigkeit von der Eingabeart**. So wird die direkte Interaktion durch die Kurve einerseits als genauer wahrgenommen als die indirekte Eingabe, was auch den objektiven Ergebnissen entspricht. Andererseits attestierten viele Teilnehmer der indirekten Eingabe im Zusammenspiel mit der kantigen Verbindung eine höhere Genauigkeit, was den objektiven Ergebnissen jedoch widerspricht.

Noch deutlicher fällt dieser Unterschied bei der Wahrnehmung der Interaktionsgeschwindigkeit aus. Obwohl keine signifikanten Unterschiede gefunden wurden, sind deutlich mehr Teilnehmer mit der Geschwindigkeit der direkten Interaktion durch die Kurve zufrieden als bei den anderen Verbindungsarten. Für die indirekte Interaktion mit der Maus besteht ein ähnlicher Effekt für die kantige Verbindung. Es zeigt sich also, dass die Touch- und Maus-Eingabe unterschiedlich gut für die verschiedenen Displayformen geeignet sind.

4.4.3 Empfehlungen für die Interfacegestaltung

Neben den Aussagen der einzelnen Ergebnisse führt die Summe aller Ergebnisse zu Empfehlungen für zukünftige Design-Entscheidungen am Curve oder einem vergleichbaren, gebogenen Display. Sie stellen dabei allerdings nur einen ersten Schritt dar und können keinesfalls Benutzerstudien mit Prototypen (siehe Abschnitt 7) ersetzen. Sie sollen vielmehr dazu beitragen grundsätzliche Fehler und Probleme der Nutzerinteraktion schon bei ersten Interface-Entwürfen zu vermeiden.

Interaktive Elemente mittig platzieren

In den Studien zum Pointing schnitten die Ziele, die mittig vor dem Nutzer lagen, sowohl bei der direkten als auch bei der indirekten Eingabe besser ab als Ziele an den äußeren Displayrändern. Darüber hinaus zeigte sich in der Dragging-Studie eine deutliche Beeinflussungen beider Eingabearten an den seitlichen Rändern des Displays. Neben diesen objektiven Einflüssen beschrieben auch viele Nutzer, dass die innen liegenden Aufgaben nicht nur schneller sondern auch genauer zu lösen seien.

Diese Ergebnisse führen zu der Empfehlung interaktive Elemente, die häufig genutzt werden, bei grafischen Benutzerschnittstellen am Curve nach Möglichkeit mittig vor dem Nutzer zu platzieren. Auf diese Weise wird deren Erreichbarkeit zum einen objektiv gesehen verbessert und zum anderen nehmen die Nutzer die Interaktion insgesamt als effektiver wahr. Elemente, die an den Rändern des Displays platziert werden, müssen im Umkehrschluss entsprechend robust auf die etwas ungenauere Eingabe reagieren. Besonders schmale Elemente (z.B. Scrollbars), die mit einer Dragging-Geste bedient werden, sollten in diesen Bereichen beispielsweise die teils gebogenen Eingabepfade der Nutzer berücksichtigen und ausgleichen.

Touch-Gesten in der Kurve minimieren

Die Studie am BendDesk (Weiss u. a., 2010b) und die hier vorgestellte Dragging-Studie zeigen beide einen deutlichen Einfluss der Displaykurve auf Touch-Gesten, die die Kurve durchlaufen. Am BendDesk beschreiben einige Teilnehmer sogar, dass sie die Kurve als Hindernis während der durchquerenden Interaktion wahrgenommen haben. Die Tatsache, dass die Dragging-Pfade während der direkte Interaktion durch die Teilnehmer an die Kurve angepasst wurden um die Durchquerungsstrecke zu minimieren, stützt diese Aussage.

Aus diesem Grund sollten Touch-Gesten, die die Kurve vollständig durchqueren sparsam eingesetzt werden. Diese Empfehlung ist unabhängig von der horizontalen Lage der Geste - die Wahrnehmung der Nutzer und die Anpassung der Pfade umfasst die gesamte Displaybreite. Sollten dennoch Touch-Gesten in der Kurve erforderlich sein, sollten sie ausreichend robust implementiert werden und die Kurve möglichst senkrecht kreuzen. Sie sollten also so umgesetzt werden, dass der Nutzer seinen bevorzugten Pfad durch die Kurve wählen kann. Denn trotz dieser selbstgewählten Umwege beschrieben die Nutzer die Interaktion in der Kurve als schnell.

Indirekte Interaktion nur auf dem vertikalen Displaybereich

In allen hier vorgestellten Studien zeigt sich ein klarer Effekt der Displaykurve und des horizontalen Displaybereichs auf die indirekte Eingabe mit einer Maus. In diesen beiden Bereichen wurden Abweichungen bei der Interaktion festgestellt und die Nutzer bewerteten sie im Vergleich zum vertikalen Displaybereich schlechter. Daher sollte die indirekte Interaktion in der Kurve und auf dem horizontalen Displaybereich zwar möglich sein, sich aber größtenteils auf den vertikalen Displaybereich beschränken. Eventuell kann es sogar sinnvoll sein die Kurve und den horizontalen Bereich vollständig für die indirekte Eingabe zu sperren. Dies würde zusätzlich vermeiden, dass der Mauszeiger von physikalischen Objekten, die auf dem Display liegen, verdeckt werden kann.

Die Einschränkung deckt sich außerdem mit der ursprünglichen Absicht durch die Form des Displays verschiedene Displaybereiche für unterschiedliche Eingabearten anzubieten. Da der horizontale Displaybereich und die Kurve relativ günstig für die direkte Interaktion liegen, ist der Verzicht von indirekter Interaktion an dieser Stelle vermutlich verschmerzbar.

tl;dr

Die gebogene Displayform des Curve beeinflusst die Interaktion auf mehrere Arten. Pointing zwischen den beiden Displaybereichen am Curve hängt dabei von der Zielposition auf dem Display ab. Ziele, die mittig oder rechts lagen, wurden schneller getroffen und das Ziel ganz links am langsamsten. Da fast ausschließlich Rechtshänder teilgenommen haben, deutet dies auf einen Einfluss der Händigkeit des Nutzers hin. Es wurde außerdem gezeigt, dass sowohl Maus- als auch Touch-Interaktionszeiten mit einer Formel nach Fitts' Law sehr gut vorhersagbar sind. Die gebogene Displayform des Curve beeinflusst zudem die direkte Interaktion bei Dragging-Gesten, die die Kurve kreuzen. Die Nutzer tendieren dazu die Kurve möglichst senkrecht zu durchfahren. Im Vergleich zu anderen Verbindungsarten schneidet die Kurve hinsichtlich der wahrgenommenen Geschwindigkeit und Genauigkeit am besten ab.

Kapitel 5

Greifbare Benutzerschnittstellen

Sie spielen wechselnd alternierend.

– Gerd Rubenbauer, Kommentator –

Neben den heutzutage gängigen Interaktionsformen Maus, Tastatur und Touch (siehe Kapitel 4) entstehen auch neue Wege mit einem Computer zu interagieren. Zwei mittlerweile relativ verbreitete Ansätze in diesem Feld sind die Sprachsteuerung (z.B. Apple Siri¹, Google Now²) und die Steuerung durch Gesten im freien Raum (z.B. Microsoft Kinect³, Leap Motion⁴). Ein Beispiel für die Grundlage einer Steuerung mit Freiraumgesten wird in Abschnitt 6.3 gezeigt. Der dort vorgestellte PerspectiveTable erkennt die Bewegung der Nutzer, was wiederum zur Gestenerkennung genutzt werden kann. Eine neuartige Interaktionsform, die direkt von der Displayoberfläche abhängig ist, basiert auf der Nutzung physikalischer Objekte. Diese werden zur direkten Interaktion mit dem System und zur Steuerung von Programmen eingesetzt (Tangible User Interface, TUI (Ishii u. Ullmer, 1997)).

Kapitelfrage

Wie muss ein Tangible User Interface für die Nutzung am Curve angepasst werden und wie beeinflussen die unterschiedlichen Displayorientierungen dessen Nutzung?

¹ <https://www.apple.com/ios/siri/>, zuletzt aufgerufen am 26.07.2013

² <https://www.google.com/landing/now/>,
zaa30.10.2013

³ <http://www.xbox.com/de-DE/kinect>, zuletzt aufgerufen am 26.07.2013

⁴ <https://www.leapmotion.com/>, zuletzt aufgerufen am 26.07.2013

Dieses Interfacekonzept wurde allerdings bisher größtenteils auf planaren, horizontalen Displays umgesetzt. Dort sind die möglichen Stärken mittlerweile ausgiebig untersucht (Jordà u. a., 2007; Hancock u. a., 2009b). Um diese Vorteile auch auf ein Display wie den Curve zu übertragen, müssen die physikalischen Objekte jedoch auch auf dem vertikalen Displaybereich des Curve nutzbar gemacht werden.

Dazu muss eine Technik gefunden werden, die verhindert, dass die Objekte durch die Schwerkraft auf dem vertikalen Bereich nach unten gezogen werden. Dies ist insofern problematisch, da der Displayprototyp keine großen Veränderungen am Systemaufbau erlaubt. Darüber hinaus ist nicht klar, ob ein solches TUI zur Steuerung am Curve vom Nutzer überhaupt akzeptiert wird.

Dieses Kapitel beantwortet sowohl die Frage nach einer nutzbaren Hafttechnik als auch nach der Benutzbarkeit eines solchen TUIs am Curve. Um ein grundsätzliches Verständnis des Bereichs der TUIs zu schaffen, werden zunächst die Ursprünge dieser Interfaceform vorgestellt. Anschließend wird der Fokus auf TUIs gerichtet, die mit Hilfe zusätzlicher Technologien nicht nur auf horizontalen Oberflächen nutzbar sind. Abschließend werden die verschiedenen Technologien und ihre Vor- sowie Nachteile anhand dieses Überblicks zusammengefasst.

Basierend auf diesem Überblick wird anschließend ein Tangible User Interface vorgestellt, das am und für den Curve entwickelt wurde: die Vertibles (Hennecke u. a., 2012b). Dieses TUI haftet mit Hilfe vakuum-basierter Adhäsion auf beliebigen glatten Oberflächen und somit auch auf der Displayoberfläche des Curve. Neben einer Beschreibung der grundsätzlichen technischen Umsetzung wird auch erklärt wie die Konstruktion der Vertibles für Druckererkennung mit Hilfe von optischem Tracking genutzt wird. Zusätzlich untersucht eine explorative Studie die Nutzung eines TUI am Curve. Dabei stehen besonders die Unterschiede zwischen der Nutzung auf dem horizontalen und den vertikalen Bereich im Vordergrund. Die abschließende Bewertung der Nutzbarkeit eines TUI am Curve fasst diese Erfahrungen und die Erkenntnisse aus dem Entwicklungszeitraum dieses Projekts zusammen.

5.1 Verwandte Arbeiten

Dieser Abschnitt vermittelt einen Überblick über das Themengebiet der Tangible User Interfaces. Dabei wird zwar auch auf die Entstehung des Begriffs und die grundsätzliche Idee von TUIs auf horizontalen Displays eingegangen, der Schwerpunkt liegt jedoch auf TUIs für Oberflächen, die nicht horizontal sind. Diese benötigen spezielle Techniken um an den Oberflächen zu haften und nicht herunterzufallen. Außerdem stellen sie häufig zusätzliche Anforderungen an die Beschaffenheit der interaktiven Oberfläche. Basierend auf einem Überblick der Vor- und Nachteile dieser TUIs (siehe Abbildung 5.4) wird letztlich die Entscheidung für eine vakuum-basierte Adhäsionstechnik begründet.

Das erste System, das auf physikalische Objekte zur Interaktion setzte, ist die Marble Answering Machine (Crampton Smith, 1995). Sie ist ein objekt-basiertes Interface für einen

Anrufbeantworter. Wird der Nutzer angerufen und eine Nachricht hinterlassen, so gibt die Maschine eine Murmel frei, die diese Nachricht repräsentiert. Zum Abhören dieser Nachricht muss der Nutzer diese Murmel lediglich in eine dafür vorgesehene Öffnung fallen lassen (siehe Abbildung 5.1) und der Anrufbeantworter spielt die entsprechende Nachricht ab. Auf die gleiche Weise lässt sich der Anrufer auch zurückrufen. Der Nutzer legt die Murmel in eine dafür vorgesehene Schale des Telefons und dieses wählt automatisch die richtige Nummer.

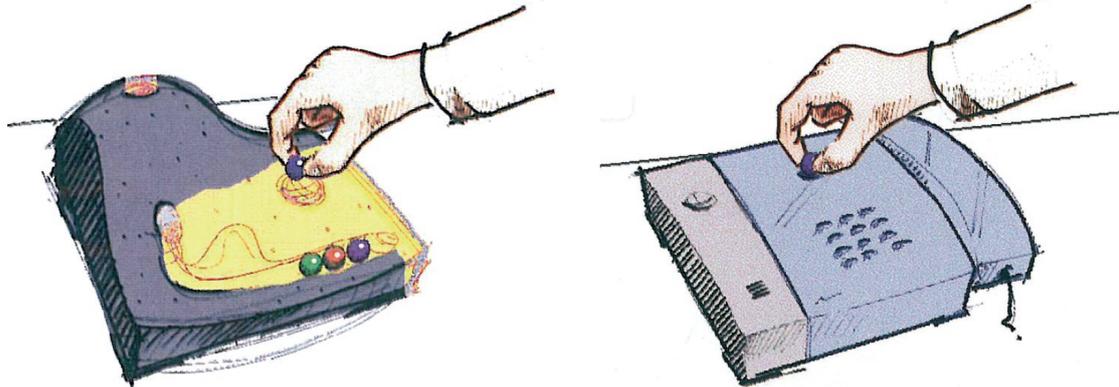


Abbildung 5.1: Das Telefon und der Anrufbeantworter der Marble Answering Machine werden über physikalische Objekte gesteuert: Murmeln repräsentieren einzelne Sprachnachrichten und können zum Abspielen der Nachricht (links) oder zum Zurückrufen des Anrufers (rechts) genutzt werden (Crampton Smith, 1995).

Obwohl die Marble Answering Machine bereits ein erstes TUI darstellt, etablierte sich der Begriff Tangible User Interface erst später. Die Tangible Bits (Ishii u. Ullmer, 1997) und der metaDESK (Ullmer u. Ishii, 1997) beschreiben die Verknüpfung von digitalen, interaktiven Systemen und der physikalischen Welt durch Objekte, die die direkte Steuerung der digitalen Inhalte ermöglichen. Besonders der metaDESK stellt unterschiedliche Arten von Objekten zur Repräsentation von Informationen und der direkten Steuerung des interaktiven Systems vor. TUIs haben sich seitdem als eigene Interfacekategorie in der Forschung etabliert. Vor allem für horizontale interaktive Displays wurde mittlerweile eine Vielzahl an unterschiedlichen Systemen vorgestellt.

Eine Mischung aus grafischer Benutzeroberfläche und physikalischen Objekten stellen die DataTiles dar (Rekimoto u. a., 2001). Sie bestehen aus einzelnen, transparenten Objekten, die vom Nutzer in einer beliebigen Anordnung kombiniert werden können (siehe Abbildung 5.2 links). Da grafische Interface-Elemente direkt mit den Objekten verbunden sind, beeinflusst die Anordnung der physikalischen Objekte das Aussehen und die Funktionsweise des Systems. Der Nutzer kann sich durch das Manipulieren physikalischer Objekte die gewünschte grafische Benutzeroberfläche erstellen. Ebenfalls auf transparenten, rechteckigen Objekten basieren die Tangible Tiles (Waldner u. a., 2006). Zusätzlich zur direkten Gestaltung der grafischen Oberfläche durch das Manipulieren der Objekte bieten die Tangible Tiles dedizierte Objekte, die die Funktion von Werkzeugen übernehmen. In einer Studie wurde das System

mit einem reinen Touch-Display und einem System aus Papier getestet. Dabei wurden zwar Schwächen im Konzept der Tangible Tiles, aber auch Vorteile des Systems hinsichtlich der Zusammenarbeit und einer natürlichen Interaktion mit dem System aufgedeckt. Die Kollaboration mehrerer Nutzer wurde auch in einer Studie am reactTable untersucht (Jordà u. a., 2007). Dabei wurde gezeigt, dass physikalische Objekte eine Verteilung von Funktionen an die Nutzer erlauben und dadurch eine implizite Zugriffskontrolle auf einzelne Funktionen realisieren (siehe Abbildung 5.2 rechts).



Abbildung 5.2: Die DataTiles (Rekimoto u. a., 2001) ermöglichen das einfache Konfigurieren der grafischen Benutzeroberfläche durch den Austausch physikalischer Objekte (links). Der reactTable (Jordà u. a., 2007) nutzt physikalische Objekte zur kollaborativen Erstellung von Musikstücken auf einem runden Tisch (rechts).

Diese Zugriffskontrolle setzen auch die SlapWidgets implizit um (Weiss u. a., 2009b). Durch transparente Materialien ermöglichen sie zum einen die Darstellung digitaler Inhalte in den physikalischen Objekten. Zum andere lassen sie einen Nutzer Inhalte direkt bearbeiten, die auf der Displayoberfläche dargestellt werden. Dabei können einzelne Funktionen fest an bestimmte Objekte gebunden werden, so dass der Zugriff auf diese Funktionen durch die Anzahl der verfügbaren Objekte beschränkt wird.

Ebenfalls auf lichtdurchlässigen Elementen basieren die Luminos (Baudisch u. a., 2010). Sie erlauben das Kombinieren mehrerer Objekte, wobei das System sogar gestapelte Objekte erkennt. Das System erlaubt dadurch beispielsweise die schnelle Konstruktion einfacher Gebäudeformen, so dass etwa die Auswirkung zusätzlicher Stockwerke auf einem Gebäude direkt auf der interaktiven Oberfläche dargestellt werden kann.

Basierend auf all diesen Ideen konnten verschiedene Arbeiten seitdem zeigen, dass TUIs eine genauere Interaktion (Hancock u. a., 2009b) oder eine erweiterte Nutzungserfahrung (Jordà u. a., 2007) bieten. Ein TUI am Curve soll die wesentlichen Vorteile (Transparenz, zusätzliche Interaktionsdimension) dieser Systeme ebenfalls umsetzen. So kann am ehesten sichergestellt werden, dass die identifizierten Vorteile von TUIs auch auf den Displaybereichen des Curve zur Geltung kommen. Dazu ist es allerdings erforderlich, dass die Steuerungsobjekte auch auf beiden planaren Displaybereichen genutzt werden können und nicht herunterfallen.

Neben diesen klassischen TUIs beschäftigen sich auch einige Projekte mit der Umsetzung eines TUIs auf angewinkelten oder vollständig vertikalen Oberflächen. Dabei kam *Magnetismus* immer wieder als Hafttechnik zum Einsatz. Ein erster Ansatz, der Magnete einsetzt, ist das transBOARD (Ishii u. Ullmer, 1997). Hier dienen physikalische Karten, die magnetisch an einem digitalen Whiteboard haften, dazu Aufzeichnungen zu speichern und später zugänglich zu machen. Die Karten beinhalten eindeutige Adressen unter denen diese gespeicherten Informationen später abrufbar sind. Durch die Kopplung der Informationen an eine physikalische Karte ("hyperCARD") werden die Informationen für den Nutzer greifbar. Sie können mitgenommen und später zum einfachen Zugriff auf die Informationen genutzt oder weitergegeben werden.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt das Senseboard (Jacob u. a., 2002), das zur Organisation von Informationen entworfen wurde. Das System kombiniert dabei abstrakte digitale Daten und verbindet sie mit magnetischen Bausteinen, die auf einem vertikalen Arbeitsbereich angeordnet werden können. Die Autoren betonen besonders die Vorteile der einfacheren Zusammenarbeit mehrerer Personen und der Möglichkeit zur zweihändigen Interaktion. Zusätzlich zu den einfachen "Pucks", die Informationen repräsentieren, bietet das System weitere Bausteine um sich Details anzeigen zu lassen oder mehrere Objekte zu gruppieren.

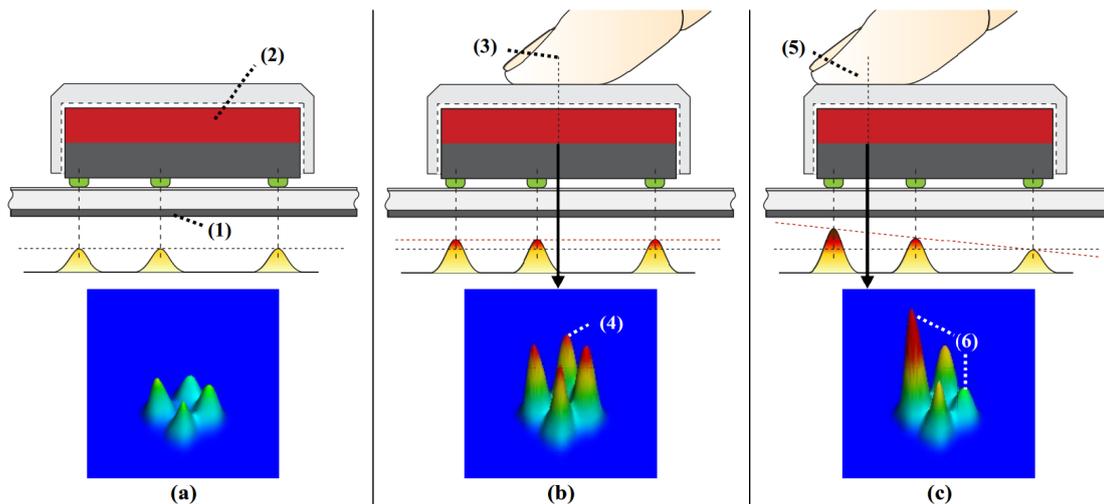


Abbildung 5.3: Die Geckos nutzen mehrere Magnete zur Objekterkennung. Das System erlaubt außerdem die Interaktion mittels Druck: (a) Eine Metallplatte (1) unter der drucksensitiven Platte ermöglicht (2) den magnetischen Objekten auch auf vertikalen Flächen genutzt werden. (b) Außerdem kann (3) Druck zur Interaktion genutzt werden, der in einem höheren Anpressdruck des Objekts resultiert (4). (c) Druck an den Rändern des Objekts (5) wird aufgrund der ungleichen Druckverteilung (6) ebenfalls erkannt (Leitner u. Haller, 2011).

Einen Schritt weiter gehen die Geckos (Leitner u. Haller, 2011) (siehe Abbildung 5.3). Dieses TUI setzt zwar auch auf Magnetismus als Hafttechnik, im Gegensatz zu den bisherigen Ansätzen werden hier aber mehrere Magnete innerhalb eines Objekts genutzt. Mit Hilfe einer drucksensitiven Platte im Display können so die Positionen der einzelnen Magnete exakt

bestimmt werden. Wie schon bei den SlapWidgets (Weiss u. a., 2008) werden die Entfernungen dieser Punkte zueinander dazu verwendet die Objekte zu identifizieren. Doch im Unterschied zu diesen können die Geckos nur durch eine Frontprojektion um digitale Inhalte erweitert werden. Allerdings erlaubt die drucksensitive Platte in der Displayfläche die Interaktion mittels Druck. Das System erkennt ob und wo der Nutzer auf ein Objekt drückt und reagiert entsprechend darauf. Auf diese Weise ist es möglich die Geckos als physikalische Knöpfe zu nutzen oder sogar einzelne Regionen der Objekte selektierbar zu machen (siehe Abbildung 5.3).

Alle Systeme, die auf diese oder vergleichbare Weise Magnete zur Haftung einsetzen, sind während der Nutzung einfach verschieb- und drehbar. Außerdem ist die Haftstärke durch die Wahl der Magnete vorab konfigurierbar und die Magnete können auch zur direkten Beeinflussung der Objekte genutzt werden (Weiss u. a., 2010a). Ein Nachteil dieser Technik ist jedoch die Notwendigkeit einer ferromagnetischen Unterlage an der die Magnete haften. Zwar gibt es auch die Möglichkeit diese ferromagnetische Schicht nahezu transparent in die Displayoberfläche zu integrieren (Tseng u. a., 2011) doch macht dies die Fertigung von funktionierenden Prototypen kompliziert.

Neben Magnetismus werden auch andere Hafttechniken für TUIs auf vertikalen Flächen genutzt. Der Designer's Outpost (Klemmer u. a., 2001) etwa nutzt Post-It Notes mit **wiederverwendbarem Klebstoff** zur Interaktion mit einem digitalen Whiteboard. Das System unterstützt Designer einer Webseite beim Strukturieren der Inhalte und der Seite. Dazu beschreiben die Nutzer Post-It Notes per Hand und befestigen sie auf dem Whiteboard. Anschließend verbinden sie die einzelnen Objekte per Hand mit gezeichneten Linien. Mit Hilfe einer hochauflösenden Kamera wird das gesamte Whiteboard digitalisiert und der Inhalt einzelner Post-It Notes gespeichert. Durch eine Frontprojektion kann so der Inhalt eines vergangenen Meetings jederzeit wieder dargestellt, neu strukturiert und durch weitere Post-It Notes ergänzt werden. Die vertikale Ausrichtung der Arbeitsfläche unterstützt dabei die Arbeit im Team, da jeder Nutzer eine gute Übersicht über den Arbeitsbereich hat.

Systeme, die wiederverwendbare Klebflächen nutzen, haben jedoch das Problem, dass die Objekte während der Nutzung nicht verschiebbar sind. Sie müssen zum Neuplatzieren von der Oberfläche entfernt und neu angebracht werden. Im Laufe der Zeit verringert dies die Haftkraft des Klebstoffs, so dass die Objekte nach einer Weile nicht mehr haften. Dann sind die Objekte nicht mehr nutzbar bzw. der Klebstoff muss erneuert werden.

Einen weiteren Ansatz um Objekte an vertikalen Flächen anzubringen zeigt Pin&Play (Laerhoven u. a., 2002). Dieses System nutzt eine umgebaute Pinnwand und unterschiedlich lange Pins auf der Rückseite der Steuerungsobjekte. Die Pinnwand selbst besteht aus einer Kombination mehrerer Schichten von denen zwei Schichten aus leitenden Materialien bestehen. Die Pin&Play-Objekte verfügen über zwei unterschiedlich lange Pins, die beim Anstecken an die Pinnwand einen Kontakt zwischen diesen zwei leitenden Schichten herstellen. Durch die Verbindung wird erkannt welche Objekte aktuell angesteckt sind. Zwar ist mit dieser Technik keine Positionserkennung möglich, es können jedoch einzelne Objekte gezielt angesteuert werden, um sie beispielsweise blinken zu lassen. Die Autoren schlagen vor mit diesen Möglichkeiten auf bestimmte Dokumente, die an der Pinnwand befestigt sind, gezielt

aufmerksam zu machen. So könnte das System den Nutzer beispielsweise über anstehende Fristen oder wieder zu prüfende Dokumente informieren.

Ähnlich wie die Systeme auf Klebstoffbasis bietet auch dieser Ansatz nicht die Möglichkeit die Objekte direkt zu verschieben. Stattdessen müssen sie aus der Oberfläche herausgezogen und anschließend an der neuen Position wieder hineingesteckt werden. Im Gegensatz zum Klebstoff-Ansatz nutzen sich die Pins jedoch nicht ab und können theoretisch beliebig häufig verwendet werden. Da diese Technik jedoch keine Positionserkennung erlaubt und das Durchstechen der Oberfläche andere Tracking-Technologien auf Dauer beschädigen würde, kommt sie für ein TUI am Curve nicht in Frage.

Eine aktive Technik um Objekte an beliebigen Oberflächen anzubringen ist **Elektro-Adhäsion** (Allison u. a., 2004). Sie basiert auf der elektrostatischen Anziehungskraft, die entsteht, wenn ein elektrisches Feld zwischen zwei Polen angelegt wird. Diese Kraft ist je nach genutzter Spannung stark genug um ferngesteuerte Roboter eine senkrechte Wand hinauf fahren zu lassen (Prahlad u. a., 2008). Die hierfür benötigten Spannungen steigen allerdings mit dem Gewicht des angehefteten Objekts stark an.

Ein großer Nachteil dieser Technik ist die benötigte aktive Stromversorgung. Entweder benötigt jedes Objekt eine eigene Spannungsversorgung, die über Kabel oder Batterien erfolgt, oder die Oberfläche selbst muss ein ausreichend starkes elektrostatisches Feld erzeugen. Da die Oberfläche jedoch auch vom Benutzer berührt werden soll, scheidet die Elektro-Adhäsion als Hafttechnik im Rahmen dieses Projekts aus.

Die letzte technische Möglichkeit, die im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wurde, ist die **vakuum-basierte Adhäsion**. Hierbei werden mikroskopisch kleine Saugnäpfe in der Oberfläche eines Materials genutzt um eine Haftkraft zwischen dem Adhäsionsmaterial und einer Oberfläche zu erreichen. Aufgrund der Einfachheit und der oberflächen-schonenden Eigenschaften wird diese Haft-Technik mittlerweile sogar für den Bau von TUIs auf tragbaren Tablet-Computer genutzt (Jansen u. a., 2012).

Jede der hier vorgestellten Techniken hat also eigene Anforderungen an die Displayoberfläche und schränkt die Interaktionsmöglichkeiten mit den Objekten auf die eine oder andere Art ein. Abbildung 5.4 führt die jeweiligen Einschränkungen hinsichtlich der Tracking- und Darstellungstechnologien auf. Zusätzlich werden die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Gestaltungsmöglichkeiten der Steuerungsobjekte verglichen. Während jede der vorgestellten Techniken mindestens eine Einschränkung mit sich bringt, bietet die Vakuum-Adhäsion eine größtmögliche Kompatibilität mit unterschiedlichen Darstellungs- und Tracking-Systemen. Gleichzeitig ergibt sich durch das Haftungsmaterial ein großer Gestaltungsspielraum beim Design der Objekte. Aus diesem Grund wurde die Vakuum-Adhäsion im Rahmen des Vertibles-Projekts (Hennecke u. a., 2012b; Vodicka, 2011; Grabs, 2010) als Grundlage für die TUI-Entwicklung am Curve genutzt. Weiterführende Details zu Design und Umsetzung der Vertibles, sowie einer Studie zur TUI-Nutzung am Curve finden sich im nächsten Abschnitt.

	Optisches Tracking	Resistives Tracking	Kapazitives Tracking	Induktives Tracking	Frontprojektion	Rückprojektion	LCD	Transparent	Passiv	Verschiebbar	Wiederverwendbar
Vakuum-Ädhäsion	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
Magnetismus	✓	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	✓	✓
Klebstoff	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
Elektro-Ädhäsion	✓	✓	-	-	✓	✓	*	-	-	✓	✓

*) Keine Bewertung möglich: Ein LCD wurde nicht durch ein Elektro-Ädhäsions-Pad beeinflusst. Allerdings hielt das Pad auch nicht am Display.

Abbildung 5.4: Die verschiedenen Haft-Techniken haben jeweils unterschiedliche Anforderungen und Auswirkungen auf die nutzbaren Tracking- und Darstellungstechnologien für interaktive Oberflächen. Außerdem unterscheiden sie sich im Hinblick auf die Gestaltungsmöglichkeiten der eigentlichen Objekte (nach Hennecke u. a., 2012b).

5.2 Vertibles

Der Name *Vertibles* ist ein Überbegriff für mehrere separate Objekte (Widgets), die verschiedene Funktionen bieten. Durch die Nutzung vakuum-basierter Adhäsion sind die Vertibles am Curve sowohl auf dem horizontalen als auch auf dem vertikalen Displaybereich nutzbar. Als Einstieg beschreibt dieser Abschnitt⁵ die technische Umsetzung der Vertibles (Grabs, 2010; Hennecke u. a., 2012b). Neben der Haftung auf vertikalen Flächen ermöglichen die Vertibles auch die Erkennung von Druck, den ein Nutzer auf die physikalischen Objekte ausübt. Dieser Druck kann als zusätzlicher Eingabekanal genutzt werden. Die genauen technischen Details werden ebenso beschrieben wie eine explorative Studie, die die Nutzung von Druck auf Basis optischer Trackingmethoden untersucht (Berwein, 2011; Hennecke u. a., 2011).

Nach diesen technischen Grundlagen wird eine weitere explorative Studie beschrieben, in der untersucht wurde ob und wie ein TUI am Curve genutzt werden kann. Dazu wurde die Nutzung physikalischer Objekte auf dem horizontalen mit der Nutzung auf dem vertikalen Displaybereich des Curve verglichen. Um einen Anreiz zur häufigen Interaktion zu schaffen, wurde für die Studie ein Tower-Defense-Spiel⁶ entwickelt, das physikalische Türme zur Steuerung nutzt (Tuchina, 2012).

⁵ Der Inhalt dieses Abschnitts basiert auf einer publizierten Arbeit (Hennecke u. a., 2012b). Die Autoren der Veröffentlichung sind Fabian Hennecke, Raphael Wimmer, Eduard Vodicka und Andreas Butz. Die zugrunde liegenden Arbeiten wurden von Eduard Vodicka im Rahmen seiner Diplomarbeit (Vodicka, 2011), von Stefan Grabs im Rahmen seiner Bachelorarbeit (Grabs, 2010) und von Anna Tuchina in ihrer Projektarbeit (Tuchina, 2012), alle betreut von Fabian Hennecke, umgesetzt.

⁶ http://de.wikipedia.org/wiki/Tower_Defense, zuletzt aufgerufen am 29.07.2013

5.2.1 Grundprinzip

Dieser Abschnitt beschreibt sowohl die Grundlagen vakuum-basierter Adhäsion als auch die Konstruktion der Vertibles, die diese Hafttechnik berücksichtigt und nutzbar macht. Bei der Konstruktion wurden zwei verschiedene adhäsive Materialien untersucht. Diese werden im folgenden Abschnitt vorgestellt und deren Eignung für den Bau eines TUI anhand der gemachten Erfahrungen bewertet.

Vakuum-basierte Adhäsion

Mit vakuum-basierter Adhäsion wird in dieser Arbeit eine Haftkraft beschrieben, die auf unzähligen, mikroskopisch kleinen Saugnäpfen innerhalb einer Oberfläche beruht. Diese Saugnäpfe haften beim Andrücken an nahezu jeder glatten und sauberen Oberfläche (siehe Abbildung 5.5 links). Aufgrund ihrer Anzahl entsteht trotz der geringen Größe der einzelnen Saugnäpfe eine beachtliche Haftkraft. Da die berührungsempfindlichen Oberflächen vieler Touch-Displays glatt sind, eignet sich diese Hafttechnik für nahezu jede beliebige Touchoberfläche (Hennecke u. a., 2012b; Jansen u. a., 2012).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Materialien getestet, die auf vakuum-basierter Adhäsion beruhen. Das erste Material ist ein *Nano-Pad* der Firma Inotec⁷. Dieses etwa 1 mm dicke Material wird eigentlich als Befestigungsmittel für Sonnenbrillen auf dem Armaturenbrett im Automobilbereich beworben. Im Laufe dieses Projekts hat sich gezeigt, dass die Haltbarkeit und die Haftkraft sehr gut für einen längeren Gebrauch als TUI-Haftmaterial geeignet sind. Allerdings war zum Zeitpunkt dieser Arbeit kein transparentes Nano-Pad erhältlich, so dass dies das Objektdesign teilweise einschränkt.

Das zweite Material ist eine Displayschutzfolie der Firma mumbi⁸. Diese vollständig transparente Folie ist extrem dünn, allerdings weniger flexibel als ein Nano-Pad. Wie sich herausgestellt hat, verliert die Folie jedoch auch ohne häufiges Benutzen auf Dauer einen großen Teil ihrer Haftkraft. Sie ist daher nicht für langfristig angelegte Konstruktionen geeignet.

Konstruktion der Vertibles

Dieser Abschnitt beschreibt Details zum Design und zum Konstruktionsprozess der Vertibles. Dazu werden zunächst die einzelnen Designs für jedes Objekt der Vertibles vorgestellt. Anschließend wird im Rahmen des Prototypings genauer auf die Konstruktion der einzelnen Objekte und ihren Funktionsumfang eingegangen.

Das Design und der Funktionsumfang der Vertibles orientiert sich an den SlapWidgets (Weiss u. a., 2008, 2009a). Genau wie diese sind die Vertibles transparent und bieten verschiedene Interaktionen an (siehe Abbildung 5.5 (rechts)). Durch das transparente Material sind die Objekte generisch gestaltet und nicht auf einen speziellen inhaltlichen Bereich beschränkt. Ziel des Objektdesigns war es eine große Auswahlmöglichkeit an verschiedenen

⁷ <http://www.nano-pad.com/de/index.html>, zuletzt aufgerufen am 30.07.2013

⁸ <http://mumbi.de>, zuletzt aufgerufen am 30.07.2013

Eingabeobjekten zu bieten. Durch die optische Erkennung von Druck (siehe Abschnitt 5.2.2) können alle Vertibles zusätzlich zu den beschriebenen Funktionen auch als Knopf bedient werden.

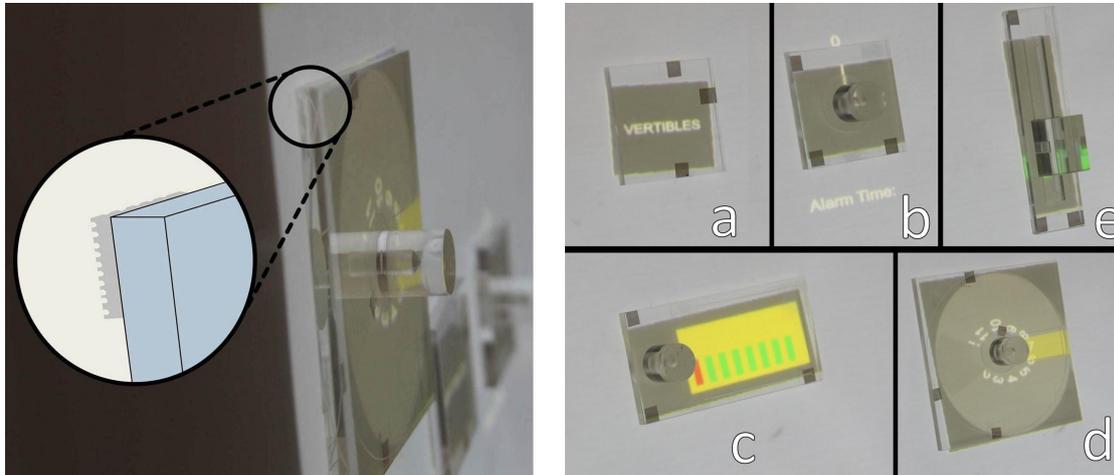


Abbildung 5.5: Die Saugnäpfe der adhäsiven Schicht befinden sich unterhalb der Objekte und sind zur interaktiven Oberfläche hin ausgerichtet (links). Die Vertibles bestehen aus mehreren Widgets: (a) Platte, (b) Drehknopf, (c) Scrollbox, (d) Auswahlbox und (e) Regler (rechts) (Hennecke u. a., 2012b).

Design Das einfachste Widget der Vertibles ist die **Platte**. Sie ist quadratisch und hat keinerlei bewegliche Elemente oder sonstige Kennzeichnungen. Durch die quadratische Form kann die Platte daher beliebig rotiert werden. Außer durch einen eventuell sichtbaren Marker erhält der Nutzer keinen Hinweis darauf welche Seite des Objekts vom System als 'oben' interpretiert wird.

Die Grundplatte des **Drehknopfs** hat dieselben Maße wie die Platte. In die Mitte der Grundplatte ist jedoch ein zusätzlicher Knopf eingelassen. Dieser kann gedreht werden ohne das Objekt selbst bewegen oder abheben zu müssen.

Einen ähnlichen Aufbau haben auch die **Scrollbox** und die **Auswahlbox**. Sie unterscheiden sich vom Drehknopf vor allem durch die Maße der Grundplatten. Während die Auswahlbox eine vergrößerte Version des quadratischen Drehknopfs darstellt, ist die Scrollbox ein längliches Rechteck mit dem Drehknopf auf einer Seite. Bei beiden Widgets sind durch gravierte Linien vordefinierte Bereiche auf den Grundplatten markiert. Diese Bereiche geben die Struktur vor, mit denen Inhalte in den Objekten dargestellt werden. So zeigt die rechteckige Markierung auf der Scrollbox zum Beispiel das selektierte Element in einer runden Auswahlliste (siehe Abbildung 5.5 (d)). Durch die gravierten Linien sind diese Aufteilungen auch vor der eigentlichen Interaktion sichtbar und unterstützen den Nutzer so bereits bevor er das Objekt auf der Oberfläche platziert.

Die letzte Objektvariante ist der **Regler**. Dieses längliche, rechteckige Objekt verfügt entlang der Mittelachse über einen verschiebbaren Knopf. Im Gegensatz zur Scrollbox und zur

Auswahlbox ist auf dem Regler keine weitere Markierung eingraviert (siehe Abbildung 5.5 (e)).

Umsetzung Der eigentlichen **Konstruktion** ging nach einem ersten Brainstorming zu den konkreten Objektformen und -funktionen eine Prototyping-Phase voraus. Dabei wurden verschiedene Größen der einzelnen Komponenten (Grundplatten, Knöpfe) kombiniert und in Form einfacher Prototypen (Holz, 3D-Druck) angefertigt. So konnten die ungefähren Dimensionen der einzelnen Objekte nach dem Brainstorming weiter konkretisiert werden. Die finale Konstruktion wurde von einer lokalen Firma für Kunststoffverarbeitung⁹ übernommen. Die Entwürfe wurden dazu in Zusammenarbeit mit der Firma noch einmal überarbeitet, um deren Umsetzbarkeit zu gewährleisten. Abbildung 5.6 zeigt exemplarisch den Entwicklungsprozess des Reglers. Die großen weißen Filzpunkte auf dem finalen Objekt wurden während der Entwicklung zur Objekterkennung genutzt. Sie wurden im Laufe der Zeit durch kleinere Punkte aus Papier ersetzt.



Abbildung 5.6: Der Entwicklungsprozess des Reglers startete mit zwei nicht-funktionalen Holz- (links) und gedruckten (rechts) Prototypen. Die finale Version mit Tracking-Punkten (rechts) wurde von einer externen Firma gefertigt (Grabs, 2010).

Um die Vertibles mit Hilfe dieser Punkte zu erkennen und zu verfolgen mussten die **Hard- und Software** des Curve angepasst werden. Dazu wurde der Curve um ein einfaches DI-Setup aus mehreren IR-Strahlern erweitert (siehe Abschnitt 2.1.2). Die Schwierigkeit bestand darin, dass in den Kamerabildern keine Reflexionen der Strahler sichtbar sein durften, da sonst das optische Tracking beeinflusst worden wäre.

Zum anderen musste die Tracking-Software an zwei wesentlichen Stellen angepasst werden. Die erste Anpassung fand in der Konfiguration der vier einzelnen libTISCH-Instanzen statt. Hier wurden die Parameter der Bildfilter für jede Kamera so angepasst, dass auch DI-basierte Punkte erkannt werden. Ohne die Anpassung wurden nur sehr helle FTIR-Punkte erkannt, wie sie im bisherigen Betrieb des Curve genutzt wurden, nicht aber die weniger leuchtstarken DI-basierten Punkte.

Die zweite wichtige Anpassung fand in der Software zur Eingabeentzerrung statt. Hier wurde eine einfache Markererkennung, basierend auf vordefinierten Abständen zwischen mehreren Punkten, implementiert. Der verwendete Algorithmus vergleicht alle erkannten Eingabepunkte und deren Abstände zueinander. Findet er zwischen den gespeicherten Abständen

⁹ <http://www.hokun.de>, zuletzt aufgerufen am 30.07.2013

eines Markers und den erkannten Abständen zwischen den Eingabe-Punkten eine Übereinstimmung (Pattern), fasst er die jeweiligen Punkte in einem Objektmarker zusammen. Dieses Verfahren erlaubt jedoch nur wenige eindeutige Objektmarker von der Größe der Vertibles. Außerdem ist es je nach Anzahl der verwendeten Markerpunkte relativ fehleranfällig. Diese Nachteile wurden aufgrund der einfachen Umsetzbarkeit jedoch in Kauf genommen. Bei einer Weiterentwicklung der Vertibles sollten diese Probleme jedoch unbedingt berücksichtigt werden.

5.2.2 Druckererkennung

Im Verlauf des Vertibles-Projekts entstand die Idee die Kombination aus weißen Marker- und schwarzen Nano-Pad-Punkten für eine optische Druckererkennung auszunutzen¹⁰. Neben den Freiheitsgraden, die üblicherweise für die Interaktion mit Objekten zur Verfügung stehen (Position, Rotation) (Kaltenbrunner u. Bencina, 2007), stellt Druck eine weitere Möglichkeit der Interaktion dar. Es existieren verschiedene Ideen und Vorschläge wie Druck mit optischem Tracking auch bei sehr einfachen Objekten genutzt werden kann (Kakehi u. a., 2008; Weiss u. a., 2008). Darüber hinaus existieren auch Systeme, die ein Steuerungsobjekt mechanisch erweitern, um eine optische Druckererkennung zu ermöglichen (Weiss u. a., 2009a). Eine Vielzahl von Systemen setzt jedoch nicht auf optische, sondern auf elektronische Druckmessung. Diese führt jedoch zu komplexen Objekten und bringt weitere Probleme wie Stromversorgung und einen erhöhten Wartungsbedarf mit sich (Ramos u. a., 2004; Marquardt u. a., 2009; Leitner u. Haller, 2011).

Dieser Abschnitt beschreibt die grundlegende Idee hinter der optischen Druckererkennung, die auf einer Kombination von FTIR- und DI-Tracking aufbaut (siehe Abschnitt 2.1.2). Diese Kombination der beiden Trackingverfahren kann auch durch ein DSI-Setup ersetzt werden, wie es in Abschnitt 2.1.2 beschrieben wird. Dabei streut eine spezielle Plexiglasplatte¹¹ von den Kanten aus einfallendes Licht gleichmäßig über die gesamte Fläche. Zusätzlich tritt aber auch ein FTIR-ähnlicher Effekt bei Berührung ein. Diese Kombination der Eigenschaften der beiden Trackingverfahren erlaubt die Nutzung zweier Markerdesigns für *binäre* und für *kontinuierliche* Druckinteraktion. Zusätzlich zu den Konstruktionsgrundlagen wird auch eine erste Studie zur Verwendung kontinuierlicher Druckeingabe vorgestellt.

¹⁰Der Inhalt dieses Kapitels basiert auf einer publizierten Arbeit (Hennecke u. a., 2011). Die Autoren der Veröffentlichung sind Fabian Hennecke, Franz Berwein und Andreas Butz. Die zugrunde liegenden Arbeiten wurden von Franz Berwein im Rahmen seiner Diplomarbeit (Berwein, 2011) und Lenz Belzner im Rahmen seiner Projektarbeit (Belzner, 2011), beide betreut von Fabian Hennecke, umgesetzt.

¹¹Endlighten T von Evonik, <http://www.plexiglas.de/product/plexiglas/de/produkte/massivplatten/endlighten/pages/default.aspx>, zuletzt aufgerufen am 02.08.2013

Grundprinzip

Zur optischen Erkennung von Druck als Eingabekanal können zwei Ansätze genutzt werden (Hennecke u. a., 2011). Beide Ansätze basieren auf einem gewöhnlichen Marker für Objekttracking und erweitern diesen um dynamische Markerpunkte. Diese dynamischen Markerpunkte sind für das System nur sichtbar, wenn der Nutzer das Objekt auf die Displayoberfläche drückt.

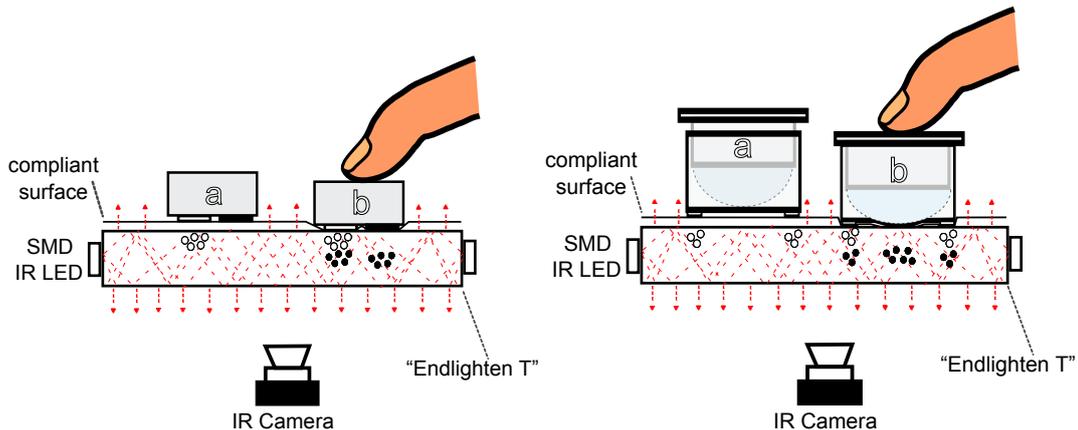


Abbildung 5.7: Die optische Druckererkennung kann sowohl binär mittels NoC erfolgen (links), als auch kontinuierlich durch ein flexibles Bauteil bei AoC (rechts) (Hennecke u. a., 2011). Sowohl NoC als auch AoC führen unter Druck (b) zu einer Veränderung der normalen Marker (a).

Number of Contacts Der erste Ansatz, der direkt von den Vertibles abgeleitet ist, ist Number of Contacts (NoC, 'Anzahl der Kontakte'). NoC unterstützt die Objektzustände *Kein Druck* und *Druck* (siehe Abbildung 5.7 links). Die Unterscheidung der beiden Zustände funktioniert durch zusätzliche Punkte unterhalb des Objekts, die für die Kamera erst sichtbar werden, wenn das Objekt auf die Oberfläche gedrückt wird. Ohne Druck sieht das System nur den normalen DI-basierten Marker, der aus weißen Pads unter dem Objekt besteht und das infrarote Licht reflektiert. Drückt der Nutzer das Objekt auf das Display, werden die zusätzlichen schwarzen Pads durch FTIR-basierte Punkte im Kamerabild sichtbar. Auf diese Weise können sowohl die Position und die Rotation ohne Druck festgestellt werden, als auch ein binäres Drucksignal (*Kein Druck, Druck*).

Auf die Vertibles übertragen sind für eine NoC-Druckererkennung keine zusätzlichen Marker-pads erforderlich. Sowohl die schwarzen Nano-Pads als auch die transparente Folie (siehe Abschnitt 5.2.1) sind durch die Beleuchtung eines DI-Aufbaus nicht im Kamerabild sichtbar. Drückt man die Pads jedoch auf die Oberfläche, lösen sie, wie oben beschrieben, einen FTIR-Effekt aus und werden sichtbar. Dies bedeutet, dass jedes Widget der Vertibles ohne Weiteres dazu geeignet ist binäre Druckinformationen zu übermitteln. Die einzige Anforderung an das System ist die bereits beschriebene Kombination von DI und FTIR oder die Nutzung einer DSI-kompatiblen Plexiglasplatte.

Area of Contact Der zweite Ansatz der optischen Druckmessung ist Area of Contact (AoC, 'Fläche des Kontakts'). AoC erlaubt das Erkennen verschiedener Stufen einer Druckeingabe und bietet dem Nutzer je nach Konstruktion auch haptisches Feedback in Form eines höheren Kraftaufwands je höher der Eingabedruck ist. Im Gegensatz zu NoC nutzt AoC nicht mehrere zusätzliche Pads unter dem Objekt sondern ein verformbares Element im Objekt. In der aktuellen Konstruktion ist dieses Element eine transluzente Halbkugel aus Silikon (siehe Abbildung 5.8 rechts). Um die Reibung zwischen der Halbkugel und der Displayoberfläche zu minimieren, wurde eine gleitfähige Folie auf der Objektunterseite angebracht. Ähnlich wie die zusätzlichen Pads bei NoC löst diese Halbkugel unter Druck einen FTIR-basierter Leuchtpunkt im Kamerabild aus. Erhöht der Nutzer den Druck auf das Objekt, verformt sich die Halbkugel und die Kontaktfläche zwischen der Halbkugel und der Displayoberfläche vergrößert sich. Das System erkennt diese Veränderung und interpretiert sie als Druck. Solange diese Fläche bei maximaler Ausdehnung den eigentlichen Objektmarker nicht beeinflusst, lassen sich auch mit AoC Position, Rotation und Druckeingabe gleichzeitig erkennen. Im Gegensatz zu NoC kann AoC nicht ohne Weiteres auf die Vertibales übertragen werden. Die in dieser Arbeit getestete Silikon-Halbkugel ist für die Haftkraft der vorgestellten Adhäsionsfolien zu schwer. Zwar ist es denkbar ein kleineres verformbares Element zu verbauen, jedoch erhöht dies die Anforderungen an die Tracking-Genauigkeit. Ein kleineres flexibles Element verursacht unter Druck auch nur eine kleine Veränderung der Kontaktfläche und damit des FTIR-Punkts. Bei gleichbleibender Trackingauflösung bedeutet dies, dass das verformbare Element nicht beliebig klein gewählt werden kann. Ein ähnliches Problem wurde auch schon bei den ersten Konstruktionsüberlegungen der SlapWidgets (Weiss u. a., 2008) beschrieben.

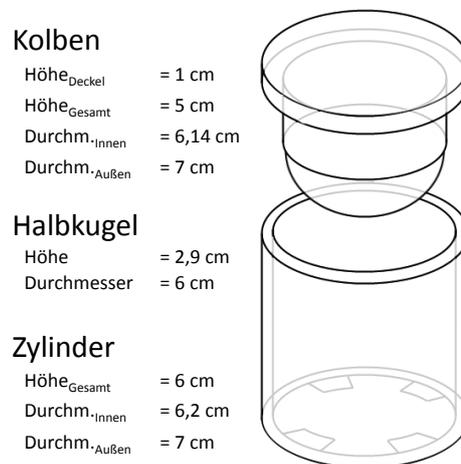


Abbildung 5.8: Eine verformbare Silikonhalbkugel auf einem beweglichen Kolben erlaubt eine kontinuierliche Druckmessung mittels AoC-Verfahren mit optischem Tracking.

Explorative Studie

Um herauszufinden, ob die Nutzung einer flexiblen Silikon-Halbkugel zur optischen Druckmessung geeignet ist, wurde eine explorative Studie mit 12 Teilnehmern durchgeführt (Berwein, 2011). Die Aufgabe während der Studie bestand darin sechs verschiedene Druckstufen gezielt anzusteuern und für die Dauer einer Sekunde zu halten. Während der Studie erhielten die Teilnehmer visuelles Feedback über die gemessene Druckstärke und die zu erreichende Druckstufe. Vor Beginn der eigentlichen Messungen konnten sie sich mit dem Objekt und der Druckeingabe vertraut machen (siehe Abbildung 5.9 links). Anschließend wurde der genutzte Druckbereich für jeden Nutzer individuell konfiguriert. Dazu wurden sie gebeten die persönlichen minimale und die persönliche maximale Druckstufe selbst zu definieren. Diese dienten in der Studie dann als Referenzrahmen für die Umrechnung der Kontaktfläche in Druck.

Der gemessene Druck wurde durch einen sich verändernden Balken, der bei großem Druck länger wurde, und die zu treffende Druckstufe als eingegrenzter Bereich dargestellt (siehe Abbildung 5.9 rechts). Ziel der Studie war es erste Erkenntnisse zu sammeln wie viele Druckstufen mit einem AoC-Marker zielsicher getroffen werden können und ob die Interaktion auf Dauer ermüdend ist.

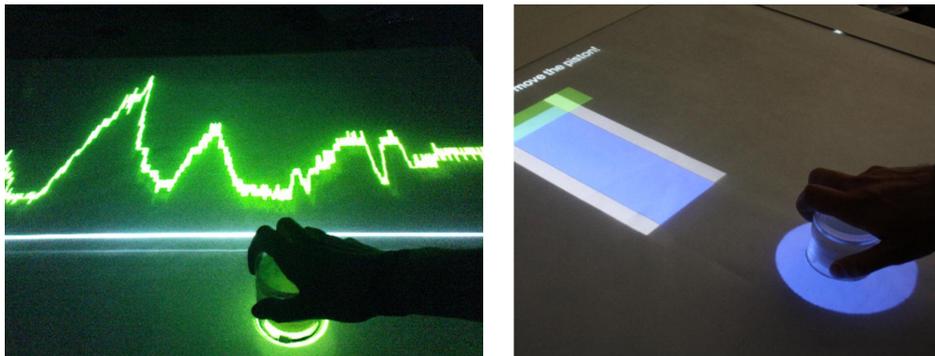


Abbildung 5.9: Die Teilnehmer der Studie konnten sich zunächst mit der Druckeingabe mit Hilfe des Objekts vertraut machen (links). Anschließend sollten sie vorgegebene Druckstufen treffen und für kurze Zeit halten (rechts).

An dieser Stelle werden die wichtigsten Ergebnisse der Studie zusammengefasst. Eine ausführliche Auswertung der quantitativen Messdaten findet sich in der zugrundeliegenden Diplomarbeit (Berwein, 2011). Die Messungen der Studie haben gezeigt, dass das AoC-Objekt (siehe Abbildung 5.8) die problemlose Ansteuerung von bis zu sechs Druckstufen ermöglicht. Zwischen den einzelnen Druckstufen konnten keine Unterschiede in der benötigten Zeit bis zum erfolgreichen Ansteuern gefunden werden. Jedoch zeigte sich über die vier Wiederholungen der Teilnehmer ein deutlicher Lerneffekt - das Ansteuern der vorgegebenen Druckstufe ging im Laufe der Studie immer schneller.

Die Beobachtungen während der Studie haben gezeigt, dass die Nutzer das Objekt unterschiedlich festgehalten haben und auch den Druck auf verschiedene Arten ausgeübt haben. Einige Nutzer kontrollierten das Objekt vollständig mit einer Hand, während andere eine

Hand zur Kontrolle über das Objekt nutzten und die zweite Hand zum Ausüben des Drucks. Die Greiftechniken hatten dabei allerdings keinen Einfluss auf die Interaktionen oder die wahrgenommene Ermüdung im Laufe der Studie.

Darüber hinaus war eine wichtige Erkenntnis, dass der zuvor definierte, persönliche Druckbereich einen maßgeblichen Einfluss auf die Genauigkeit und damit die Benutzbarkeit des Systems hat. Ist der persönlich eingestellte Maximaldruck sehr gering, führt der relativ kleine Bereich in dem sich die Druckinteraktion abspielt zu einer starken Anfälligkeit für systembedingte Ungenauigkeit beim Tracking (Jitter).

5.3 Benutzbarkeit eines TUI am Curve

Um ein erstes Verständnis für Nutzbarkeit eines TUI am Curve zu bekommen, wurde eine Studie mit spielerischem Kontext durchgeführt (Tuchina, 2012). Zu diesem Zweck wurden simple physikalische Objekte gedruckt und anschließend mit Markern und adhäsiven Pads ausgestattet. In einem einfachen *Tower Defense*-Spiel wurden dann grundsätzliche Unterschiede hinsichtlich der TUI-Nutzung zwischen horizontaler und vertikaler Displayfläche des Curve untersucht. Die Ergebnisse zeigen sowohl einen signifikanten Unterschied in der Anzahl der Interaktionen als auch eine unterschiedliche Wahrnehmung der Studienteilnehmer.

5.3.1 Explorative Studie zur TUI-Nutzung

Dieser Abschnitt beschreibt die Planung, die Durchführung und die Auswertung einer explorativen Studie zur TUI-Nutzung am Curve. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten wurde ein TUI-basiertes Spiel (Tower Defense) umgesetzt und in der Studie eingesetzt. Bei Tower Defense (TD) handelt es sich um ein Spiel für einen Spieler, in dem er mit Türmen, die auf dem Spielfeld platziert werden, Gegner am Überqueren des Spielfelds hindern soll. Die Türme schießen auf Gegner innerhalb ihrer Reichweite und können in verschiedenen Kategorien, wie zum Beispiel Feuerkraft oder Reichweite, aufgewertet werden. Im Gegensatz zu klassischen TD-Varianten konnten in der hier genutzten Version die einzelnen Türme außerdem im Laufe des Spiels aufgenommen und neu platziert werden.

Studienbeschreibung

Die Studie fand am Curve statt, der für dieses Projekt neben dem FTIR-Tracking um ein DI-Setup erweitert wurde. Die im Abschnitt 5.2.2 beschriebene Druckererkennung wurde in der Studie nicht eingesetzt. Die Software der Studie (siehe Abbildung 5.10) wurde basierend auf einer angepassten Version von MT4j (Laufs u. a., 2010) umgesetzt. Während der Studie wurden alle Interaktionen des Nutzers gespeichert und im Nachhinein ausgewertet. Zusätzlich wurden alle Studiendurchläufe für eine spätere Auswertung auf Video aufgezeichnet.



Abbildung 5.10: Tower Defense auf dem Curve: Das Spielfeld mit physikalischen Türmen befand sich entweder auf dem horizontalen Displaybereich (wie hier) oder auf dem vertikalen Bereich. Das Feld zum Aufwerten einzelner Türme befand sich jeweils auf dem anderen Bereich.

Ziel der Studie war die Untersuchung möglicher Einflüsse der Displayorientierung auf die Interaktion und die Wahrnehmung der TUI-Nutzung. Die Hypothesen besagten, dass das Spielen auf dem horizontalen Displaybereich sowohl genauer ist als auch insgesamt besser bewertet wird. Aus diesem Grund wurde die Spielfläche des Spiels in zwei Bereiche aufgeteilt. Während auf dem einen Displaybereich das eigentliche Spielfeld angezeigt wurde, befand sich auf dem anderen Displaybereich eine Fläche zum Aufwerten einzelner Türme. Zur Verbesserung eines einzelnen Turms mussten die Studienteilnehmer diesen vom Spielfeld nehmen und auf dieser zweiten Fläche platzieren. Dort konnte dann mittels Touch-Bedienung die Art der Aufwertung ausgewählt werden. Anschließend konnte der Turm an eine beliebige Stelle auf dem Spielfeld zurückgesetzt werden.

Jeder Teilnehmer spielte das Spiel sowohl auf dem horizontalen als auch auf dem vertikalen Displaybereich (intraindividuell), wobei die Reihenfolge balanciert war. Nach dem Spielen auf einem Bereich füllten die Teilnehmer einen Fragebogen mit fünf-stufigen Likert Skalen aus. Im Fall des vertikalen Spielfelds konnten die Antworten eines Teilnehmers aufgrund eines Problems mit dem Fragebogen nicht berücksichtigt werden.

An der Studie nahmen insgesamt zwölf Nutzer teil, von denen neun weiblich waren. Das Alter der Teilnehmer lag zwischen 24 und 46 Jahren. Fünf Teilnehmer nutzten eine Sehhilfe. Die Auswertung der Messwerte geschah mittels eines bidirektionalen t-Tests für paarweise Stichproben.

Ergebnisse

Dieser Abschnitt fasst die Ergebnisse der Studie in drei Bereichen zusammen. Die quantitativen Messwerte umfassen die Interaktionsgenauigkeit und die Anzahl der durchgeführten Interaktionen. Die subjektiven Bewertungen fassen die Selbsteinschätzung der Teilnehmer hinsichtlich der Interaktion zusammen. Gemeinsam mit weiteren Beobachtungen ergibt sich am Ende ein Schlussfazit zur Nutzung eines TUI am Curve.

Quantitative Messwerte Ein Faktor, der in der Studie untersucht wurde, ist die Beeinflussung der Interaktionsgenauigkeit durch die Displayorientierung. Die durchschnittlichen **Abweichungen** zwischen Objektmittelpunkt und dem Mittelpunkt des jeweils genutzten rechteckigen Feldes zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen horizontalem ($m = 10,1$ px; $sd = 5,4$ px) und vertikalem Displaybereich ($m = 7,8$ px; $sd = 3,6$ px) ($t_{11} = 1,298, p > .05$).

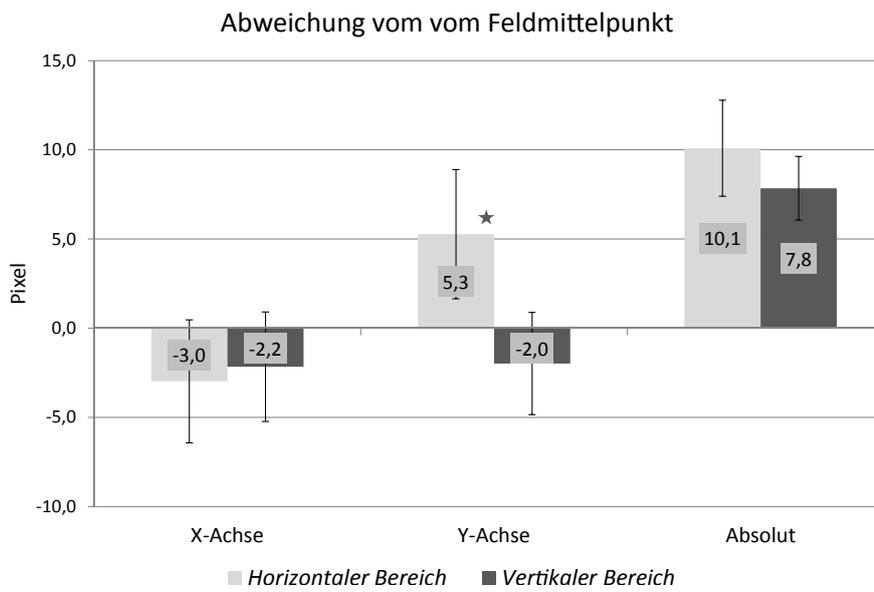


Abbildung 5.11: Lediglich die Abweichung entlang der Y-Achse zeigt einen signifikanten Einfluss des Displaybereichs. Beim absoluten Abstand konnte jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen horizontalem und vertikalem Displaybereich gefunden werden.

Betrachtet man jedoch die durchschnittliche Abweichung getrennt nach X- und Y-Achse, zeigt sich, dass zumindest die Abweichung entlang der Y-Achse signifikant vom genutzten Displaybereich beeinflusst wurde ($t_{11} = 2,823, p < .05$) (siehe Abbildung 5.11). Die Abweichung entlang der Y-Achse war auf dem horizontalen Displaybereich ($m = 5,3$ px; $sd = 7,2$ px) höher als auf dem vertikalen Bereich ($m = -2,0$ px; $sd = 5,7$ px) (siehe Abbildung 5.12). Die negative Abweichung beschreibt bei der Y-Achse dabei eine Abweichung nach unten, bei der X-Achse nach links. Die **Anzahl der Interaktionen** wurde ebenfalls signifikant vom genutzten Displaybereich beeinflusst ($t_{11} = 2,779, p < .05$). Wurde das Spielfeld auf der horizontalen Spielfläche angezeigt, fanden mehr Interaktionen statt ($m = 44,5$; $sd = 17,2$) als bei der Anzeige auf dem vertikalen Displaybereich ($m = 30,1$; $sd = 11,8$).

Subjektive Bewertungen Die subjektiven Bewertungen haben größtenteils keinen Unterschied zwischen dem horizontalen und dem vertikalen Displaybereich gezeigt. Sowohl die Gestaltung als auch die Reaktion auf die Platzierung eines Objekts wurden für beide Bereiche ähnlich bewertet. Der einzige deutliche Unterschied in der Bewertung hängt mit der Anstrengung der Interaktion je nach Displaybereich zusammen. Während die Interaktion mit den Objekten auf dem horizontalen Spielfeld von allen Teilnehmern als sehr einfach

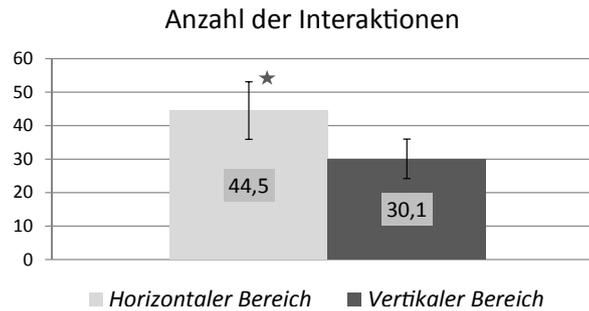


Abbildung 5.12: Die Anzahl der Interaktionen mit dem physikalischen Turm unterschied sich je nach Position des Spielfelds signifikant.

bewertet wurde, sagten dies nur sechs Teilnehmer über die Position des Spielfelds auf dem vertikalen Bereich (siehe Abbildung 5.13).

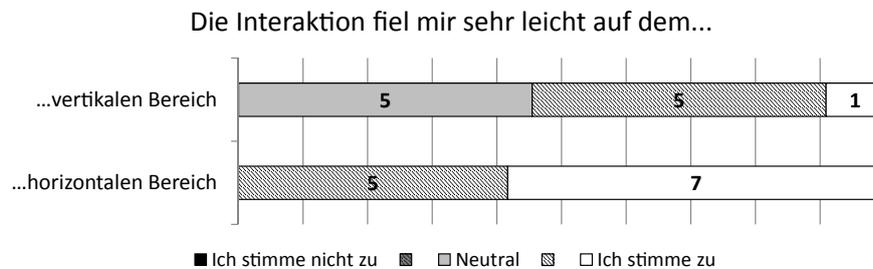


Abbildung 5.13: Die Bewertungen der Teilnehmer bestätigen die Ergebnisse hinsichtlich der Interaktionshäufigkeit.

Weitere Beobachtungen Sowohl direkt während der Studie als auch bei der späteren Auswertung der Videoaufzeichnungen sind drei Punkte beobachtet worden, die weitere Einblicke in die Nutzung eines TUI auf einem gebogenen Display wie dem Curve geben. Die Teilnehmer haben **inaktive Objekte**, die noch nicht auf der Spielfeldfläche positioniert wurden, nicht auf dem horizontalen Displaybereich abgestellt. Stattdessen hielten die meisten Probanden diese Objekte in ihrer nicht-dominanten Hand und interagierten mit der anderen Hand. Es gibt zwei mögliche Erklärungen für dieses Verhalten. Zum einen kann es mit der Unterstützung der dominanten Hand durch die nicht-dominante Hand während einer bimanuellen Interaktion zusammenhängen (Guiard, 1987). Zum anderen könnte aber auch die Interaktivität der horizontalen Oberfläche ein Hinderungsgrund gewesen sein. Um unbeabsichtigte Interaktionen zu verhindern, behielten die Teilnehmer die Objekte in der Hand statt sie auf der interaktiven Oberfläche abzulegen. Um die genauen Gründe für dieses Verhalten zu bestimmen, bedarf es allerdings weiterer Studien.

Eine weitere Beobachtung betrifft die Adhäsionstechnik der Objekte. Einige Teilnehmer waren nicht sicher ob der **Anpressdruck**, mit dem sie die Objekte gegen den vertikalen Displaybereich drückten, ausreichend war. Gerade zu Beginn der einzelnen Durchläufe variierte

ten die Teilnehmer den Anpressdruck daher sehr deutlich, um den optimalen Druck herauszufinden. Erst im Laufe der Studie vertrauten sie der Adhäsionstechnik und konnten die zum Anpressen benötigte Kraft besser einschätzen.

Darüber hinaus wurden auch unterschiedliche **Grifftechniken** der Teilnehmer beobachtet. Während ein Teil der Probanden die Objekte am unteren Ende knapp oberhalb des Haftmaterials anfasste, nutzte ein anderer Teil die Objektspitze zum Festhalten. Die Begründungen für die jeweilige Haltetechnik fielen unterschiedlich aus. Das Greifen am unteren Ende des Objekts führte laut Aussage der Teilnehmer zu einer besseren Kontrolle des Anpressdrucks und somit zu einer verbesserten Haftung des Objekts auf dem vertikalen Bereich. Dem gegenüber steht die höhere Genauigkeit beim Platzieren des Objekts, wenn es lediglich an der Spitze angefasst wird. Hier argumentierten die Teilnehmer, dass sie sich nicht selbst die Sicht auf das darunter liegende Spielfeld verdecken wollten.

5.4 Zusammenfassung

Basierend auf den Erfahrungen aus der Konstruktion der Vertibles und der vorgestellten Studie hat sich gezeigt, dass vakuum-basierte Adhäsion als Haft-Technik für ein TUI am Curve funktioniert. Beide getesteten **Materialien** (Nano-Pad und Displayschutzfolie) haben eine ausreichende Haftkraft um physikalische Objekte auch für längere Zeit am vertikalen Displaybereich des Curve zu befestigen. Vergleicht man beide Materialien zeigt sich, dass das Nano-Pad eine deutlich höhere Haftkraft bietet und diese über eine längere Zeit anhält. Somit eignet es sich besser für die längere Nutzung in einem Projekt. Dem gegenüber ist die Displayschutzfolie aufgrund ihrer Transparenz und geringen Dicke jedoch deutlich unauffälliger. Sie eignet sich somit besonders für unauffällige Entwürfe, müssen jedoch häufig erneuert werden.

Die Studie zur Nutzung eines TUI am Curve hat gezeigt, dass die Wahl des Displaybereichs auf dem das TUI genutzt, wird einen signifikanten Einfluss auf die **Interaktionshäufigkeit** hat. Die Probanden der Studie interagierten mit den Objekten auf dem horizontalen Bereich häufiger als auf dem vertikalen Bereich. Während der Studie zeigte sich, dass die Nutzer anfängliche Probleme mit der Hafttechnik hatten. Sie waren sich nicht sicher, ob die Objekte tatsächlich haften und nicht herunterfallen. Diese Sorge könnte zu der beobachteten Verminderung der Interaktionen in diesem Displaybereich geführt haben. Eine andere Erklärung könnte eine Ermüdung der Teilnehmer während der Interaktion mit dem vertikalen Displaybereich sein. Zur Überprüfung beider Vermutung müssen jedoch weitere Studien erfolgen, die eine längere Interaktionszeit beinhalten.

Ein weiterer Einfluss der Displayorientierung betrifft die **Genauigkeit**, mit der die Objekte auf bestimmte Spielfelder gesetzt wurden. Hier zeigte sich, dass die Nutzer die Objekte auf dem horizontalen Bereich zu weit von sich entfernt absetzten und die Objekte auf der vertikalen Fläche zu tief platzierten. Beide Abweichungen könnten durch den Blickwinkel

der Nutzer zurückzuführen sein. Sie versuchen das Objekt mittig abzusetzen und wollen aber dennoch das Feld darunter gut sehen können.

Ein Aspekt, der in der Studie nicht direkt im Fokus stand, aber dennoch einen Einfluss auf den Nutzer haben könnte, ist das **Design** der physikalischen Objekte und die korrekte Nutzung von Metaphern. Während die Türme, die in der Studie genutzt wurden, auf dem horizontalen Bereich eine korrekte Metapher darstellen, stimmt die Metapher auf dem vertikalen Displaybereich nicht mehr, da Türme normalerweise nicht auf einer vertikalen Oberfläche stehen. Zusätzlich dazu verändert sich der Blickwinkel des Nutzers auf das Objekt - er sieht es nicht mehr seitlich von oben, sondern ausschließlich von oben. Je nach Objektdesign können diese verschiedenen Ansichten zu deutlich unterschiedlichen Wahrnehmungen der Objekte führen. Beide Punkte sollten in zukünftigen TUI-Projekten für gebogene Displaykonfigurationen berücksichtigt werden, um Probleme und eventuelle Unklarheiten zu vermeiden.

tl;dr

Ein Tangible User Interface am Curve kann mit Hilfe vakuum-basierter Adhäsion realisiert werden: die Vertibles. Das zusätzliche Material an der Objektunterseite kann außerdem zur Erkennung binärer Druckeingabe genutzt werden. Die Vertibles sind zwar nicht verschiebbar, eine erste Studie hat jedoch gezeigt, dass das Umsetzen der Objekte nach einer Trainingsphase gut funktioniert. Darüber hinaus haben die Studienteilnehmer auf dem horizontalen Displaybereich häufiger mit den Objekten interagiert als auf dem vertikalen Bereich.

III

POTENZIALE FÜR NEUE
BENUTZERSCHNITTSTELLEN

Kapitel 6

Visualisierungen

*Ich schlage vor
Sie halten sich die Augen zu.
Ich sage Ihnen jetzt nämlich
die Bundesliga-Ergebnisse.*

– Johannes B. Kerner, Kommentator –

Zwar beeinflusst die gebogene Displayform des Curve die Benutzerinteraktion (siehe Kapitel 4), doch bietet sie auch neue Möglichkeit für Visualisierungs- und Interfacekonzepte. Während herkömmliche Bildschirme flach und durch einen äußeren Rahmen begrenzt sind, bietet der Curve unterschiedlich orientierte Displaybereiche, die nahtlos miteinander verbunden sind. Dies kann unter anderem für neuartige Visualisierungstechniken genutzt werden. Die MS Sphere (Benko u. a., 2008) hat gezeigt, dass Daten, die auf einem passend geformten Display dargestellt werden, sehr einfach verständlich und für mehrere Nutzer zugänglich sind. Denn die Darstellung eines Globus auf dem kugelförmigen Display der Sphere deckt sich mit der natürlichen Anordnung der visualisierten Daten, in diesem Fall einer Landkarte der Welt. Die Beziehung zwischen Daten und Darstellung ist in diesem Fall sehr gut.

Kapitelfrage

Wie kann die gebogene Displayform des Curve für Visualisierungen genutzt werden?

Zur Beantwortung dieser Frage werden zunächst zwei Projekte vorgestellt, die durch die Displayform des Curve neue Arten des Blending (Imaz u. Benyon, 2007) im Umgang mit dem interaktiven System ermöglichen. Im zweiten Abschnitt werden die Visualisierungen *Perspective+Detail* (Schwarz u. a., 2012) und der *PerspectiveTable* (Hennecke u. a., 2013c) vorgestellt. Beide Visualisierungen nutzen die Displayform des Curve um eine korrekte dreidimensionale Darstellung von Inhalten zu ermöglichen. Eine Studie zu *Perspective+Detail*

zeigt dabei die möglichen Vorteile einer solchen Visualisierung.

Der letzte Abschnitt beschreibt eine Optimierung gemeinsamer Tele-Arbeit (Remote Collaboration) am Curve. Durch Angleichen der Darstellung von links und rechts für beide Teilnehmer (Hennecke u. a., 2013a) konnte in einer Studie Missverständnissen vorgebeugt und das Referenzieren von Objekten vereinfacht werden.

6.1 Verwandte Arbeiten

Die verwandten Arbeiten zu diesem Kapitel unterteilen sich in zwei Bereiche. Im ersten Bereich werden verwandte Arbeiten zur Informationsvisualisierung im Allgemeinen vorgestellt. Auf dieser Grundlage baut das spätere Kapitel über *Perspective+Detail* (siehe Abschnitt 6.2) auf. Der zweite Teil dieses Abschnitts führt die Grundlagen der Tele-Immersion (Sadagic u. a., 2001) ein. Anhand dieser Grundlagen werden anschließend die Möglichkeiten des *PerspectiveTables* vorgestellt.

6.1.1 Informationsvisualisierung

Die Grundidee hinter Informationsvisualisierungen ist die Darstellung und Erforschung großer Datenmengen ohne den Nutzer damit zu überfordern. Um dieses Problem („There is too much to see.“(Furnas u. Bederson, 1995)) zu lösen gibt es verschiedene Herangehensweisen. Im Folgenden werden einige dieser Ansätze, beginnend bei gewöhnlichen Desktop-Bildschirmen, vorgestellt. Den Abschluss bilden Systeme, die eine nicht-planare Displayform in die Gestaltung der Informationsdarstellung mit einbeziehen.

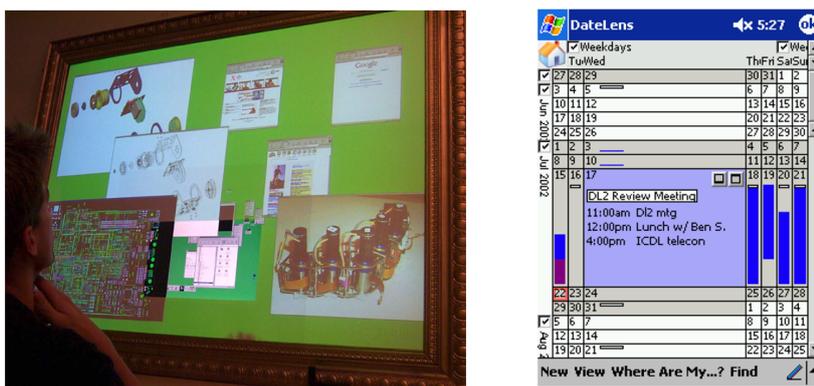


Abbildung 6.1: Zweidimensionale Visualisierungen bieten einen verbesserten Überblick über große Datenmengen: Während Focus+Context mit unterschiedlich hochauflösenden Displays arbeitet (links) (Baudisch u. a., 2001), kommt der Fisheye-Kalender mit einem einzigen, kleinen Display aus (rechts) (Bederson u. a., 2003).

Grundlegende Techniken, die auf gewöhnlichen zweidimensionalen Displays basieren, sind beispielsweise Multi-Scale-Interfaces (Bederson u. a., 1994) und Fisheye-Visualisierungen (Bederson u. a., 2003). Bei beiden Visualisierungsarten werden unterschiedlich große Ansichten auf einen Datensatz genutzt und kombiniert dargestellt, basieren aber auf unterschiedlich vielen Displays. Im Fall der Fisheye-Visualisierung eines Kalenders werden auf diese Weise beispielsweise sehr viele Kalendertage übersichtlich abgebildet (siehe Abbildung 6.1 (mittig)). Gleichzeitig sind jedoch auch die Details eines einzelnen Tages sichtbar. Aufgrund der Beschränkung, dass nur ein einzelner Kalendertag detailliert dargestellt wird, entsteht selbst auf dem kleinen Bildschirm eines Smartphones ein guter Überblick.

Focus+Context (Baudisch u. a., 2001) hingegen kombiniert mehrere Bildschirme: einen kleinen hoch-auflösenden und einen großen niedrig-auflösenden Bildschirm. Auf dem kleinen Bildschirm sieht der Nutzer Detailinformationen, während die große Anzeige um diesen kleinen Bildschirm herum Umgebungsinformation vermittelt (siehe Abbildung 6.1 links). Auf diese Weise ist es möglich während der Arbeit an Details Informationen einzubeziehen, die sich in der Umgebung befinden. Durch die Trennung von Übersicht und Detaildarstellung kommt diese Visualisierungsart ohne ein großes hochauflösendes Display aus.

Es gibt jedoch auch Visualisierungen, die die konventionelle zweidimensionale Darstellung von Informationen um eine dreidimensionale Darstellung erweitern. Während eine klassische Kartendarstellung die Informationen vollständig zweidimensional anzeigt, erweitert die *bird's eye-perspective* (Lorenz u. a., 2008) die Darstellung um eine perspektivische Seitenansicht auf Teile der Karte (siehe Abbildung 6.2 links). Hierzu wird die Ansicht auf die Karteninformationen in der Mitte des Displays gebogen, so dass aus der Ansicht von oben eine Seitenansicht wird. Diese Biegung der Darstellung erfolgt zwar nahtlos, durch die unveränderte Darstellungsebene des Displays wirkt sie aber auf den ersten Blick verwirrend auf den Nutzer.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt das *augmented windshield* (Kim u. Dey, 2009). Diese digital erweiterte Windschutzscheibe eines Autos verknüpft die zweidimensionale Darstellung einer Straßenkarte mit der Sicht des Fahrers auf die vor ihm liegende Straße (siehe Abbildung 6.2 rechts). Dazu wird diese Straße virtuell so erweitert, dass sie nahtlos in eine Kartenansicht der weiteren Route übergeht. Auf diese Weise wird dem Fahrer sowohl angezeigt welchen Weg er in der unmittelbaren Umgebung einschlagen muss, als auch der weitere Verlauf der gesamten Route.

Zwar ergeben sich bei beiden Ansätzen durch die nahtlose Kombination unterschiedlicher Ansichten neue Möglichkeiten für den Nutzer, allerdings führt dieser perspektivische Übergang auf einem planaren Display zu einer unnatürlichen Darstellung. Diese Darstellung ist auf den ersten Blick verwirrend, da sie eigentlich getrennte Ansichten direkt miteinander verknüpft. Ein Lösungsansatz für dieses Problem stellt die gebogene Displayform des Curve dar, die dieses Problem durch eine Veränderung der Darstellungsebene ausgleichen kann. Allerdings müssen die Wahrnehmungsunterschiede auf den verschiedenen Displaybereichen des Curve beachtet werden. Bereits auf einem großen ausschließlich horizontalen Display sind zweidimensionale Objekte und ihr Verhältnis zueinander je nach ihrer Position unterschiedlich gut identifizierbar (Wigdor u. a., 2007a). Auch die korrekte Wahrnehmung drei-

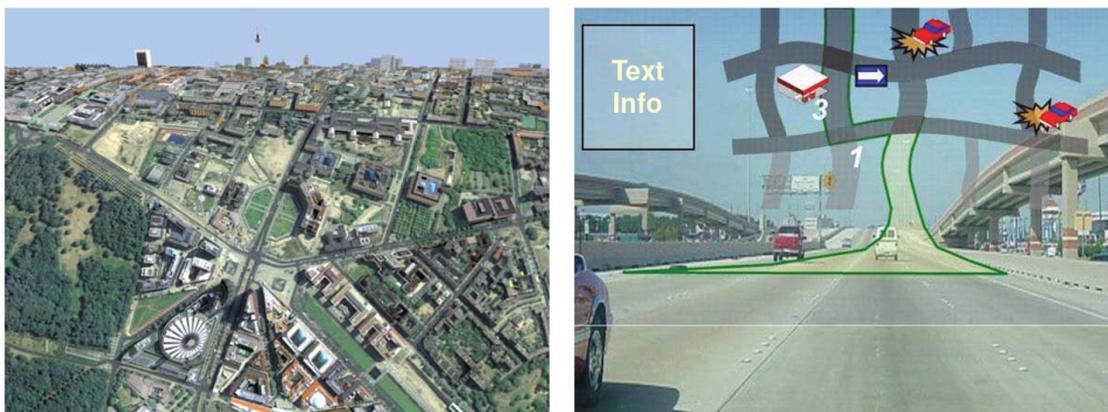


Abbildung 6.2: Mischungen aus zwei- und drei-dimensionalen Ansichten kombinieren die Vorteile unterschiedlicher Perspektiven. Auf konventionellen Displays entstehen mitunter aber perspektivische Verzerrungen, die den Nutzer verwirren können (links) (Lorenz u. a., 2008). Passt man die Form dieser Darstellung jedoch besser an die räumlichen Gegebenheiten an, ist die Visualisierung leichter verständlich (rechts) (Kim u. Dey, 2009).

dimensionale Inhalte, die auf einem horizontalen Display angezeigt werden, hängt von der Position des Nutzers und der gewählten Darstellungsart ab (Hancock u. a., 2009a). Stimmt die Kopfposition des Nutzers nicht mit dem Augpunkt (Center of Projection) der dreidimensionalen Darstellung überein, kommt es zu Fehlern in der Wahrnehmung des Inhalts. Ebenso kann es sich als schwierig erweisen die Interaktion des Nutzers mit Inhalten auf einem horizontalen Display durch adäquates Feedback zu verknüpfen. Eine Möglichkeit hierfür ist die Darstellung eines Schattens unter der interagierenden Hand des Nutzers (Wilson u. a., 2008). Dieser verdeutlicht, wo sich die Hand des Nutzers im virtuellen Raum aktuell befindet und erhöht die Interaktionsgenauigkeit des Nutzers.

Insgesamt sind diese Faktoren jedoch nicht nur auf horizontale, planare Displays beschränkt. Auch am Curve variiert die Nutzerposition, was wiederum eine perspektivische dreidimensionale Darstellung beeinflusst. Auch die Interaktion mit Inhalten auf dem Display muss für den Nutzer verständlich sein und sollte durch visuelle Hilfen erleichtert werden.

6.1.2 Remote Collaboration

Im Rahmen dieser Arbeit wurde am Curve eine virtuelle Arbeitsumgebung für gemeinsames Arbeiten an unterschiedlichen Standorten (Remote Collaboration) umgesetzt. Um den Kontext und die Bedeutung der Displayform bei dieser Entwicklung darzustellen, werden in diesem Abschnitt die Grundlagen zur Remote Collaboration behandelt. Ausgehend von deren steigender Bedeutung (Citrix Online, 2010) werden zuerst kommerzielle Systeme in diesem Bereich vorgestellt. Anschließend werden verwandte Forschungsarbeiten beschrieben und die Begriffe Telepresence (Minsky, 1980) und Tele-Immersion (Sadagic u. a., 2001) eingeführt.

Die einfachste Umsetzung eines Systems für Remote Collaboration besteht in der Übertragung von Audio und Ton im Rahmen einer **Videokonferenz**. Ein solches System lässt sich an einem gewöhnlichen Computer realisieren¹ und ist auch als Lösung für die Arbeit mit mehreren Teilnehmern umsetzbar². Zwar erlaubt eine solche Lösung die Kommunikation mit entfernten Konferenzteilnehmern, für die gemeinsame Arbeit sind aber meist zusätzliche Systeme erforderlich. Darüber hinaus bietet ein solches System keine hohe Immersion. Die entfernten Teilnehmer werden auf einem Bildschirm dargestellt, der häufig nicht in die Umgebung integriert ist. Zwar gibt es Systeme³, die das entfernte Gegenüber besser in die eigene Umgebung einbinden, sie setzen jedoch ein dediziertes System und eine spezielle Umgebung voraus⁴.

Neben diesen verfügbaren Systemen kann man noch mindestens zwei weitere Arten von Systemen unterscheiden: Telepresence (Minsky, 1980) und Tele-Immersion (Sadagic u. a., 2001). Telepresence-Systeme versuchen einem Nutzer die Präsenz an einem entfernten Ort zu ermöglichen und zu vermitteln. Tele-Immersion-Systeme hingegen versuchen die Darstellung eines entfernten Arbeitspartners nahtlos in die eigene Arbeitsumgebung zu integrieren. Für den PerspectiveTable sind besonders die Tele-Immersion-Systeme relevant, weswegen diese im Fokus der weiteren Betrachtungen stehen.

Ein erstes Beispiel für ein solches System ist die TeamWorkStation (Ishii u. Miyake, 1991). Hier werden entfernte Arbeitsbereiche direkt überlagert, um eine gemeinsame Arbeit an Zeichnungen und Skizzen zu ermöglichen. Beide Teilnehmer sehen die Hand, den Arm und die Zeichnungen des jeweiligen Arbeitspartners auf einem separaten Bildschirm (siehe Abbildung 6.3 links). Zwar sind die Darstellungsmöglichkeiten und damit die Immersion des Systems beschränkt, es kombiniert jedoch entfernte Arbeitsplätze sehr einfach miteinander. Spätere Umsetzungen ähnlicher Systeme (Barden u. a., 2012) zeigen sogar die Integration physikalischer Objekte in diese kollaborative Umgebung.

Eine andere Weiterentwicklung dieses Systems stellt das ClearBoard (Ishii u. Kobayashi, 1992) dar. Statt auf einer horizontalen Fläche kollaborieren hier zwei Nutzer auf einer fast vertikalen Displayfläche. Die Konstruktion mit zwei halb-durchlässigen Spiegeln erlaubt es den Nutzern sich bei der Kollaboration sogar direkt anzuschauen. Im Gegensatz zur TeamWorkStation gehen hier auch keine Informationen in Form von Gesten und Gesichtsausdrücken verloren.

Einen möglichen nächsten Schritt zeigt die Vision des *Office of the Future* (Raskar u. a., 1998). Dieses Büro der Zukunft skizziert unter anderem die nahtlose Integration entfernter Arbeitskollegen in eine normale Büroumgebung. Die entfernten Kollegen werden so dargestellt als seien tatsächlich im Raum (siehe Abbildung 6.3 (mittig)). Im Vergleich zu den bisherigen Lösungen stellt diese Vision eine völlig neue Stufe der Immersion dar. Die entfernt

¹ <http://www.skype.com/de/>, zuletzt aufgerufen am 08.08.2013

² <http://franzconferencetables.com/>, zuletzt aufgerufen am 09.08.2013

³ <http://www.smartdesks.com/video-conference-tables-boomerang.asp>, zuletzt aufgerufen am 09.08.2013

⁴ <http://www.steelcase.de/de/produkte/kategorie/tische/konferenz-tisch/mediascape/seiten/uebersicht.aspx>, zuletzt aufgerufen am 09.08.2013



Abbildung 6.3: Anfänge der Tele-Immersion waren die Überlagerung einer gemeinsamen Arbeitsfläche auf einem vertikalen Bildschirm (links) (Ishii u. Miyake, 1991), die Vision des Büros der Zukunft (mittig) (Raskar u. a., 1998) und der Prototyp des Tele-Immersion Portals (rechts) (Sadagic u. a., 2001).

arbeitenden Kollegen werden nicht nur dargestellt, sondern auch korrekt in die Umgebung eingebunden. Es entsteht das Gefühl, dass sie tatsächlich anwesend sind.

Einen ersten Prototyp dieser Version stellt das Tele-Immersion Portal dar (Sadagic u. a., 2001). Es erweitert einen gewöhnlichen Schreibtisch, der vor einer Wand steht, um ein Display auf dieser Wand. Dieses zeigt das Bild eines entfernt arbeitenden Kollegen perspektivisch so als sitze dieser dem anderen Nutzer direkt gegenüber (siehe Abbildung 6.3 rechts). Wie schon das ClearBoard (Ishii u. Kobayashi, 1992) ist auch hier eine gemeinsame Interaktion der beiden Nutzer möglich. Zwar teilen sich die Nutzer keine gemeinsame physikalische Arbeitsfläche, sie arbeiten aber gemeinsam an virtuellen dreidimensionalen Objekten. Dabei sieht das Gegenüber die Gesten und Interaktionen des Nutzers perspektivisch korrekt (Lanier, 2001). Diese Darstellung wird mittels Tracking der Blickrichtung des Nutzers so angepasst, dass sie auch bei einer Veränderung der Kopfposition perspektivisch korrekt ist. Hierzu muss jedoch für jeden möglichen Blickwinkel eine eigene Kamera im System verbaut werden, so dass die Darstellung zum neuen Blickwinkel passt. Zwar benötigt das System prinzipiell nur wenige Kameras, allerdings ist die Immersion dann aufgrund perspektivischer Verzerrungen nicht für jede Kopfposition des Nutzers glaubwürdig.

Dieses Problem umgeht der MirageTable (Benko u. a., 2012), indem dort mit einer 3D-Kamera pro Nutzer und einer stereoskopischen Projektion gearbeitet wird. Die beiden Nutzer sitzen jeweils vor einer gebogenen Projektionsfläche, die der Displayfläche der Curve ähnelt. Auf diese Fläche wird die stereoskopische Darstellung des anderen Nutzers projiziert, so dass man den Eindruck erhält als sitze man sich tatsächlich gegenüber. Durch die Nutzung der 3D-Kameras können auch physikalische Objekte in die Kollaboration eingebunden werden und mit virtuellen Abbildern dieser Objekte gemeinsam interagiert werden. Dies schafft zwar einerseits neue Möglichkeiten der Zusammenarbeit, allerdings bietet das System keine Möglichkeit mit hochauflösenden Dokumenten gemeinsam zu arbeiten. Aus diesem Grund ist zwar die grundlegende Idee einer solchen Darstellung sinnvoll, aufgrund von technischen Limitierungen jedoch nicht für die geplanten Zwecke einer Remote Collaboration am Curve nutzbar.

6.2 Perspective+Detail

Wie durch die verwandten Arbeiten gezeigt wurde, trägt die Displayform maßgeblich dazu bei Visualisierungen optimal darzustellen. Ein Beispiel hierfür ist die Darstellung einer Weltkarte. Wird diese auf einer planaren Fläche angezeigt, muss die eigentlich kugelförmige Karte auf die Darstellungsfläche projiziert werden. Projektionen wie die Mercator-Projektion (Mercator, 1569) verzerren die Darstellung jedoch. Ein direkter Größenvergleich einzelner Landmassen ist mit dieser Darstellung nicht ohne Weiteres möglich (Monmonier, 2010). Eine Darstellung in Form eines Globus umgeht diese Probleme, indem die Darstellungsfläche exakt der Art der Informationen entspricht. Die dort dargestellten Abstände und Flächen entsprechen den tatsächlichen Verhältnissen. Die MS Sphere (Benko u. a., 2008), ein interaktives, kugelförmiges Display, hat in diesem Zusammenhang gezeigt, dass ein non-planares Display für die korrekte Darstellung solcher Informationen genutzt werden kann.

In diesem Abschnitt⁵ wird eine Visualisierung vorgestellt, die die gebogene Displayform des Curve nutzt um einen perspektivisch korrekten Überblick über eine Karte zu geben: *Perspective+Detail* (P+D) (Schwarz u. a., 2012). Hierzu erweitert P+D die physikalische, horizontale Displayebene virtuell und kombiniert dadurch eine klassische Kartenansicht mit einem perspektivischen Ausblick auf einen weiteren Teil des Informationsraums. Diese Art der Darstellung erleichtert die Orientierung in großen Informationsräumen.

Zum genaueren Verständnis wird zuerst das grundlegende Darstellungsprinzip von P+D vorgestellt. Als Grundlage für die korrekte Darstellung dient hier die gebogene Displayform des Curve. Darauf aufbauend wird die Umsetzung des funktionsfähigen, interaktiven Prototyps beschrieben. Den Abschluss bildet eine explorative Studie, die sowohl Vorteile als auch mögliche Probleme der Visualisierung identifiziert.

6.2.1 Prinzip

Das Prinzip hinter der Visualisierung von P+D nutzt die Displaykurve des Curve zur virtuellen Erweiterung des horizontalen Displaybereichs und der dort dargestellten Inhalte (siehe Abbildung 6.4). Dieser Abschnitt erklärt dieses Darstellungsprinzip und beschreibt die Einschränkungen, die diese Art der virtuellen Erweiterung mit sich bringt.

Darstellung und Interaktion

Die Darstellung von P+D beruht auf der gebogenen Displayform des Curve und ist speziell an diese angepasst. Jeder Displaybereich spielt bei der perspektivischen Visualisierung einer Karte eine andere Rolle. Die hier vorgestellte grundlegende Idee (siehe Abschnitt 6.2.2) ist

⁵ Der Inhalt dieses Abschnitts basiert auf einer publizierten Arbeit (Schwarz u. a., 2012). Die Autoren der Veröffentlichung sind Tobias Schwarz, Fabian Hennecke, Felix Lauber und Harald Reiterer. Die zugrunde liegende Arbeit wurde von Felix Lauber im Rahmen seiner Diplomarbeit (Lauber, 2011), betreut von Tobias Schwarz und Fabian Hennecke, umgesetzt.

auch auf ähnlich gebogene Displays (Weiss u. a., 2010a) übertragbar, jedoch müssen hierfür individuelle Konfigurationen erstellt werden.

Als Beispiel für eine P+D-Visualisierung dient an dieser Stelle ein fiktiver U-Bahn-Netzplan. Dieser Netzplan wird, ähnlich wie bei der *bird's-eye perspective* (Lorenz u. a., 2008), aus zwei verschiedenen Perspektiven dargestellt.

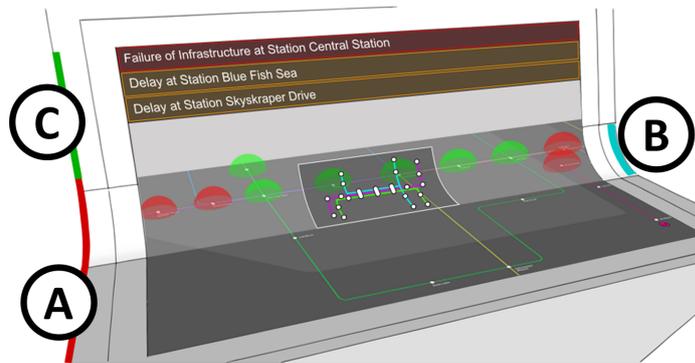


Abbildung 6.4: Bei Perspective+Detail wird der horizontale Displaybereich zur Darstellung einer Karte genutzt (A), während die Kurve die perspektivische Erweiterung anzeigt (B). Auf dem vertikalen Bereich werden zusätzliche Detailinformation zu selektierten Punkten auf der Karte angezeigt (C) (Schwarz u. a., 2012).

Im Unterschied zur Arbeit von Lorenz erfolgt die Darstellung auf einem gebogenen Display, dem Curve. Die virtuelle Fläche ist dazu der physikalischen Displayform entgegengesetzt gebogen. Hierdurch verschwindet der unnatürliche Perspektivenwechsel, der bei einer solchen Visualisierung auf einem planaren Bildschirm normalerweise auftritt. Stattdessen setzt sich die Vogelperspektive (Obersicht) des horizontalen Displaybereichs scheinbar in die Tiefe hinter dem Display fort und erlaubt dort eine perspektivische Ansicht des Netzplans. Zum besseren Verständnis wird jeder der drei Teilbereiche des Displays (Horizontale, Kurve, Vertikale) und dessen Aufgabe bei der Darstellung im Folgenden separat voneinander beschrieben. Anschließend werden außerdem die Interaktionsmöglichkeiten in jedem der Bereiche vorgestellt.

Horizontaler Bereich Auf dem horizontalen Bereich schaut der Nutzer aus der Vogelperspektive auf den U-Bahn-Netzplan. Diese Darstellung entspricht dem Betrachten einer physikalischen Karte auf einem normalen Tisch (siehe Abbildung 6.7 links). Die Informationsdarstellung in diesem Bereich ist also flach und enthält keinerlei perspektivische Informationen. Die dreidimensionale Hervorhebung von Punkten in der perspektivischen Erweiterung (Domes) wird in der Vogelperspektive des horizontalen Bereichs ausgeblendet um Verwirrungen zu vermeiden. Aufgrund der fehlenden dritten Darstellungsdimension könnten die kreisrunden Markierungen ansonsten für Teile des Netzplans gehalten werden.

Die direkte Interaktion auf diesem Displaybereich umfasst zwei Aktionen: Verschieben und Skalieren. Zum Verschieben des dargestellten Kartenausschnitts reicht eine einfache Dragging-Geste mit einem Finger. Die Karte bewegt sich dann parallel zum Finger als würde



Abbildung 6.5: Der Netzplan erscheint auf dem horizontalen Bereich in der Vogelperspektive und wird in der Displaykurve virtuell fortgeführt. In der Kurve überlagert außerdem ein Head-Up-Display die Erweiterung und zeigt Detailinformationen zu selektierten Punkten an. Der vertikale Bereich dient vor allem zum Erfassen von Detailmeldungen zu Punkten, die eventuell nicht sichtbar sind (Schwarz u. a., 2012).

man ein Blatt Papier über einen Tisch schieben. Mit zwei Touch-Punkten kann der Nutzer die Ansicht auf dem horizontalen Displaybereich skalieren. Entsprechend der Pinch-to-Zoom Geste, die unter anderem in aktuellen Smartphones und Tablets verbreitet ist, führt das Zusammenführen der Touch-Punkte zu einer verkleinerten Darstellung der Karte - insgesamt wird ein größerer Ausschnitt sichtbar. Das Auseinanderführen der Touch-Punkte vergrößert hingegen die Darstellung und lässt mehr Details erkennen.

Kurve In der Displaykurve wird die Darstellung des horizontalen Bereichs perspektivisch korrekt in die Tiefe hinter dem eigentlichen Display erweitert. Diese Darstellung erlaubt die nahtlose Kombination von zweidimensionalen Informationen auf dem vertikalen Displaybereich und den Informationen des Netzplans auf dem horizontalen Bereich. Die Kurve ist hier also sowohl das verbindende Element des Displays als auch der Visualisierung.

Darüber hinaus wird in der Kurve ein halbtransparentes Head-Up-Display (HUD) angezeigt (siehe Abbildung 6.6). Dieses HUD verfügt über einen Selektionsbereich für Knotenpunkte in der Mitte und Anzeigeflächen links und rechts davon. Befindet sich kein Knotenpunkt des Netzplans innerhalb des Selektionsbereichs, ist eine Gesamtübersicht des Netzplans als transparentes Overlay im rechten Teil des HUD zu sehen. Wird ein Knotenpunkt selektiert indem er durch Verschieben der Karte in den Selektionsbereich bewegt wird, erscheinen Detailinformationen zu diesem Punkt. Links vom Selektionsbereich finden sich textuelle Details, während auf der rechten Seite eine Detailansicht der näheren Umgebung des Punktes in der Vogelperspektive sichtbar ist (siehe Abbildung 6.6).

Die Kurve spielt bei der direkten Interaktion keine Rolle. Das HUD wird durch das Verschieben des gesamten Kartenausschnitts bedient. Möchte der Nutzer Detailinformationen zu einem einzelnen Punkt muss er die Karte durch Interaktion auf dem horizontalen Bereich lediglich so verschieben, dass der betreffende Punkt im Selektionsbereich liegt. Anschließend erscheinen die Detailinformationen zu diesem Punkt automatisch.

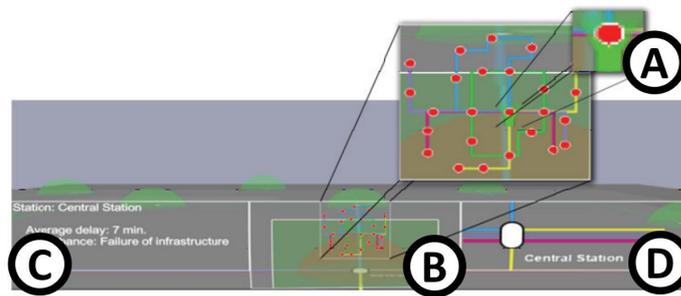


Abbildung 6.6: Das Head-Up-Display in der Kurve besteht aus mehreren Komponenten: (a) Visualisierung des Selektionsbereichs, (b) Selektionsbereich mit verkleinerter Darstellung des gesamten Netzplans, (c) textuelle Informationen und (d) vergrößerte Darstellung des selektierten Knotenpunkts. Im Hintergrund sind die dreidimensionalen Domes zu sehen.

Vertikaler Bereich Auf dem vertikalen Displaybereich werden Meldungen und Informationen zu Knotenpunkten dargestellt, die aktuell eventuell nicht sichtbar sind. Die Meldungen werden dabei nach ihrer Wichtigkeit sortiert und farblich unterschieden. Während wichtige Störungsmeldungen rot hinterlegt werden, sind weniger wichtige Meldungen orange hervorgehoben. Die Darstellung erfolgt als Liste, die am oberen Bildschirmrand des vertikalen Bereichs beginnt. Logisch gesehen befindet sich die Liste an der Displayoberfläche, während die perspektivische Erweiterung in der Kurve in die virtuelle Tiefe hineinragt (siehe Abbildung 6.7).

Normalerweise überdeckt diese Liste daher weder die perspektivische Erweiterung noch die darauf befindlichen dreidimensionalen Domes. Jedoch kann es aufgrund vieler Meldungen innerhalb der Liste zu einer teilweisen Überdeckung der Domes kommen. Damit sich der Nutzer dennoch orientieren kann wird die Liste transparent sobald der Nutzer auf der horizontalen Fläche interagiert. Auf diese Weise ist die Liste nur sichtbar, wenn nicht interagiert wird. Das System gibt den Blick frei sobald sich der Nutzer beim Verschieben des Kartenausschnitts neu orientieren muss.

Um langfristige Interaktionen mit diesem Displaybereich zu verhindern, beschränken sich die Eingabemöglichkeiten auf simple Selektionen. Der Nutzer kann ein Listenelement selektieren und bekommt dann auf dem vertikalen Bereich weitere Detailinformationen dazu angezeigt. Zusätzlich fährt der betreffende Knotenpunkt automatisch in den Selektionsmarker, so dass der Nutzer die Umgebung des Knotens einsehen kann. Außerdem ist es möglich einzelne, aufgerufene Meldungen in der Detailansicht zu quittieren, so dass sie nicht länger in der Übersichtsliste erscheinen.

Einschränkungen

Eine wesentliche Einschränkung der P+D Visualisierung stellt die Abhängigkeit von der korrekten perspektivischen Darstellung relativ zum Nutzer dar. Die Illusion einer virtuellen Verlängerung des horizontalen Bereichs funktioniert nur, solange diese auf die tatsächliche

Kopfposition des Nutzers abgestimmt ist. Kommt es hier zu deutlichen Abweichungen, ist der perspektivische Eindruck nicht mehr korrekt und die Darstellung wirkt seltsam verzerrt. Es können jedoch auch ohne ein aktives Verfolgen des Nutzers Annahmen über dessen Kopfposition getroffen werden. Den Großteil der Zeit wird der Nutzer zentral vor dem gebogenen Display sitzen und damit interagieren. Somit sind die möglichen Abweichungen von der vorkonfigurierten Kopfposition gering. Doch sobald sich der Nutzer stark vor dem Display bewegt, ist die perspektivische Verlängerung nicht mehr korrekt ausgerichtet.

Ein Headtracking- oder ein Eyetracking-System würden helfen dieses Problem zu lösen. Das System könnte anhand der festgestellten Kopf- oder Augenposition eine korrekte perspektivische Darstellung berechnen. Um eine durchgehend korrekte Perspektive zu erhalten muss das System darüber hinaus auch bei schnellen Bewegungen des Nutzers sofort und präzise reagieren.

Eine zweite Einschränkung leitet sich direkt aus der ersten Einschränkung ab. Da das System lediglich auf eine Kopfposition ausgerichtet werden kann, können nicht zwei Nutzer gleichzeitig eine perspektivisch korrekte Darstellung erhalten. Sitzen zwei Nutzer gemeinsam vor dem Display muss also entweder zwischen ihnen interpoliert werden oder ein Nutzer dient als Orientierungspunkt. In beiden Fällen ist das Problem gering, wenn sich die Nutzer nah beieinander befinden und wird größer je weiter sie sich voneinander entfernen. Durch die aktuelle Implementierung der Interaktionsmöglichkeiten könnte es außerdem zu Missverständnissen und Problemen aufgrund von Kartenzugriffen kommen.

6.2.2 Umsetzung

Die Umsetzung von P+D basiert auf einer angepassten MT4j-Version und deren Bildentzerrung (siehe Abschnitt 3). Zwar ist MT4j eigentlich für zweidimensionale Interfaces konzipiert worden, es unterstützt jedoch auch OpenGL⁶ und damit auch die Grundlagen für dreidimensionale Darstellungen. Um die perspektivische Verzerrung umzusetzen wurde daher ein ähnlicher Ansatz wie bei der in Abschnitt 3 beschriebenen dreidimensionalen Bildentzerrung gewählt. Dieser Abschnitt erklärt zuerst die grundsätzliche Idee hinter der Umsetzung und geht anschließend auf die genutzte dreidimensionale Szene im Detail ein, die für die Darstellung des Interfaces von P+D gebaut wurde.

Perspektivische Darstellung

Die perspektivisch korrekte Darstellung von P+D basiert auf einer virtuellen Fläche, die entgegen des physikalischen Displays gebogen ist (siehe Abbildung 6.7). Die Kurve der gebogenen, virtuellen Fläche liegt genau so im virtuellen Kamerabild, dass der damit verbundene Perspektivenwechsel, der auch bei der *bird's-eye perspective* genutzt wird (Lorenz u. a., 2008), mit der physikalischen Displaykurve übereinstimmt. Dadurch wird die virtuelle

⁶ <http://www.opengl.org/>, zuletzt aufgerufen am 13.08.2013

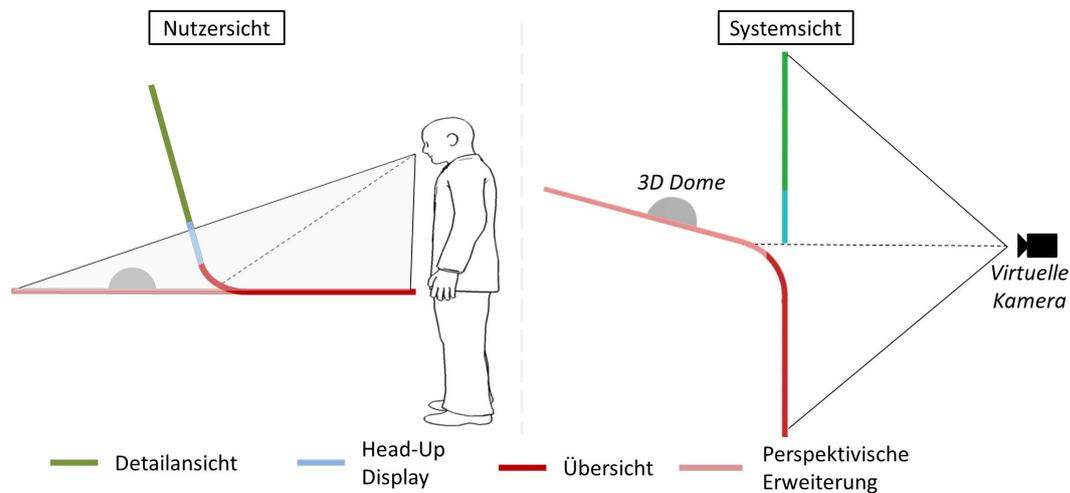


Abbildung 6.7: Die einzelnen Displaybereiche bei P+D aus Nutzersicht (links): Der horizontale Displaybereich stellt einen Kartenausschnitt in der Vogelperspektive dar, die Kurve erweitert die Karte perspektivisch korrekt. Auf dem vertikalen Bereich finden Detailinformationen Platz. Die Systemsicht unterscheidet sich deutlich davon (rechts): die Informationen werden auf eine dem Display entgegen gesetzt gebogene Fläche gerendert (in Anlehnung an Schwarz u. a., 2012).

Biegung durch die physikalische Displaybiegung ausgeglichen. Das Ergebnis ist eine perspektivisch korrekte Erweiterung der Vogelperspektive, die auf dem horizontalen Bereich sichtbar ist (siehe Abbildung 6.7). Objekte, die auf der virtuellen Fläche weit von der virtuellen Kamera entfernt sind, erscheinen dadurch auch für den Nutzer so, als seien sie von ihm entfernt. Dies führt jedoch dazu, dass Inhalte an dieser Stelle weniger gut zu erkennen sind als direkt vor dem Nutzer (Wigdor u. a., 2007b).

Die dreidimensionalen Domes, die auf entfernte Objekte durch ihr Herausragen aus dem flachen Netzplan aufmerksam machen, werden in der Szene direkt in die entsprechenden Punkte auf dem Netzplan gerendert. Da sie nicht auf die Displaykurve beschränkt sind, können sie bei einem entsprechend großen Durchmesser bis in den vertikalen Displaybereich hinein reichen. Je nach Anzahl der dort dargestellten Elemente kann es dann zu Überschneidungen kommen bei denen die Domes im Hintergrund verschwinden.

Das ebenfalls in der Kurve dargestellte HUD hängt logisch gesehen mit der Meldungsliste zusammen. Die entsprechenden Informationen sind nicht direkt mit der virtuellen Darstellungsfläche verbunden. Die Selektion mittels HUD nutzt zur Bestimmung des ausgewählten Knotenpunkts einen virtuellen Strahl, der von der virtuellen Kamera durch den Marker bis auf den Netzplan geworfen wird (Ray Casting) (Roth, 1982). Trifft dieser Strahl auf einen Knotenpunkt gilt dieser als selektiert.

Die Darstellung der Meldungsliste auf der vertikalen Displaybereich und des HUDs in der Kurve erfolgt über zwei planare Fläche, die orthogonal zur Kamera ausgerichtet sind (siehe Abbildung 6.7). Sie liegen von der virtuellen Kamera aus gesehen direkt übereinander und

bilden eine Ebene mit dem Kartenausschnitt, der auf dem horizontalen Displaybereich aus der Vogelperspektive zu sehen ist. Die zugehörigen Informationen (Meldungsliste, HUD) werden direkt in die Textur der jeweiligen Fläche gerendert. Dadurch kann die Meldungsliste unabhängig vom HUD transparent dargestellt werden. Die Funktionsweise entspricht also der einer gewöhnlichen Glasscheibe: man sieht die Dinge, die sich hinter der Scheibe befinden, es können jedoch auch Dinge direkt auf der Scheibe dargestellt werden.

6.2.3 Nutzerstudie

Basierend auf dem vorgestellten funktionsfähigen Prototyp von P+D wurde eine erste explorative Nutzerstudie mit 12 Teilnehmern durchgeführt. Unter diesen Teilnehmern war ein Stellwerkoperator, der die Problemstellung und aktuell genutzte Systeme aus dem produktiven Einsatz kennt. Die restlichen Teilnehmer hatten Erfahrungen im Bereich Usability, wobei drei von ihnen auch grundlegendes Wissen über Abläufe und Aufgaben in Kontrollräumen hatten.

Ziel der Studie war herauszufinden, ob die perspektivische Erweiterung der Netzplan-Ansicht einen Vorteil bei der Navigation und allgemeinen Arbeit mit einem solchen System darstellt. Es sollten auch mögliche Interaktionsmuster oder -probleme identifiziert werden. Aus diesem Grund wurden alle Interaktionen während der Studie gespeichert und anschließend visualisiert.

Zu Beginn wurden den Teilnehmern alle Interaktionstechniken und Visualisierungen erklärt und sie konnten sich damit vertraut machen. Anschließend bearbeiteten sie sechs unterschiedliche Aufgaben, die sowohl das Nachfahren einer bestimmten U-Bahn-Linie als auch das Bearbeiten einer Störungsmeldung in der Meldungsliste beinhaltete. Nachdem die Aufgaben gelöst wurden, füllte jeder Teilnehmer einen Fragebogen aus. Die Antworten wurden mit Hilfe von 5-stufigen Likert Skalen erfasst. Im Folgenden werden die zwei besten und die zwei schlechtesten Antwortmöglichkeiten (*Ich stimme (nicht) zu*, *Ich stimme absolut (nicht) zu*) zum einfacheren Verständnis zusammengefasst ausgewertet. Die gesamte Studie dauerte pro Teilnehmer zwischen 60 und 90 Minuten.

Der Großteil der Nutzer (92%) bewertete die perspektivische Darstellung von P+D im Zusammenspiel mit der Detailansicht als verständlich. In diesem Zusammenhang gaben außerdem 75% der Teilnehmer an immer alle benötigten Informationen im Blick gehabt zu haben. Dies stützt die Analyse der Bewegungsdaten, die gezeigt hat, dass mit der perspektivischen Erweiterung einige Abkürzungen beim Verfolgen von vorgegebenen Pfaden und Finden von Problemen genutzt wurden. Die Teilnehmer nutzten einen kürzeren Pfad zum Ziel, während dieses nur in der perspektivischen Ansicht zu sehen war. Dieses Verhalten wurde durch die dreidimensionalen Domes in der perspektivischen Erweiterung unterstützt. Neun Teilnehmer bewerteten die Hervorhebung durch die Domes positiv. Das HUD wurde von den Teilnehmern ebenfalls als verständlich eingeschätzt (92%). Auf die Frage ob die Miniaturansicht im HUD zusätzliche bei der Orientierung geholfen hat, bestätigten dies 83%. Ebenfalls 83% gaben an die Selektion mittels Marker im HUD problemlos durchführen zu können. Hinsichtlich der Interaktionsgestaltung wurden die getroffenen Annahmen ebenfalls bestätigt.

Die Verlagerung des Interaktionsschwerpunkts auf den horizontalen Bereich hat dazu beigetragen, dass 92% der Teilnehmer keine spürbare Erschöpfung nach der Studie angaben. Außerdem bewerteten nur 42% die Interaktionen auf dem vertikalen Bereich während der Studie als anstrengender.

Insgesamt hat die Studie gezeigt, dass die Perspective+Detail Visualisierung leicht verständlich ist. Sie hat außerdem während der Studie dazu geführt, dass Abkürzungen beim Verschieben des Kartenausschnitts genutzt wurden, wenn das Ziel in der perspektivischen Erweiterung sichtbar war. Die Funktionsweise des HUD und der Miniaturansicht der gesamten Karte wurden ebenfalls als verständlich und hilfreich bewertet. Von den Teilnehmern besonders hervorgehoben wurden die dreidimensionalen Domes im perspektivischen Bereich, die für eine erhöhte Wahrnehmbarkeit einzelner Punkte gesorgt haben.

6.3 PerspectiveTable

Aufbauend auf der Visualisierungsidee von Perspective+Detail wird in diesem Abschnitt eine Arbeitsumgebung für kollaboratives Arbeiten an zwei voneinander entfernten Standorten (Remote Collaboration) vorgestellt⁷. Der PerspectiveTable (PT) führt dabei den Grundgedanken der TeleImmersion (Sadagic u. a., 2001) weiter. Die Vermischung von realer Umgebung und Remote Collaboration soll möglichst nahtlos sein und die Vorteile beider Welten miteinander kombinieren. Der Aufbau des PT ähnelt dabei dem Grundgedanken des DigiTables (Coldefy u. Louis-dit Picard, 2007), geht in der Umsetzung aber ein Stück weiter und kombiniert den horizontalen und vertikalen Displaybereich nahtlos miteinander. Er entspricht somit einer vollständig digitalen Version des Virtual Round Tables (Broll u. a., 2000) für zwei Personen.

Dieser Abschnitt geht zuerst auf die konzeptionellen Unterschiede zwischen Perspective+Detail und dem PT ein. Er erklärt die Umsetzungsdetails des Systems und schließt mit zwei Nutzerstudien⁸. Beide Studien haben gezeigt, dass Remote Collaboration durch die Angleichung der links/rechts-Darstellung für beide Teilnehmer (Spatial Mirroring) vereinfacht werden kann.

⁷ Der Inhalt dieses Abschnitts basiert auf einer publizierten Arbeit (Hennecke u. a., 2013c). Die Autoren der Veröffentlichung sind Fabian Hennecke, Simon Völker, Maximilian Schenk, Hauke Schaper, Jan Borchers und Andreas Butz. Die zugrunde liegenden Arbeiten wurden von Maximilian Schenk im Rahmen seiner Projekt- (Schenk, 2012b) und Diplomarbeit (Schenk, 2012a), beides betreut von Fabian Hennecke, umgesetzt.

⁸ Die zweite Nutzerstudie und die Implementierung des Studiensystems wurde in Zusammenarbeit mit der MMI-Gruppe der RWTH Aachen durchgeführt. Die Arbeit dort wurde von Hauke Schaper und Simon Völker durchgeführt.

6.3.1 Prinzip

Der PerspectiveTable verbindet die Prinzipien der TeleImmersion (Sadagic u. a., 2001) mit denen von Perspective+Detail (siehe Abschnitt 6.2). Wie bei P+D wird die horizontale Arbeitsfläche des Curve durch eine virtuelle Darstellung in der Displaykurve erweitert. Am anderen Ende dieser Erweiterung sitzt jedoch in Anlehnung an das TeleImmersion-Projekt oder den DigiTable (Coldefy u. Louis-dit Picard, 2007) ein virtueller Avatar, der den anderen Arbeitskollegen repräsentiert. Im Gegensatz zu diesen Systemen verbindet der PT die beiden Bereiche Arbeitsfläche und Repräsentation des Gegenübers jedoch nahtlos (siehe Abbildung 6.9). Zusätzlich dazu dient der vertikale Displaybereich nicht nur zur Darstellung des Avatars, sondern auch als persönliche Arbeitsfläche, vergleichbar mit einem normalen Desktop-Monitor.

Diese virtuelle Erweiterung bietet, wie auch schon bei P+D, verschiedene Vorteile. Sie bringt aber auch Eigenschaften mit sich, die beim Interface- und Interaktionsdesign berücksichtigt werden müssen. Sowohl die Vorteile als auch die zu berücksichtigenden Eigenschaften werden in einzelnen Abschnitten vorgestellt.

Aufbau des Systems

Das prinzipielle System des PerspectiveTable basiert auf zwei sich gegenüber stehenden Instanzen einer Perspective+Detail Visualisierung (siehe Abbildung 6.8). Die Grundlage des Systems sind somit zwei gebogene interaktive Displays. Das Grundkonzept entspricht im Wesentlichen einem gewöhnlichen Schreibtisch an dessen Enden sich zwei Personen gegenüber sitzen. Beide Nutzer schauen auf ihr Display und sehen dort eine virtuelle Erweiterung ihrer horizontalen Arbeitsfläche. Diese Erweiterung knüpft nahtlos an die horizontalen Displaybereiche der Displays an und ist von beiden Seiten zugänglich.

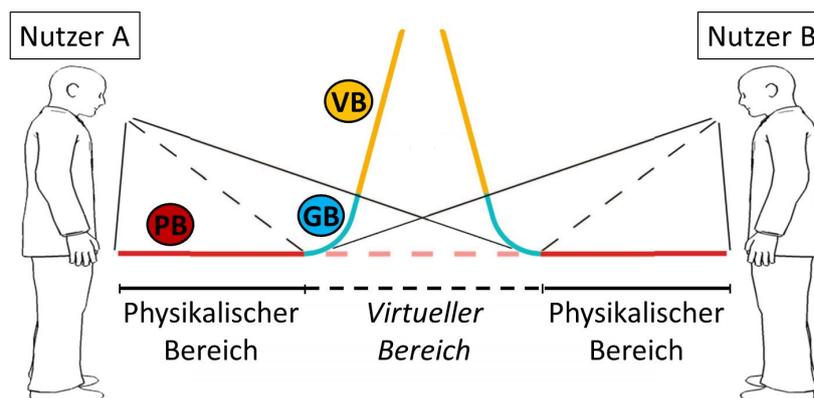


Abbildung 6.8: Beide Nutzer schauen auf ein gebogenes Display, dessen horizontaler Displaybereich virtuell erweitert wird. Im Unterschied zu Perspective+Detail (Schwarz u. a., 2012) ist die virtuelle Erweiterung jedoch nicht exklusiv zugänglich, sondern überschneidet sich und ist für beide Nutzern erreichbar.

Durch diesen systematischen Aufbau ergeben sich für den PerspectiveTable drei Arten von semantisch getrennten Bereichen (siehe Abbildung 6.9). Diese Bereiche unterscheiden sich sowohl in der Sichtbarkeit von Inhalten als auch in den Zugriffsrechten der beiden Nutzer.

Persönliche Bereiche Die persönlichen Bereiche des PerspectiveTable befinden sich unmittelbar vor den Nutzern auf den horizontalen Displaybereichen. Die Bereiche erlauben nicht nur die direkte Interaktion mit Objekten, sondern sind für das Gegenüber schwer einzusehen. Zwar können Objektpositionen und ungefähre Informationen von Objekten im persönlichen Bereich des Gegenübers erkannt werden, Details sind aufgrund der perspektivischen Darstellung und der virtuellen Entfernung jedoch nicht zu erkennen. Um diesen Effekt zu verstärken wäre es auch denkbar die Objekte hier zum jeweiligen Nutzer zu orientieren, um die bestmögliche Les- und Erkennbarkeit zu gewährleisten. Zusätzlich zu diesen Einschränkungen der Sichtbarkeit hat auch nur der Nutzer am jeweiligen Display Zugriff auf Objekte in seinem persönlichen Bereich. Dort wird keine Interaktion des jeweiligen Gegenübers zugelassen.

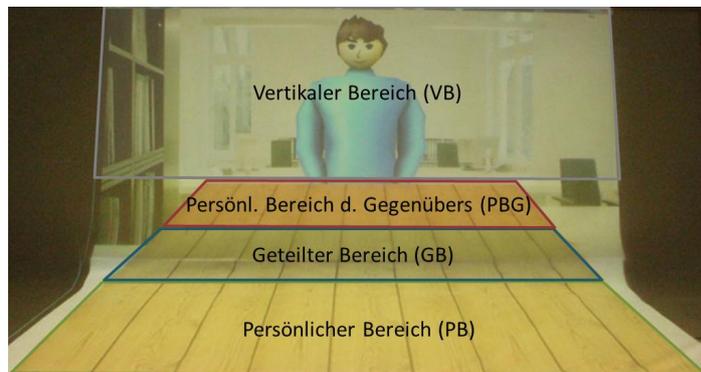


Abbildung 6.9: Der PerspectiveTable verfügt über vier verschiedene Bereiche: (a) den persönlichen Bereich (PB), (b) den geteilten Bereich (GB), (c) den persönlichen Bereich des Gegenübers (PBG) und (d) den vertikalen Bereich (VB). Die Hervorhebung der Bereiche findet beim funktionsfähigen Prototyp nicht statt.

Geteilter Bereich Der geteilte Bereich liegt zwischen beiden persönlichen Bereichen (siehe Abbildung 6.9). Er liegt vollständig im virtuellen Raum der PerspectiveTable-Umgebung und wird in der Kurve der Displays dargestellt. Ähnlich wie bei den persönlichen Bereichen des jeweiligen Gegenübers sind die Objekte auch hier perspektivisch dargestellt. Im geteilten Bereich kommt außerdem noch hinzu, dass die Ausrichtung der Objekte nicht klar definiert ist. Da beide Nutzer die Objekte in diesem Bereich perspektivisch sehen und sie erreichen können, muss die Ausrichtung der Objekte variabel sein.

Im Gegensatz zu den persönlichen Bereichen haben beide Nutzer permanenten, direkten Zugriff auf den geteilten Bereich. Mögliche Interaktionsprobleme, wenn Nutzer gleichzeitig auf ein Objekt zugreifen, müssen durch Kommunikation zwischen den Arbeitspartnern gelöst werden. Allerdings ist durch die Positionierung in der Displaykurve die Interaktion

weniger genau als auf den horizontalen Displaybereichen. Dies liegt daran, dass das Verhältnis zwischen virtueller und physikalischer Oberfläche nicht 1:1 wie auf dem horizontalen Displaybereich entspricht. Stattdessen entspricht die gebogene Displayoberfläche einer größeren, virtuellen Fläche. Neben dem perspektivischen Darstellungseffekt, dass Objekte in größerer Entfernung kleiner erscheinen, erschwert dieses verschobene Verhältnis zwischen darstellender und virtueller Fläche die Interaktion zusätzlich.

Vertikaler Bereich Der vertikale Bereich des PerspectiveTable Interfaces füllt den vertikalen Displaybereich des Curve vollständig aus und wird für verschiedene Zwecke genutzt (siehe Abbildung 6.9). Die wichtigste Anzeige in diesem Bereich ist der virtuelle Avatar des Gegenübers. Sollte der virtuelle Tisch extrem lang werden, so ist es außerdem auch möglich, dass Teile des Tisches hier erscheinen um die perspektivische Illusion aufrecht zu erhalten. Ein zweiter Einsatzzweck der vertikalen Fläche besteht in der Nutzung als gewöhnlicher Bildschirm für den Nutzer. Hier können Dokumente geöffnet und bearbeitet werden. Wie bei einem gewöhnlichen Bildschirm sind auch die Darstellungen in diesem Bereich von der anderen Seite nicht sichtbar.

Aufgrund der Visualisierungsmöglichkeiten des PerspectiveTable sind hier auch weitere Darstellungsvarianten umsetzbar. So ist es zum einen möglich die Position der Dokumente mit einfachen Rechtecken sichtbar zu machen, so dass der Avatar des Gegenübers davon verdeckt wird. Ebenfalls denkbar ist das flexible Umdrehen von Dokumenten auf dem vertikalen Bereich, um schnell und einfach Inhalte teilen zu können. Zusätzlich zum gemeinsamen Bearbeiten von Dokumenten auf dem virtuellen Tisch könnten hier auch gemeinsame Dokumente geöffnet und bearbeitet werden. Die dabei auftretenden Orientierungsprobleme werden im Abschnitt 6.3.3 genauer beschrieben.

Konfigurierbare Arbeitsflächen

Durch die rein virtuelle Erweiterung der physikalischen Arbeitsfläche ist diese zur Laufzeit frei konfigurierbar. So kann neben der Breite und der Neigung auch die Länge der gesamten Arbeitsfläche in Form der virtuellen Erweiterung verändert werden. Es ist somit möglich den geteilten Bereich des virtuellen Arbeitstischs, beispielsweise in Abhängigkeit von der Anzahl vorhandener Objekte, dynamisch zu vergrößern. Bei wenigen Objekten ist der geteilte Bereich (siehe Abbildung 6.9) klein und wächst mit der Anzahl zu verwaltender Objekte. Zu beachten ist hierbei jedoch die mögliche Verschiebung von Objekten entlang der Tiefenachse, die dazu führen kann, dass Objekte nicht mehr gefunden werden. Darüber hinaus ist auch eine Vergrößerung der persönlichen Bereiche möglich, wobei diese dann eventuell nicht mehr ausschließlich auf den horizontalen Displaybereich beschränkt sind.

Virtueller Avatar

Der Arbeitspartner am anderen Ende des PerspectiveTable wird durch einen virtuellen Avatar repräsentiert. Der Avatar bietet dabei im Vergleich zur Darstellung eines normalen Kamerabilds zwei Vorteile. Ein Hauptgrund für den Avatar ist, dass er Sichtkontakt-Probleme, die

aufgrund der Kameraposition relativ zum Display auftreten, vermieden. Das Problem entsteht wenn ein Nutzer auf den Bildschirm schaut, auf dem sein Gegenüber dargestellt wird und sich die Kamera, die ihn dabei aufnimmt, nicht auf dieser optischen Achse befindet. Meistens befindet sie sich oberhalb vom Bildschirm, so dass der Nutzer bei der Wiedergabe des Kamerabilds nach unten zu schauen scheint. Dies ist bei Anwendungen, die das Kamerabild nur in einem kleinen Fenster darstellen, noch vertretbar. Allerdings stört es die korrekte Darstellung der virtuellen Umgebung massiv, wenn das Gegenüber scheinbar ständig nach unten schaut.

Der zweite Vorteil des Avatars besteht in der guten Integration in die virtuelle Arbeitsumgebung. Somit ist es möglich die Darstellung der Umgebung und des Avatars aneinander anzupassen und gemeinsam zu verändern. SpatialMirroring (siehe Abschnitt 6.3.3) ist ein Beispiel für eine solche Anpassung. Die vollständige Spiegelung der Darstellung kann nur unbemerkt funktionieren, da das Bild des Gegenübers durch den Avatar abstrahiert wird.

Allerdings führt der Avatar in der aktuellen Umsetzung auch zum Darstellungsverlust von kleinen Gesten und Gesichtsausdrücken. Zukünftige Weiterentwicklungen beim Tracking des Nutzers könnten dieses Problem jedoch lösen und gleichzeitig die gewonnene Anonymität durch den Avatar bewahren.

Blending

Die gebogene Displayform und die ganzflächige Unterstützung von Touch-Eingabe ermöglichen neben den bereits bekannten Interface-Interaktionen (Pointing, Dragging, Flicking) auch neuartige Metaphern und Blends (Imaz u. Benyon, 2007). Bisherige Blends, die bei herkömmlichen Computern genutzt werden, orientieren sich an den Gegebenheiten eines echten Schreibtischs und verknüpfen sie mit den Interaktionsmöglichkeiten eines Computers. Durch diese Verbindung wird die Funktion von Befehlen oder Aktionen offensichtlicher - Dokumente, die in den Papierkorb geworfen werden, werden gelöscht. Der Nutzer muss sich also nicht mit den tieferliegenden Systembefehlen auseinandersetzen. Dies erleichtert besonders neuen Nutzern den Einstieg in die Bedienung eines Systems.

Durch den PerspectiveTable können nun aufgrund der Displayform und der nahtlosen, perspektivisch korrekten Darstellung neue Blends definiert werden. Der hier vorgestellte Blend zum Übergeben eines Dokuments stellt nur ein erstes Konzept dar. Folgearbeiten können jedoch auf dieser Idee aufbauen und sie weiterentwickeln.

Während aktuelle Systeme dafür einen expliziten Dateitransfer (z.B. Skype) nutzen, kann das Dokument am PerspectiveTable ähnlich wie in der Realität an den Arbeitspartner übergeben werden. Hierzu selektiert der Nutzer das Dokument, das im eigenen persönlichen Bereich liegt, mit einem anhaltenden Touch und berührt anschließend mit der anderen Hand den vertikalen Displaybereich. Sein Gegenüber kann das Dokument dann mit einer invers verlaufenden Geste annehmen und am gewünschten Zielort ablegen. Abbildung 6.10 zeigt, wie das Gegenüber angezeigt bekommen könnte, dass ein Dokument übergeben werden soll. Der Blend besteht in diesem Fall aus der Kombination einer positionsabhängigen Interpretation einfacher Touch-Eingaben und dem gewöhnlichen Übergeben von Dokumenten an einem normalen Schreibtisch.



Abbildung 6.10: Eine mögliche Darstellungsform für das Herüberreichen eines Dokuments am PerspectiveTable: Der Nutzer kann das Dokument nun per Touch selektieren und mit einem gleichzeitigen zweiten Touch in seinem persönlichen Bereich ablegen.

6.3.2 Umsetzung

Auch wenn die grundsätzliche Idee des PerspectiveTable von Perspective+Detail ausgeht, wurde für die technische Umsetzung ein neuer Ansatz gewählt. Da MT4j, das bei Perspective+Detail genutzt wurde, keine weitreichende Unterstützung für dreidimensionale Grafiken und die Einbindung eines Avatars hat, musste eine alternative Grafik-Engine genutzt werden. Der PerspectiveTable basiert daher auf einer Version der jMonkeyEngine (jME), die die zweidimensionale Shader-Entzerrung (siehe Abschnitt 3.2) nutzt. Die eigentliche Darstellung der virtuellen Arbeitsfläche entspricht der Darstellung des Netzplans in Perspective+Detail (siehe Abschnitt 6.2.1), weswegen an dieser Stelle auf Details verzichtet wird. Zur Anbindung der zentralen Touch-Schnittstelle des Curve wurde ein einfacher TUIO-Client in die jME integriert.

Die Avatar-Animationen basieren auf dem optischen Tracking mit der Microsoft Kinect⁹, die sich oberhalb des Displays befindet. Zwar ist das Kinect-Tracking vergleichsweise einfach zu handhaben und stabil, doch kam es im Verlauf des Projekts immer wieder zu Trackingproblemen, da die Nutzer am PerspectiveTable sitzen und nicht stehen. Im Verlauf des Projekts wurde die Software der Kinect um einen Modus zur Erkennung einer sitzenden Person erweitert (Kinect SDK Version 1.5). Aufgrund des Umfangs konnte die Tracking-Software allerdings nicht mehr vollständig optimiert werden.

Die Kommunikation zwischen der Kinect-Tracking-Software und dem PerspectiveTable ist ebenso wie TUIO vollständig netzwerkbasierend (UDP). Theoretisch können durch die Nutzung von UDP einzelne Pakete verloren gehen, aber im Rahmen der Arbeit hat dies keine Probleme verursacht. Durch die Beschränkung auf einfache UDP-Pakete ist die Anbindung eines entfernten Systems extrem einfach und auch über Betriebssystemgrenzen hinweg mög-

⁹ <https://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>, zuletzt aufgerufen am 21.08.2013

lich. Die Studie zum Spatial Mirroring, die auf dem PerspectiveTable aufbaut, wurde problemlos zwischen dem Curve in München und dem BendDesk in Aachen durchgeführt.

6.3.3 Spatial Mirroring

Spatial Mirroring (räumliche Spiegelung) bezeichnet eine Visualisierungstechnik, die aufgrund der nahtlosen Darstellung des PerspectiveTable realisiert werden kann (Hennecke u. a., 2013c). Sie wurde im Rahmen des PerspectiveTable-Projekts gemeinsam mit der RWTH Aachen entwickelt¹⁰. Spatial Mirroring (Hennecke u. a., 2013b) vereinheitlicht die Referenzsysteme zweier Nutzer in Bezug auf links und rechts, um ein gemeinsames Arbeiten an voneinander entfernten Standorten zu vereinfachen. Für beide Nutzer stimmen links und rechts im virtuellen Arbeitsraum durch Spatial Mirroring überein.

Dieser Abschnitt erklärt das grundlegende Spiegelungsprinzip hinter Spatial Mirroring und dessen technische Umsetzung im PerspectiveTable. Aufbauend auf dieser Umsetzung wurden außerdem zwei Studien durchgeführt, die die Benutzbarkeit und den Effekt von Spatial Mirroring untersuchen. Die erste Studie untersucht dabei mögliche Verständigungsprobleme beim Referenzieren von Objekten durch Angaben mit „links“ und „rechts“. Die zweite explorative Studie vergleicht die Zusammenarbeit mit und ohne Spatial Mirroring anhand eines zu lösenden Puzzles. Beide Studien dienen als Grundlage für eine erste Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von Spatial Mirroring.

Prinzip

Um die Darstellung bezüglich der Referenzen für links und rechts für beide Teilnehmer anzugleichen, nutzt Spatial Mirroring mehrere Spiegelungen. Die Spiegelungen der Darstellung werden jedoch nur bei einem Nutzer vorgenommen. Würden die Ansichten beider Nutzer gespiegelt, hätten die Nutzer wieder verschiedene Referenzsysteme.



Abbildung 6.11: Anwendung der einzelnen Schritte von Spatial Mirroring: (A) und (B) zeigen die normalen Ansichten zweier Nutzer. (C) zeigt die erste Spiegelung der Ansicht von Nutzer 2 und (D) die abschließende Spiegelung der vorhandenen Inhalte auf dem virtuellen Tisch.

¹⁰Der Inhalt dieses Abschnitts basiert auf einer publizierten Arbeit (Hennecke u. a., 2013b). Die Autoren der Veröffentlichung sind Fabian Hennecke, Simon Völker, Maximilian Schenk, Hauke Schaper, Jan Borchers und Andreas Butz. Die zugrunde liegende Arbeit wurde von Maximilian Schenk im Rahmen seiner Diplomarbeit (Schenk, 2012a), betreut von Fabian Hennecke, umgesetzt.

Schritt 1: Normale Ansicht Der Ausgangspunkt für Spatial Mirroring ist die unveränderte Darstellung des PerspectiveTable (siehe Abbildung 6.11 A und B). Am gegenüberliegenden Ende befindet sich der Avatar des anderen Nutzers und sowohl auf dem virtuellen Tisch als auch auf der vertikalen Fläche befinden sich Objekte. Der in Abbildung 6.11 dargestellte Fall bezieht dabei Objekte im vertikalen Bereich mit ein, deren Inhalt für beide Teilnehmer sichtbar ist. Unabhängig von den hier genannten Spiegelungen können die Inhalte auf dem vertikalen Displaybereich auch ausgeblendet oder undurchsichtig gestaltet werden. Diese Umsetzung entspricht einem unveränderten PerspectiveTable wie in Abschnitt 6.3 beschrieben (Schenk, 2012a). Sowohl die Darstellung als auch die Interaktion bilden das gemeinsame Arbeiten an einem virtuellen Tisch realitätsgetreu nach.

In der normalen Ansicht hat also jeder Nutzer sein eigenes Referenzsystem für links und rechts. Die Objekte auf dem vertikalen Displaybereich sind für einen Nutzer korrekt orientiert, der andere Nutzer sieht sie spiegelverkehrt. Dies entspricht dem Verhalten eines durchscheinenden Blatt Papiers, auf dem Text zu lesen ist. Dieser ist auf der Vorderseite lesbar und erscheint auf der Rückseite spiegelverkehrt.

Schritt 2: Spiegelung der Darstellung Der erste Schritt zu einem vereinheitlichten Referenzsystem besteht in der vollständigen Spiegelung der Darstellung für einen Nutzer (siehe Abbildung 6.11 C). Die Spiegelung betrifft sowohl die Inhalte auf dem virtuellen Tisch als auch auf dem vertikalen Displaybereich. Da die gesamte Darstellung gespiegelt wird, kann dieser Schritt ohne großen Mehraufwand in der vom PerspectiveTable genutzten shader-basierten Entzerrung umgesetzt werden.

Durch diesen Schritt werden bereits die allgemeinen Referenzsysteme der Nutzer für links und rechts aneinander angeglichen. Sowohl Objekte, die auf dem virtuellen Tisch liegen, als auch Objekte auf dem vertikalen Displaybereich befinden sich nun für beide Nutzer auf derselben Seite des Tisches. Der spiegelverkehrte Inhalt ist auf dem vertikalen Bereich für Nutzer 2 nun normal lesbar, während die Inhalte auf dem Tisch jedoch spiegelverkehrt sind.

Schritt 3: Spiegelung des Inhalts Um die Spiegelung des Inhalts von Objekten auf dem virtuellen Tisch wieder auszugleichen, muss deren Inhalt erneut gespiegelt werden. Wichtig ist hierbei, dass sie nur die Darstellung von Inhalten auf dem Tisch betrifft.

Diese Spiegelung kann allerdings nicht in der shader-basierten Entzerrung des PerspectiveTable umgesetzt werden. Stattdessen muss das Programm dafür Sorge tragen, dass diese Inhalte schon spiegelverkehrt gerendert werden. Anschließend dreht der Shader sie bei der gesamten Spiegelung wieder um.

Durch die Befolgung dieser Schritte sehen beide Nutzer eine virtuelle Arbeitsumgebung vor sich, in der beide Nutzer die gleiche Wahrnehmung von links und rechts haben (siehe Abbildung 6.11 A und D). Zwar stehen die Inhalte auf dem virtuellen Tisch für Nutzer 2 in diesem Beispiel noch auf dem Kopf, jedoch werden keine Inhalte mehr spiegelverkehrt dargestellt.

Darstellungsfehler Durch den letzten Spiegelungsschritt entsteht ein Darstellungsfehler, der auch schon in anderen Arbeiten (Matsushita u. a., 2004) beschrieben wurde. Die

personalisierte Darstellung von Inhalten auf dem (virtuellen) Tisch führt dazu, dass zwar die Position auf dem Tisch für beide Nutzer identisch ist, die Position von Inhalten innerhalb des Objekts jedoch voneinander abweicht. Im konkreten Beispiel in Abbildung 6.11 wird dies an der spitzen Ecke des großen R auf dem virtuellen Tisch deutlich. Während es für Nutzer 1 zur Tischmitte hin orientiert ist, sieht es für Nutzer 2 so aus als zeige die Spitze des R nach außen.

Dieses Problem sollte beim Verwenden von Spatial Mirroring unbedingt beachtet werden, da es ansonsten zu Missverständnissen kommen kann. Je nach Nutzungsszenario ist es jedoch fraglich, ob eine so genaue Interaktion mit den Inhalten der Objekte auf dem Tisch überhaupt nötig ist. Die folgenden Nutzerstudien lassen diesen Aspekt daher bewusst außen vor und beschäftigen sich mit der allgemeinen Angleichung der links und rechts Referenz.

Effekte von Spatial Mirroring

Die erste Studie (Schenk, 2012a) untersuchte inwieweit Spatial Mirroring zum einfacheren Verständnis simpler *links/rechts*-Anweisungen beitragen kann. Zu diesem Zweck wurde in der Studie eine einfache Kollaboration mit dem virtuellen Avatar am Curve simuliert. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass Spatial Mirroring Vorteile bei der benötigten Interaktionszeit und der Fehleranfälligkeit bietet.

Dieser Abschnitt stellt den Studienaufbau und die Studiendurchführung vor. Die Auswertung der Studie wird dann genutzt, um die Hypothesen bezüglich der Vorteile von Spatial Mirroring zu überprüfen. Abschließend wird ein erstes Fazit zur Einsatztauglichkeit und dem Nutzen eines angeglichenen *links/rechts*-Referenzsystems gezogen.

Hypothesen Die zwei Hypothesen, die in der Studie untersucht wurden, beziehen sich auf die Vereinfachung von Remote Collaboration durch Spatial Mirroring in Form von schnellerer Interaktion und einer geringeren Fehlerrate.

H1 Spatial Mirroring führt zu einer besseren Trefferquote bei der Auswahl von Objekten, die durch einfache *links/rechts*-Anweisungen referenziert werden.

H2 Spatial Mirroring führt zu kürzeren Interaktionszeiten, da die kognitive Last bei der Objektauswahl durch das angegliche Referenzsystem gesenkt wird.

Zur Überprüfung dieser Hypothesen wurden objektive Messdaten während der Studie erhoben.

Studiendesign Die Hypothesen sollten mit Hilfe einer Selektionsaufgabe untersucht werden. Die Teilnehmer wurden gebeten eine bestimmte virtuelle Spielkarte aus einer Reihe von Karten auf dem virtuellen PerspectiveTable auszuwählen. Dazu wurden im Rahmen der Studie die Faktoren *Anweisung* und *Visualisierung* intrapersonell variiert (3×2). Die Karten wurden immer über die Tischseite, auf der sie sich befanden, und ihre Position innerhalb der Kartenreihe referenziert.

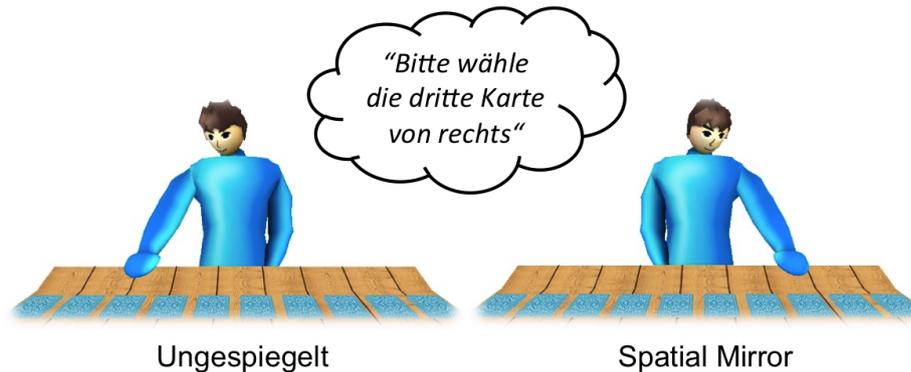


Abbildung 6.12: Studienablauf der ersten Studie: Der Avatar bat den Teilnehmer darum eine von zehn Spielkarten auszuwählen. Dazu nutze er sowohl separate Sprachkommandos und Zeigegesten als auch eine Kombination beider Anweisungstypen. Die Darstellung erfolgte sowohl ungespiegelt als auch mit Hilfe des Spatial Mirrors.

Die *Anweisungen* an die Versuchspersonen während der Studie bestanden aus Sprachkommandos, Zeigegesten und einer Kombination dieser beiden Varianten (siehe Abbildung 6.12).

Die sprachlichen Anweisungen (Beispiel: "*Bitte wähle die dritte Karte von recht aus.*") und die Zeigegesten (Avatar zeigt auf eine Karte und schaut auch in die Richtung) waren dabei die einzigen Hinweise auf die korrekte Karte. In der Kombinationsvariante wurden beide Anweisungstypen vom Avatar gleichzeitig genutzt. Das links/rechts-Referenzsystem der Anweisungen bezog sich bei allen Anweisungstypen stets auf die ego-zentrische Sicht des Avatars.

Bei der *Visualisierung* wurde zwischen einer gewöhnlichen Darstellung und dem Spatial Mirror unterschieden. Die gewöhnliche Darstellung entspricht dabei dem natürlichen links/rechts-Referenzsystem. Die rechte Seite des PerspectiveTable aus Sicht des Teilnehmers entspricht dabei der linken Seite aus Sicht des Avatars. Die mit Hilfe von Spatial Mirroring gespiegelte Visualisierung gleicht die Sicht des Avatars und des Teilnehmers an, so dass beide hier über ein vereinheitlichtes Referenzsystem verfügen.

Technischer Aufbau Der technische Aufbau der Studie entspricht weitestgehend der normalen Umsetzung des PerspectiveTable (siehe Abschnitt 6.3). Der größte Unterschied besteht darin, dass der virtuelle Avatar nicht anhand von Trackingdaten animiert wurde. Die Bewegungen basierten stattdessen auf zuvor festgelegten Animationsdaten. Zusätzlich wurden alle verwendeten Sprachkommandos vor der Studie aufgezeichnet und während der Studie abgespielt. So wurde sichergestellt, dass die Anweisungen für alle Teilnehmer der Studie identisch waren, um Einflüsse durch abweichende Bewegungen oder Ansagen auszuschließen.

Teilnehmer An der Studie haben 19 Personen (neun weiblich, durchschnittlich 29,6 Jahre ($m = 12$)) teilgenommen. Alle Teilnehmer gaben an Rechtshänder zu sein und Erfahrungen

im Umgang mit Touch Displays zu haben. Bis auf drei Personen haben alle Probanden angegeben Erfahrungen im Umgang mit Video-Telefonie (Skype) zu haben.

Ablauf Die Teilnehmer wurden zu Beginn der Studie mittig vor den Curve gesetzt und mit dem System vertraut gemacht. Dazu absolvierten sie einfache Selektionsaufgaben, die der späteren Studienaufgabe ähnelten und die verschiedenen Anweisungstypen berücksichtigte. Während der Studie erhielten die Testpersonen kein Feedback darüber ob ihre Kartenwahl korrekt war.

Messungen Bei jedem Teilnehmer wurde sowohl die Korrektheit der Selektion als auch die benötigte Zeit bis zur Auswahl gemessen. Die Zeit wurde bei den verschiedenen Anweisungstypen ab dem Zeitpunkt gemessen an dem die Informationen zur Auswahl vollständig waren. Bei den Sprachanweisungen wurde die Messung also gestartet sobald der Nutzer wusste die wievielte Karte von welcher Seite er selektieren soll. Bei den Zeigegesten wurde die Zeitmessung ab dem Moment gestartet in dem der Avatar mit seinem Arm und der Blickrichtung auf die entsprechende Karte gezeigt hat. In der kombinierten Anweisung startete die Messung sobald die Anweisungen auf allen Kanälen vollständig übermittelt wurden.

Analyse Die Analyse der Varianten *Sprachanweisung* und *Zeigegeste* basieren für beide Visualisierungen auf denselben Datensätzen. Der Grund hierfür liegt darin, dass diese beiden Anweisungstypen unabhängig von der Visualisierung sind. Die Darstellung während der Audioanweisung unterscheidet sich im normalen Fall nicht von der gespiegelten Version. Ebenso zeigt der Avatar unabhängig von der Visualisierung immer direkt auf die korrekte Karte bei der Zeigegeste. Die Nutzer mussten die entsprechenden Anweisungstypen also nur einmal absolvieren. Im Gegensatz dazu wurden die Visualisierungen im Fall der kombinierten Anweisungen beide durchlaufen, da hier Unstimmigkeiten zwischen den Anweisungstypen auftreten.

Falls nicht anders angegeben basieren die hier vorgestellten Ergebnisse auf einer Varianzanalyse mit Messwiederholungen (*repeated measures analysis of variance, ANOVA*): *Anweisung* \times *Visualisierung* (3×2).

Ergebnisse Die Ergebnisse der Studie werden im Folgenden anhand der Hypothesen voneinander getrennt betrachtet. In Bezug auf die **Trefferquote (H1)** zeigen die Messdaten einen signifikanten Effekt der Visualisierung ($F_{1, 18} = 222.493, p < .05$). 99% der Selektionen war beim Spatial Mirror korrekt, während dies nur auf 43% der normalen Visualisierung zutrifft. Dieser Unterschied beruht vor allem auf den Fehlern, die bei der kombinierten Anweisung und der normalen Visualisierung gemacht wurden. Hier fiel die Trefferquote mit 29% deutlich schlechter aus als beim Spatial Mirror (100%).

Der Anweisungstyp hat ebenfalls einen signifikanten Effekt auf die Korrektheit der Selektion ($F_{2, 36} = 18.691, p < .05$). Post-hoc Tests zeigen, dass die Zeigegeste (100%) besser abschnitt als die kombinierte Anweisung (64%) und die reine Audioanweisung (49%) (alle $p < .05$). Zusätzlich wurde ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen der Visualisierung und dem Anweisungstyp identifiziert ($F_{1, 074, 19.340} = 82.899, p < .05$). Betrachtet man die Korrektheit der Selektionen für die beiden Visualisierungen fällt auf, dass der Spatial Mirror eine Trefferquote von fast 100% erreicht, während die normale Visualisierung vor allem von

den schlechten Werten bei reinen Audioanweisungen (0%) und den kombinierten Anweisungen (29%) leidet.

Die *erste Hypothese* kann somit bestätigt werden. Sowohl bei einzelnen Anweisungstypen als auch im gesamten Mittel bietet der Spatial Mirror gegenüber der normalen Darstellung eine geringere Fehlerquote. Im Rahmen der Studie hat er also deutlich zur Unterstützung einer korrekten Selektion beigetragen.

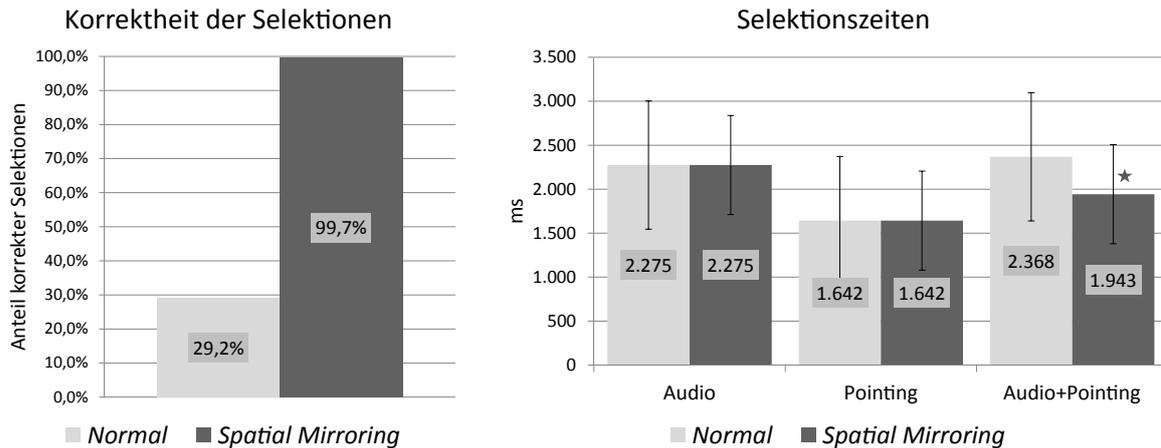


Abbildung 6.13: Die Anzahl der korrekten Selektionen ist durch Spatial Mirroring deutlich höher als bei der normalen Visualisierung (links). Ähnlich verhält es sich mit den Selektionszeiten: diese ist bei Spatial Mirroring bei Audio+Pointing signifikant geringer, während die Zeiten in den einzelnen Konditionen keinen Unterschied aufweisen (rechts).

Zusätzlich zur Untersuchung der Trefferquote wurde auch die benötigte **Selektionszeit (H2)** ausgewertet. Hier zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Effekt der Visualisierung ($F_{1, 18} = 12.628, p < .05$), wobei der Spatial Mirror ($m = 1953$ ms; $sd = 1135$ ms) zu einer schnelleren Selektion führte als die normale Visualisierung ($m = 2095$ ms; $sd = 1245$ ms). Wie schon bei der Trefferquote hat der Anweisungstyp auch einen signifikanten Effekt auf die Selektionszeiten ($F_{2, 17} = 19.212, p < .05$). Post-hoc Tests zeigen, dass es signifikante Unterschiede zwischen der Audioanweisung ($m = 2275$ ms; $sd = 1431$ ms) und den reinen Zeigegesten ($m = 1642$ ms; $sd = 847$ ms) gibt. Außerdem unterscheiden sich die Zeigegesten und die kombinierten Anweisungen ($m = 2156$ ms; $sd = 1292$ ms) signifikant. Die langsamen Selektionen bei den kombinierten Anweisungen kommen vermutlich durch die Unstimmigkeiten zwischen Audioanweisung und Zeigegesten in der normalen Visualisierung zustande.

Basierend auf diesen Ergebnissen kann auch die *zweite Hypothese* bestätigt werden. Die Spatial Mirror Visualisierung trägt dazu bei die Selektionszeiten zu verkürzen. Während bei Audioanweisungen und Zeigegesten keine Unterschiede existieren, ist die Selektion bei kombinierten Anweisungen signifikant schneller.

Auswirkungen von Spatial Mirroring auf reale Kollaboration

Neben diesem sehr kontrollierten Studienaufbau wurde in einer zweiten Studie die Auswirkung von Spatial Mirroring auf eine reale Kollaboration untersucht (Gergle u. a., 2004). Die Studie wurde gemeinsam mit der RWTH Aachen durchgeführt. Der Fokus der Untersuchung lag dabei auf dem Einfluss des vereinheitlichten Referenzsystems auf die Nutzung und das Verständnis von links/rechts-Referenzen. Da die Kollaboration zwischen zwei oder mehreren Personen äußerst komplex ist, kann diese Studie nur einen ersten Anhaltspunkt zum Einfluss von Spatial Mirroring liefern. Für ein tieferes Verständnis müssen weitere Studien durchgeführt werden. Nur so können Aussagen über die Erlernbarkeit der Spiegelung und langfristig auftretende Probleme getroffen werden.

Hypothesen Die zwei Hypothesen der zweiten Studie befassen sich mit dem Einfluss von Spatial Mirroring auf ein reales Remote Collaboration Szenario. Im Vordergrund stehen der Umgang mit dem links-/rechts-Referenzsystem während der Kollaboration und die Selbsteinschätzung der Teilnehmer hierzu.

H1 Spatial Mirroring trägt dazu bei, dass die Zusammenarbeit vereinfacht wird, da weniger Probleme bei der Referenzierung auftreten.

H2 Die Teilnehmer empfinden keinen Unterschied zwischen der Nutzung von Spatial Mirroring und der normalen Visualisierung.

Studiendesign Um einer realen Kollaboration möglichst nahe zu kommen mussten zwei Teilnehmer gemeinsam ein Puzzle aus 16 Teilen lösen (Gergle u. a., 2004). Die Teilnehmer wurden in zwei Visualisierungsgruppen (*normal* und *gespiegelt*) eingeteilt.

Damit die Teilnehmer die Teile nicht anhand von Farben oder einfach erkennbaren Formen referenzieren können, bestand das Motiv aus einem abstrakt gehaltenen Tiergesicht (siehe Abbildung 6.14). Die Teile wurden zu Beginn jeder Sitzung per Zufall über den virtuellen Tisch verteilt und konnten von den Nutzern zum Lösen der Aufgabe nur verschoben, jedoch nicht rotiert oder skaliert werden. Zur Förderung der Kollaboration wurden die Zugriffsbereiche genutzt, wie sie beim PerspectiveTable (siehe Abschnitt 6.3) beschrieben werden. Die Einschätzung der Teilnehmer erfolgt mittels Fragebogen nach dem erfolgreichen Lösen des Puzzles.

Technischer Aufbau Der technische Aufbau entspricht dem des PerspectiveTable (siehe Abschnitt 6.3). Jeder Nutzer hatte nur direkten Zugriff auf seinen persönlichen Bereich und den geteilten Bereich in der Mitte des virtuellen Tisches. Die vertikale Displayfläche wurde nicht zur Interaktion genutzt. Zusätzlich zu den Positionsdaten der Puzzleteile und den Bewegungen des Avatars wurde außerdem ein Audiokanal über Skype zur Verfügung gestellt.

Teilnehmer An der Studie haben 16 Personen (acht weiblich, Alter zwischen 21 und 31 Jahre, 14 Rechtshänder) teilgenommen. Die Teilnehmer wurden in acht Teams zu je zwei Personen eingeteilt. Jeweils vier Teams nutzten eine der beiden vorgestellten Visualisierungen (*normal* oder *gespiegelt*).



Abbildung 6.14: Die Teilnehmer der zweiten Spatial Mirror Studie mussten gemeinsam ein Puzzle mit einem abstrakten Tiergesicht zusammensetzen. Die Puzzleteile konnten lediglich verschoben, nicht aber rotiert werden, um die Lösung des Puzzles zu vereinfachen (Hennecke u. a., 2013c).

Ablauf Die Studie wurde mit zwei Teilnehmern gleichzeitig an entfernten Orten durchgeführt. Sie saßen während der Studie zeitgleich am Curve in München und am BendDesk in Aachen. Vor Beginn der Studie wurde der Aufbau des PerspectiveTable erklärt und welche Aufgabe in der Studie auf sie wartet. Den Teilnehmern der *gespiegelten* Variante wurde außerdem die Spiegelung erklärt. Auf diese Weise sollte ausgeschlossen werden, dass das einheitliche Referenzsystem die Nutzer zu Beginn verwirrt. Vor Beginn der eigentlichen Aufgabe lösten sie getrennt voneinander ein einfaches Puzzle, um sich mit den Funktionen des Tisches vertraut zu machen. Anschließend wurde der Audiokanal aufgebaut, die Teilnehmer wurden durch die Versuchsleiter vorgestellt und die Aufgabe gestartet.

Messungen und Analyse Die gesamte Durchführung der Studie wurde in München und Aachen auf Video aufgezeichnet. Mit Hilfe der Aufzeichnungen wurden das Verhalten und die Kommunikation in den einzelnen Teams während jeder Studiensitzung nachträglich untersucht. Dabei wurden verschiedene Verhaltensweisen gezählt:

Beschreibung der Lage Einer der Nutzer beschreibt sowohl die Lage eines Puzzleteils auf dem virtuellen Tisch mit Hilfe räumlicher Referenzen (links/rechts und vorn/hinten) als auch das genutzte Referenzsystem.

Beschreibung des Inhalts Ein Nutzer beschreibt den Inhalt des entsprechenden Teils.

Zeigen Ein Nutzer zeigt auf ein Objekt, um es zu referenzieren.

Bewegung Das entsprechende Objekt wird vom Nutzer bewegt, um den anderen Nutzer darauf aufmerksam zu machen.

Jede dieser Verhaltensweisen wurde zusätzlich in eine von drei Kategorien eingeteilt: *erfolgreich* (z.B. der Nutzer bekommt das geforderte Teil), *fehlgeschlagen* (z.B. das Gegenüber bewegt das falsche Teil) und *beschreibend* (z.B. „Ich versuche mal dieses Teil hier.“). Nachdem das Puzzle erfolgreich gelöst wurde, beantworteten beide Teilnehmer noch einen Fragebogen mit fünf-stufigen Likert-Skalen.

Aufgrund des geringen Datensatzes wurde keine statistische Analyse mit den gezählten Beschreibungen durchgeführt. Die gezählten Beschreibungen werden stattdessen mit Hilfe von Prozentangaben untersucht und verglichen. Dies führt außerdem dazu, dass eine Beeinflussung durch die Beschreibung des Spatial Mirror in der *gespiegelten* Visualisierung nicht ins Gewicht fällt. Für eine genauere Analyse sollte dennoch eine Studie mit mehr Teilnehmern und genauer differenzierter Videoanalyse durchgeführt werden. Die subjektiven Bewertungen der Nutzer im Fragebogen wurden zur einfacheren Analyse folgendermaßen zusammengefasst: *Ich stimme zu* (1 & 2), *Neutral* (3) und *Ich stimme nicht zu* (4 & 5).

Ergebnisse Einige Teilnehmer nutzten Zeigegesten um auf ein bestimmtes Teil aufmerksam zu machen. Da dies aber für beide Visualisierungen zu gleichen Teilen erfolgte, kann hier kein Unterschied festgestellt werden. Daher wird an dieser Stelle nicht weiter auf diese Art der Referenzierung eingegangen.

Daneben wurden während der gesamten Studie 117 Beschreibungen und Bewegungen zur Objektreferenzierung genutzt. Zur besseren Übersicht werden die Auswertungen getrennt nach Visualisierungen (*normal* & *gespiegelt*) vorgestellt.

Nur 20% der links-/rechts-Anweisungen in der **normalen** Visualisierung bezogen sich auf das eigene Referenzsystem des Nutzers. Von diesen Anweisungen waren 88% erfolgreich. Dieses Verhalten kann generell vermutlich mit dem ungewohnten Remote Collaboration Szenario erklärt werden (Schober, 1993). In den meisten Fällen teilten die Nutzer ihrem Arbeitspartner mit von welchem Referenzsystem sie sprechen (z.B. „auf deiner linken Seiten“). War dies nicht der Fall, fragte der Arbeitspartner direkt nach. Im Hinblick auf die Nutzung von *vorn* und *hinten* nutzten 65% das eigene Referenzsystem und waren damit in 67% der Fälle erfolgreich. Nach der Studie gaben lediglich 50% der Teilnehmer an, dass sie die Positionsangaben im Referenzsystem des anderen Nutzers gemacht haben. Interessanterweise berichteten auch nur 25% der Teilnehmer von Kommunikationsproblemen hinsichtlich der Beschreibungen *vorn* und *hinten*.

In der **gespiegelten** Visualisierung nutzten alle Teilnehmer ausnahmslos das vereinheitlichte Referenzsystem für links-/rechts-Beschreibungen. Wir konnten außerdem keinerlei Probleme oder Unsicherheiten bei der Benutzung des einheitlichen Referenzsystems feststellen. Von den Aufforderungen waren dabei 88% erfolgreich - der andere Nutzer gab ihnen also auf Anhieb das korrekte Teil. Die Selbsteinschätzung der Teilnehmer am Ende der Studie bestätigt diese Beobachtung. 88% der Teilnehmer gaben an, dass sie keine Probleme hatten festzustellen welches links oder rechts gemeint war. Dennoch haben ebenfalls 25% angegeben Kommunikationsprobleme hinsichtlich links und rechts gehabt zu haben. Im Vergleich zur normalen Visualisierung fällt auf, dass mehr Teilnehmer (80%) ihr eigenes Referenzsystem für *vorne* und *hinten* genutzt haben. Insgesamt wurden hier aber auch von jedem vierten Teilnehmer Kommunikationsprobleme angegeben.

Im Rahmen **weiterer Beobachtungen** ist aufgefallen, dass die Nutzer häufig die Position eines Teils relativ zu anderen markanten Punkten als Beschreibung genutzt haben. Zusätzlich diente einigen Teilnehmern die Form des Displays als Referenzhilfe. Sie beschrieben die Position einzelner Teile durch ihre Nähe zur Displaykurve. Entgegen unserer Erwartungen haben die Nutzer nur selten den eigentlichen Inhalt der einzelnen Teile genauer beschrieben. Meist erfolgte diese Art der Referenzierung erst, sobald sie einen ungefähren Eindruck vom Gesamtbild des Puzzles hatten. Abschließend stimmten 88% aller Teilnehmer der Aussage zu, dass eine vereinheitlichte Sichtweise auf die gemeinsame Arbeitsfläche die Zusammenarbeit unterstützen kann.

tl;dr

Die gebogene Displayform kann für verbesserte Visualisierungen im Vergleich zu flachen Bildschirmen genutzt werden. In dieser Arbeit wurde die perspektivische Erweiterung des horizontalen Displaybereichs an zwei Beispielen erklärt (Perspective+Detail und PerspectiveTable). Studien zu beiden Arbeiten haben gezeigt, dass der Nutzer die perspektivische Darstellung versteht. Bei der Darstellung von großen Plänen bietet sie außerdem einen Vorteil gegenüber einer einfachen Vogelperspektive (Perspective+Detail). Darüber hinaus erlaubt sie die immersive Darstellung einer Anwendung für gemeinsames Arbeiten an entfernten Orten (PerspectiveTable). Durch Spatial Mirroring kann dieses gemeinsame Arbeiten darüber hinaus vereinfacht werden, indem das Referenz-System für links und rechts für beide Nutzer vereinheitlicht wird.

Kapitel 7

Adaption eines Leitstands

*Je mehr man sich verbessert
desto besser ist das.*

– Gerd Delling, Kommentator –

Dieses Kapitel betrachtet die Anpassung der grafischen Benutzerschnittstelle eines Leitstands im Bereich Katastrophenmanagement an den Curve¹. Dazu wird zunächst der typische Arbeitsablauf in einem aktuellen Leitstand skizziert und die wichtigsten Schritte vorgestellt. Darauf aufbauend werden die Entwicklungsschritte bis hin zu einem digitalen Prototyp und einer abschließenden Studie vorgestellt. Während der Entwicklung hat sich zudem gezeigt, dass bei einem großen, gebogenen Display wie dem Curve nicht jede Prototyping-Technik, die für gewöhnliche Displays geeignet ist, problemlos nutzbar ist. Aufgrund der gemachten Erfahrungen werden die Techniken daher bewertet und es werden Vorschläge für ihre allgemeine Anwendbarkeit in vergleichbaren Projekten formuliert.

Kapitelfrage:

Kann eine Leitstandsumgebung des Katastrophenmanagements am Curve mit Hilfe bekannter Prototypingtechniken entwickelt werden?

¹ Der Inhalt dieses Abschnitts basiert auf einer publizierten Arbeit (Palleis u. a., 2013). Die Autoren der Veröffentlichung sind Henri Palleis, Fabian Hennecke, Axel Hösl und Heinrich Hußmann. Die zugrunde liegenden Arbeiten wurden von Axel Hösl im Rahmen seiner Projekt- (Hösl, 2012) und Diplomarbeit (Hösl, 2013), beides betreut von Fabian Hennecke und Thomas Gläser (envis precisely GmbH), umgesetzt.

7.1 Der Curve als Leitstand

Ein Leitstand beschreibt eine Arbeits- und Displayumgebung, die dazu dient große Datenmengen zu überwachen und Abläufe gezielt zu steuern. Neben Leitständen in Kraftwerken, zur Verkehrssteuerung oder zur Flugsicherung ist auch das Katastrophenmanagement in Bayern über eine Vielzahl von Leitständen verteilt. Die Arbeitsplätze in einem einzelnen Leitstand übernehmen, überwachen und kontrollieren dabei stets nur einen abgegrenzten, lokalen Bereich, um die Informationsmenge pro Arbeitsplatz beherrschbar zu halten. Trotz dieser Maßnahme bestehen solche Leitstände heutzutage aus einer Vielzahl einzelner Displays, die nicht nur je nach Einsatzzweck anders angeordnet sind, sondern zum Teil auch unterschiedliche Eingabemodalitäten unterstützen. Ein gewöhnlicher Arbeitsplatz besteht dabei normalerweise aus fünf Bildschirmen, die sich auf zwei Systeme verteilen. Diese sind beispielsweise wie in Abbildung 7.1 aufgebaut sein.

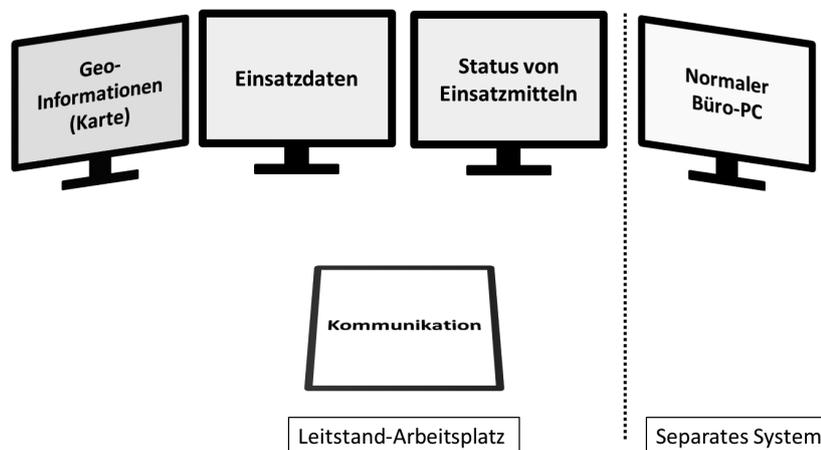


Abbildung 7.1: Ein typischer Leitstandsarbeitsplatz im Katastrophenmanagement verfügt über verschiedene Bildschirme: während textuelle Informationen vor allem auf vertikalen Displays dargestellt werden, findet sich die Kommunikation auf einem einfach zugänglichen Touch-Display horizontal vor dem Nutzer. Das separate Desktop-System entspricht im Wesentlichen einem gewöhnlichen PC und ist vom eigentlichen Leitsystem vollständig getrennt.

Das eigentliche Einsatzsystem umfasst vier Bildschirme, die sich jeweils in Funktion und dem Design der grafischen Schnittstelle unterscheiden. Ein Display zeigt eine zoombare Karte des jeweiligen Einsatzgebiets, so dass wichtige Geoinformationen über den Einsatz direkt verfügbar sind. Ein zweites Display ist allein für die Darstellung und Verwaltung der aktuellen Einsatzdaten zuständig. In diesen Bereich fallen beispielsweise der Einsatzort und Informationen zu einer Kontaktperson vor Ort. Zusätzlich zu diesen einsatzspezifischen Informationen listet ein dritter Bildschirm aktuelle Statusinformationen von Einsatzkräften auf. Diese Bildschirme befinden sich üblicherweise vor dem Mitarbeiter, werden über Maus und Tastatur bedient und ihre Anzeigefläche ist vertikal ausgerichtet.

Ein weiteres Display, das direkte Interaktion unterstützt, befindet sich horizontal zwischen

Mitarbeiter und den anderen Displays. Hier steuert der Mitarbeiter die Kommunikation mit allen beteiligten Personen und Einsatzmitteln. Durch die direkte horizontale Ausrichtung des Displays wird die direkte Interaktion an dieser Stelle bereits gut unterstützt.

Zusätzlich zu diesem Einsatzsystem steht ein separates System für einfache Büro- und Internetanwendungen zur Verfügung. Dieses muss aus Sicherheitsgründen vom restlichen Einsatzsystem komplett getrennt sein und ist somit außer durch die räumliche Nähe nicht mit dem eigentlichen Einsatzsystem verbunden.

Obwohl diese Aufteilung bereits hinsichtlich ergonomischer Parameter entworfen wurde, stellen die verschiedenen Displays und Eingabemasken ein Problem dar. Aus diesem Grund wurde im Rahmen einer Kooperation mit dem Katastrophenschutz des bayerischen Innenministeriums und der Firma *envis precisely GmbH* ein Prototyp für einen Leitstandarbeitsplatz am Curve entwickelt. Dieser Prototyp sollte über dieselben Möglichkeiten wie die aktuellen Leitstände verfügen, die Funktionen und Abläufe aber in einer einheitlichen grafischen Benutzerschnittstelle vereinen und dabei die gebogene Displayform des Curve ausnutzen. In den iterativen Designprozess wurden dazu Leitstand-Experten aus einer integrierten Leitstelle (ILS) in Ingolstadt eingebunden. Neben diesen Experten wurden in der Abschlussevaluation außerdem Lehrstuhlmitarbeiter als Experten für Usability und die Interface-Struktur befragt.

Um einen tieferen Einblick ins Umfeld der Leitstände und aktueller Entwicklungen auf diesem Gebiet zu geben, werden zunächst verwandte Arbeiten aus diesem Gebiet vorgestellt. Danach erfolgt eine Einführung grundlegender Arbeitsabläufe der ILS in Ingolstadt, die im weiteren Projektverlauf als Anhaltspunkte für das Design der Benutzeroberfläche gedient haben. Basierend auf diesen Abläufen erfolgt die Aufteilung des Interfacekonzepts, wie sie am Ende des Projekts feststand. Hierbei spielt besonders die Zuweisung einzelner Funktionen zu den verschiedenen Displaybereichen des Curve eine Rolle. Eine zweigeteilte Nutzerstudie mit Expertennutzern und Lehrstuhlmitarbeitern stellt den Abschluss dieses Abschnitts dar. Details zu den genutzten Prototypentechniken und zu deren Eignung für die Entwicklung einer grafischen Benutzerschnittstelle auf einem großen, gebogenen Display finden sich danach in Abschnitt 7.2.

7.1.1 Verwandte Arbeiten

Neben der schrittweisen Weiterentwicklung klassischer Leitstandumgebungen werden auch vollständig neue Ansätze, die auf interaktiven Displays aufbauen, erforscht. Häufig kommen dabei auch Displays für die jeweiligen Teilaufgaben zum Einsatz, die für die entsprechende Interaktion optimal geeignet sind. Statt über mehrere vertikal ausgerichtete Displayränder interagieren zu müssen (Robertson u. a., 2005), ermöglichen diese Systeme beispielsweise die Arbeit mit interaktiven Karten auf einem horizontalen Tisch. Zur besseren Übersicht und zur Unterstützung von Teamarbeit erweitern viele Systeme diese Anzeige außerdem mit einem Wanddisplay.

Ein Projekt, das diese Darstellungsform von Karteninformationen aufgreift, ist der Digitale Lagetisch (Peinsipp-Byma u. a., 2007). Dieser kombiniert ein interaktives Tischdisplay mit

einem vertikalen Display und zusätzlichen Tablet-Computern (siehe Abbildung 7.2). Die Kartendarstellung auf dem Tischdisplay wird durch textuelle Zusatzinformationen auf dem vertikalen Display ergänzt. Auf diese Weise werden eine Übersicht (Karte) und die zugehörigen Details (Textinformationen) problemlos miteinander kombiniert. Ergänzend zu diesem Aufbau dienen Fovea-Tablets als individuelle, hochauflösende Displaylupen und Interaktionsflächen für die Nutzer. Sie ermöglichen die Interaktion sowohl mit dem horizontalen als auch dem vertikalen Display. Inhaltlich ist der Digitale Lagetisch nicht auf ein bestimmtes Themengebiet festgelegt. Es können unterschiedliche Szenarien, die auf Karteninformationen aufbauen, umgesetzt werden. Neben dem vorgestellten Planungsszenario ist also ebenso der Einsatz für Teamarbeit im Katastrophenmanagement denkbar.



Abbildung 7.2: Der Digitale Lagetisch (Peinsipp-Byma u. a., 2007) (links) nutzt die Kombination verschiedener Displaytypen zur Aufbereitung und Darstellung komplexer Einsatzdaten. Durch den Einsatz von Objekten zur Interaktion werden die Möglichkeiten noch weiter verbessert (Kobayashi u. a., 2007) (rechts).

In einem weiteren Projekt (Kobayashi u. a., 2007) wurde der Einsatz von physikalischen Objekten zur Erweiterung der Steuerung untersucht (siehe dazu Kapitel 5). Im Rahmen der Ausbildung im Katastrophenmanagement ermöglicht dieses TUI den Nutzern das Interagieren mit einer Karte. Es erlaubt den Nutzern in einem solchen Szenario auch das gemeinsame Planen von Evakuierungsrouten durch Verschieben bestimmter Objekte. Neben der direkten Visualisierung solcher Routen auf der Karte werden die einzelnen Steuerungsobjekte zusätzlich durch Frontprojektion um digitale Informationen erweitert.

Die Idee einen interaktiven Tisch im Zusammenhang mit physikalischen Steuerungsobjekten im Katastrophenmanagement einzusetzen wurde auch in einem Gemeinschaftsprojekt mit dem deutschen Technischen Hilfswerk (THW²) verfolgt (Nebe u. a., 2011). Basierend auf dem useTable³, einem TUI und Annoto⁴ Stiften wurde ein Interface für die THW-Einsatzplanung konzipiert und erstellt. Durch genaues Beobachten der Abläufe wurde in

² <http://www.thw.de/>, zuletzt aufgerufen am 02.10.2013

³ <http://www.usetable.de>, zuletzt aufgerufen am 02.10.2013

⁴ <http://www.annoto.com>, zuletzt aufgerufen am 02.10.2013

einem nutzerzentrierten Entwicklungsprozess ein Interface entworfen, dass die Einsatzkräfte bei der Planung von Wasserversorgung und Überflutungssituationen unterstützt. Neben Objekten, die unter anderem für die Steuerung der digitalen Karte genutzt wurden, erlauben die Annoto Stifte eine präzise Eingabe von Informationen und die direkte Interaktion eine Eingabe ohne Zusatzgeräte (siehe Abbildung 7.3).

Die Erkenntnisse aus diesem Projekt wurden später in einem allgemeineren Ansatz weiterverfolgt (Paelke u. a., 2012). Dabei wurde festgestellt, dass die Karteninteraktion mit Objekten Vorteile gegenüber der klassischen Bedienung per Maus bietet. Um bei der Entwicklung solcher Systeme verschiedene Techniken ausprobieren zu können, schlagen die Autoren eine Trennung der verwendeten Technologie, der Interaktionstechniken und der eigentlichen Anwendung in einem drei-schichtigen Entwicklungsansatz mit definierten Schnittstellen vor. Auf diese Weise kann die Technologie während der Entwicklung angepasst und erweitert werden, ohne dass die Interaktionstechniken oder die Anwendung selbst angepasst werden müssen. So können verschiedene Interaktionen ausprobiert und mit einem geringen Aufwand implementiert werden.



Abbildung 7.3: Der useTable ermöglicht die Planung von THW-Einsätzen mit verschiedenen Eingabearten (Nebe u. a., 2011) (links), während der Smart-Controlroom noch einen Schritt weitergeht und den Nutzer und dessen Position im Raum in die Interaktion mit einbezieht (Geisler u. Stiefelhagen, 2010) (rechts).

Neben den klassischen Ansätzen, die das System- und Interaktionsdesign an einem Lagentisch mit Karte orientieren, gibt es auch den Ansatz des intelligenten Kontrollraums (Geisler u. Stiefelhagen, 2010). Das System besteht aus einem Raum mit großem Wanddisplay und einer Vielzahl von Kameras und Mikrofonen (siehe Abbildung 7.3). Diese werden unter anderem eingesetzt um einzelne Nutzer mittels Gesichtserkennung zu identifizieren und ihnen personalisierte Steuerungselemente anzuzeigen. Durch das Verfolgen der Nutzer ist es dem System außerdem möglich die Daten, mit denen ein Nutzer interagiert, anzupassen: Bewegt sich der Nutzer im Raum, wandern die Informationen mit ihm zusammen und werden passend dazu skaliert. Da das System auch weiß welche Nutzer aktuell zusammen arbeiten, unterstützt es diese durch eine Kombination der einzelnen Nutzeranzeigen.

7.1.2 Arbeitsabläufe

Die Entwicklung der Leitstand-Benutzeroberfläche am Curve erfolgte in Anlehnung an die Arbeitsabläufe in der ILS Ingolstadt. Das dazu notwendige Expertenwissen wurde sowohl von Mitarbeitern (Disponenten) des bayerischen Innenministeriums als auch von Mitarbeitern der Leitstelle in Ingolstadt beige-steuert. Um die grafische Benutzerschnittstelle optimal aufzuteilen, wurden die grundlegenden Abläufe der Einsatzannahme und -planung mit Hilfe eines Swim-Lane-Diagramms festgehalten (siehe Abbildung 7.4). Aufbauend auf dieser Struktur wurden wesentliche Aufgaben identifiziert und einem geeigneten Displaybereich zugeordnet. Diese Zuordnung basiert auf den bisherigen Erkenntnissen konventioneller Leitstände, aber auch auf den Erfahrungen, die im Laufe dieser Arbeit am Curve gesammelt wurden. Weitere Details zu den gesetzlichen Vorgaben, den exakten Arbeitsabläufen und sonstigen Arbeitsaufteilungen zwischen verschiedenen Disponenten finden sich in den zugrundeliegenden Projekt- und Diplomarbeiten (Hösl, 2012, 2013).

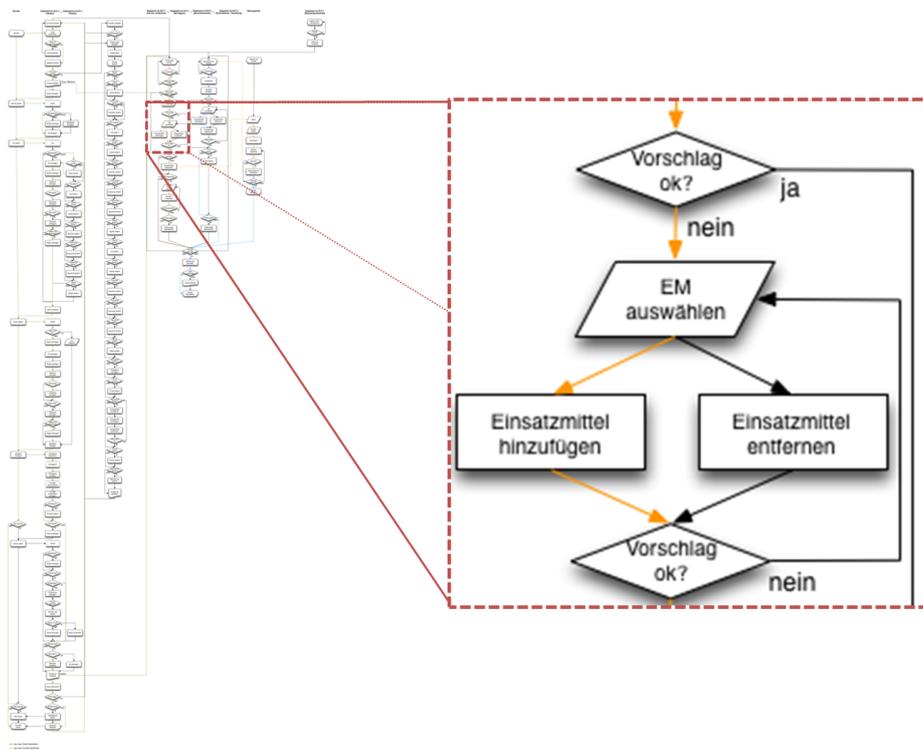


Abbildung 7.4: Der Ablauf eines einzelnen Einsatzes von der Rufannahme, über die Erstellung des Einsatzes bis hin zur Alarmierung der Einsatzkräfte wurde mit Hilfe eines Swim-Lane-Diagramms erfasst (in Anlehnung an (Hösl, 2013)).

Einsatz anlegen

Ein gewöhnlicher Einsatz in einem Leitstand beginnt mit einem eingehenden Notruf. Der Disponent am Telefon nimmt den Anruf entgegen und prüft zunächst, ob es sich um einen tatsächlichen Notruf handelt und dokumentiert einen eventuellen Falschanruf. Als nächstes klärt er ab, ob sich der Notruf auf einen existierenden Einsatz bezieht oder ob ein neuer Einsatz angelegt werden muss.

Im Fall eines neuen Einsatzes werden die wichtigsten Informationen des Anrufers erfasst. Dazu zählen neben einer Kontaktnummer auch der Name und der Standort. Anschließend wird der eigentliche Einsatzort abgefragt und mit Hilfe des Leitstandsystems eingetragen. Zuletzt wird die Art des Einsatzes abgefragt und in Form von definierten Schlagworten und Kürzeln festgehalten. Nach Abschluss werden diese Daten noch einmal überprüft und der Einsatz angelegt. Sollte sich jedoch herausstellen, dass der Anrufer von einem bestehenden Einsatz berichtet, ändert sich der Ablauf dieses Arbeitsschrittes. Zunächst wird der Einsatz durch den Disponenten aufgerufen und auf mögliche Änderungen hin überprüft. Dazu werden die einzelnen Informationen, die bereits hinterlegt sind, mit dem Anrufer abgeglichen. Sind alle Änderungen eingetragen oder gibt es keine Änderungen, wird das Gespräch beendet.

In diesem Arbeitsschritt kommt es vor allem auf eine einfache Verwaltung der Kommunikationsmittel und eine effiziente Bearbeitung textueller Details an. Die Anrufe müssen unkompliziert angenommen und verwaltet werden können. Das System muss darüber hinaus die einfache Bearbeitung von Einsätzen und deren Details unterstützen. Dazu ist es erforderlich alle Informationen auf einmal im Blick zu haben ohne den Überblick zu verlieren.

Daher eignet sich hier eine ähnliche Aufteilung der Systembereiche wie bei den konventionellen Leitständen. Die textuellen Informationen werden zur Bearbeitung auf dem vertikalen Displaybereich dargestellt und über eine physikalische Tastatur editiert. Daneben erlaubt die direkte Interaktion mit dem System auf dem horizontalen Displaybereich die schnelle Kommunikationsverwaltung.

Einsatzmittel disponieren

Für das eigentliche Alarmieren von Einsatzmitteln ist ein anderer Disponent zuständig. Dieser überprüft zunächst, ob er für den Einsatz tatsächlich zuständig ist und ob die Disposition von Einsatzmitteln bearbeitet werden muss. In diesem Fall schlägt das System auf Grundlage der eingetragenen Einsatzdetails bereits Einsatzmittel vor. Diesen Dispositionsvorschlag kann der Disponent vollständig übernehmen oder stellenweise modifizieren und beispielsweise weitere Einsatzkräfte anfordern. Die Überarbeitung der zugeteilten Einsatzkräfte ist auch während eines laufenden Einsatzes möglich, so dass die grafische Benutzerschnittstelle eine einfache Möglichkeit hierfür bieten muss.

Das Disponieren von Einsatzmitteln benötigt unterschiedliche Arten von Informationen und Handlungsmöglichkeiten. Komplexe textuelle Informationen wie die Übersicht über verfügbare Einsatzmittel sollten daher aus Gründen der Lesbarkeit auf dem vertikalen Displaybereich des Curve platziert werden. Für Geoinformationen bietet sich hingegen die Kartendar-

stellung auf dem horizontalen Displaybereich an, da sie am ehesten der natürlichen Handhabung einer Papierkarte auf einem Tisch entspricht. Die Karte wird in diesem Szenario dazu genutzt sowohl Informationen zum Einsatzort und dessen Umgebung, als auch über den Weg der Einsatzkräfte dorthin im Blick zu behalten. Die Zusammengehörigkeit der Informationen über Einsatzmittel auf dem vertikalen Displaybereich und auf der Karte ist dabei essentiell. Aus diesem Grund werden an beiden Stellen eindeutige Bezeichnungen für jedes Einsatzmittel genutzt. Zur verbesserten Übersichtlichkeit und Skalierbarkeit bei großen Einsätzen wird auf eine direkte Verbindung der Informationen auf beiden Displaybereich verzichtet.

Einsätze verwalten

Während das Anlegen eines neuen Einsatzes über eine einfache Schaltfläche ausgelöst wird, ist das Editieren eines vorhandenen Einsatzes komplexer. Zunächst muss der Nutzer den zugehörigen Einsatz im System ausfindig machen. Erst dann kann er wesentliche Daten zum Einsatz oder den disponierten Einsatzmitteln anpassen. Die Änderungen müssen abschließend gespeichert werden, so dass der Disponent danach für einen neuen Anruf bereit ist. Als zusätzliches Element für die Verwaltung von Einsätzen, Einsatzmitteln oder Kontakten steht dem Disponenten eine Zwischenablage zur Verfügung. Von hier können gespeicherte Datensätze schnell und unkompliziert wieder aufgerufen und anschließend abgelegt werden.

Um einen Einsatz schnell selektierbar zu machen, werden sie übersichtlich auf dem vertikalen Displaybereich dargestellt. Dadurch sind sie stets im Blick des Disponenten und durch eine einfache Berührung auswählbar. Die Lage auf dem vertikalen Bereich verhindert dabei eine versehentliche Selektion eines Einsatzes. Neben Detailinformationen und Einsatzkräften erlaubt die Zwischenablage in der Displaykurve auch das Hinterlegen ganzer Einsätze. Dies ermöglicht jederzeit einen einfachen Zugriff auf die Informationen, da sie für den Nutzer in einer leicht zu erreichenden Entfernung liegen ohne mit anderen Interfaceelementen in Konflikt zu stehen.

7.1.3 Interface-Aufteilung

Die zuvor vorgestellten Arbeitsschritte beim Katastrophenmanagement in einem Leitstand werden in diesem Abschnitt auf die einzelnen Displaybereiche des Curve verteilt. Während der iterativen Entwicklung der Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 7.5) veränderte sich zwar die Lage und die Größe einzelner Elemente, ihre Zuordnung zu den einzelnen Displaybereichen blieb aber unangetastet. In die Entwicklung flossen zusätzlich Überlegungen hinsichtlich der Arbeitsplatzergonomie. Faktoren wie Displayhelligkeit, Kontraste und Schriftgrößen wurden berücksichtigt und entsprechend angepasst. Die genauen Entwicklungsschritte und die berücksichtigten ergonomischen Faktoren des Interfaces werden in den zugrundeliegenden Arbeiten (Hösl, 2012, 2013) genauer dargestellt.

Zur einfacheren Strukturierung erfolgt die Erklärung des Interfaces anhand der jeweils genutzten Displaybereiche. Unterteilt in den eher klassischen vertikalen Displaybereich, den

horizontalen Bereich und die Displaykurve werden die Elemente des Interfaces in den folgenden Abschnitten vorgestellt. Dabei steht die Begründung für die Platzierung und die Vorteile dieser Platzierung für die Arbeitsabläufe im Vordergrund.



Abbildung 7.5: Der finale Leitstand-Prototyp auf dem Curve nutzt die Displayform um Informationen und Interaktionsflächen möglichst optimal zu platzieren (Hösl, 2013).

Vertikale Eingabefelder

Auf dem vertikalen Displaybereich finden sich hauptsächlich textuelle Informationen, die je nach Bearbeitungsschritt des Einsatzes variieren. Zu Beginn eines Einsatzes, bei der Rufannahme, erscheinen die entsprechenden Eingabemasken auf dem vertikalen Displaybereich. Die Maske unterteilt sich dabei in drei Bereiche: die Adresseingabe, eine Vorschlagsliste und eine Karte, die die ausgewählte Adresse und deren Umkreis darstellt (siehe Abbildung 7.6). Dieses Formular wird vom Disponenten von oben nach unten durchgearbeitet, so dass kein Eingabefeld und keine wichtige Information übersehen werden. Wurden die wichtigsten Daten eingegeben, können zusätzliche Kommentare zum Einsatz hinterlegt werden und die Einsatzdetails mit zwei zusätzlichen Übersichtskarten betrachtet werden.

Zum schnellen Wechsel zwischen verschiedenen Einsätzen befindet sich eine Liste der aktuellen Einsätze am linken Rand des Displaybereichs. Hier werden durch Farbe, Größe und kleine Labels Informationen zu den Einsätzen dargestellt und mit einer Berührung ausgewählt. Ist kein Einsatz ausgewählt, wird auf dem vertikalen Displaybereich eine Liste der aktuellen Einsätze angezeigt. Diese Liste lässt sich anhand dargestellter Kriterien, wie der Adresse, sortieren. Wie in der Seitenleiste lassen sich Einsätze hier durch eine Berührung selektieren.

Die nahezu ausschließliche Darstellung von Informationen auf dem vertikalen Displaybereich ohne eine Vielzahl von direkten Interaktionen hat mehrere Gründe. Der erste Grund

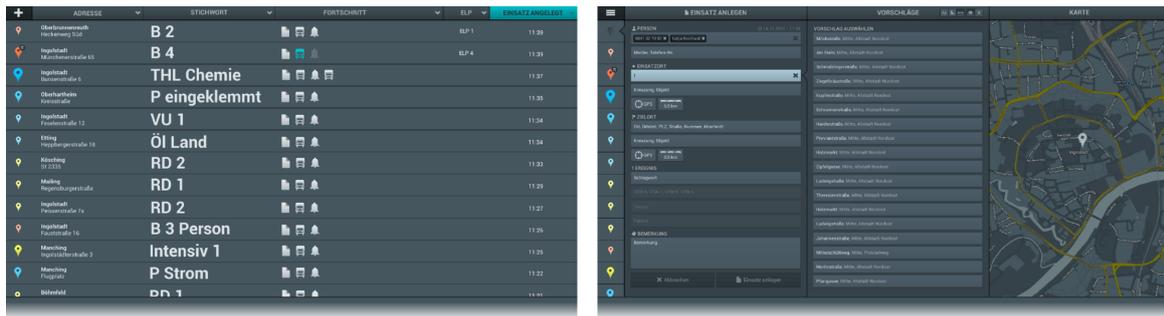


Abbildung 7.6: Der vertikale Displaybereich wird vor allem zur Darstellung von textuellen Einsatzdetails und Listen (links) und Eingabemasken während der Einsatzerfassung (rechts) genutzt (nach Hösl, 2013). Die hier dargestellten Informationen sind für den Disponenten einfach zu erkennen, während die vertikale Position eine unbeabsichtigte Interaktion verhindert.

liegt in der guten Lesbarkeit von Informationen an dieser Stelle. Eine Analyse mit dem Menschmodell RAMSIS (Forschungsvereinigung Automobiltechnik, 1995) hat gezeigt, dass die Lesbarkeit von Text auf dem vertikalen Displaybereich, mittig vor dem Nutzer, besser ist als in den Randbereichen. Zwar ist die Lesbarkeit unmittelbar vor dem Nutzer auf dem horizontalen Displaybereich noch besser, doch spricht die dafür erforderliche Kopfhaltung des Nutzers beim Lesen gegen eine solche Platzierung. Ähnlich wie bei herkömmlichen Leitständen sind die Informationen auf der Vertikalen außerdem immer im Blick des Disponenten. Dieser muss beim Betrachten seinen Kopf nicht unnatürlich lang nach unten neigen.

Horizontale Landkarte

Die Darstellung auf dem horizontalen Displaybereich ist zweigeteilt. Den größten Teil nimmt eine interaktive Karte auf der linken Seite ein (siehe Abbildung 7.7). Sie zeigt sowohl die aktuellen Einsatzorte als auch Kontextinformationen, wie wichtige Gebäude in unmittelbarer Umgebung eines Einsatzes, an. Darüber hinaus können auch ausgerichtete Einsatzmittel auf der Karte visualisiert werden. Die entsprechende Option hierfür findet sich im Seitenmenü am linken Displayrand. Hier befinden sich auch weitere Möglichkeiten zur Steuerung der Karte. Um ein unbeabsichtigtes Verschieben der Karte zu verhindern, kann diese über das Menü beispielsweise für Interaktionen gesperrt werden.

Am horizontalen, rechten Bildschirmrand befindet sich die Steuerung der gesamten Kommunikation des Arbeitsplatzes. Hierzu zählt während der Einsatzerstellung besonders die Verwaltung ein- und ausgehender Anrufe. Eingehende Anrufe können durch einfaches Selektieren per Touch angenommen und ausgehende Anrufe initiiert werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit einzelne Einsatzmittel gezielt über Funk zu erreichen. Sprechwünsche durch ein Einsatzmittel vor Ort werden ebenfalls in diesem Bereich dargestellt und akustisch gemeldet.

Diese Unterbringung von häufig genutzten Interaktionsflächen auf dem horizontalen Displaybereich bietet mehrere Vorteile. Die Darstellung einer Karte horizontal vor dem Nut-



Abbildung 7.7: Der horizontale Displaybereich zeigt hauptsächlich eine interaktive Karte der aktuellen Einsätze mit einem einfachen Menü zur Steuerung (links). Die Verwaltung der Kommunikation befindet sich permanent leicht erreichbar am rechten Rand dieses Bereichs und dient auch zur Darstellung eingehender Sprechwünsche (rechts) (nach Hösl, 2013).

zer entspricht dem Erscheinen einer realen Landkarte auf einem Tisch. Durch einen kurzen Blick nach unten kann sich der Disponent so einen Überblick über die Lage des jeweiligen Einsatzes verschaffen. Darüber hinaus ist die direkte Interaktion mit der Karte hier deutlich weniger anstrengend als auf dem vertikalen Bereich (Ahlström u. a., 1992).

Neben der Karte profitiert auch die Kommunikationsverwaltung von der einfachen direkten Interaktion auf diesem Displaybereich. Eingehende Anrufe können direkt angenommen und verwaltet werden. Die Kontaktaufnahme mit bestimmten Einsatzmitteln ist ebenso durch eine einfache Selektion mit einem Finger möglich. Ein auditives Feedback stellt hierbei sicher, dass der Disponent die eintreffenden Anrufe nicht übersieht.

Die Kurve als Zwischenablage

Während die ursprüngliche Idee der Displaykurve die nahtlose Verbindung der beiden Displaybereiche war, übernimmt sie in diesem Beispiel für eine Leitstand-Benutzeroberfläche eine andere Rolle. Hier dient sie zum einen als trennendes, optisches Element, das die beiden Displaybereiche voneinander abgrenzt. Zum anderen bietet sie sich als universelle Zwischenablage an, da die Kurve mit beiden Displaybereichen direkt verbunden ist. Der Nutzer kann unterschiedliche Informationen, wie ganze Einsätze, einzelne Einsatzmittel oder wichtige Rufnummern, in der Displaykurve ablegen und jederzeit wieder auf sie zugreifen. Durch Ziehen der Information auf den entsprechenden Displayteil wird dann eine damit verknüpfte Funktion gestartet. So können ganze Einsätze schnell aufgerufen oder Einsatzmittel sofort kontaktiert werden.

Die Position der Kurve zwischen den beiden getrennten Displaybereichen erlaubt die einfache Ansteuerung einzelner Funktionen auf den Displaybereichen aus der Kurve heraus. Die Kurve eignet sich sehr gut für diese Art von direkter Interaktion (siehe Abschnitt 4.3). Ein weiteres Argument, das gegen die Nutzung der Kurve als gewöhnliche Displayfläche spricht, ist die Lesbarkeit von Text und die Verzerrung von dargestellten Grafiken. Während kurze Namen, Kürzel für Einsatzmittel und einfache Grafiken hier gut erkennbar sind, leidet die Er-

kennbarkeit längerer Texte in der Kurve aufgrund der Displaybiegung. Text kann nicht mehr ohne Weiteres gelesen werden und die Geometrie von Objekten wird falsch eingeschätzt.

7.1.4 Studien

Um den erstellten pixelgenauen Prototyp abschließend zu evaluieren wurden zwei getrennte Studien durchgeführt. Das Ziel beider Studien waren Einschätzungen von unterschiedlichen Experten. Die erste Studie fand direkt am Curve mit Lehrstuhlmitarbeitern statt. Im Fokus dieser Studie standen die Usability und die generelle Aufbereitung und Darstellung der Informationen. Die zweite Studie wurde mit Disponenten in der ILS Ingolstadt durchgeführt. Hier standen sowohl die Bezeichnungen einzelner Funktionen als auch die korrekte Unterstützung der Arbeitsabläufe im Leitstandkontext im Mittelpunkt.

Da sich die Abläufe der Studien aufgrund des unterschiedlichen Aufbaus unterscheiden, sind die Details zur Durchführung und die Ergebnisse der einzelnen Studien im folgenden Abschnitt voneinander getrennt. In beiden Studien sollte explizit qualitatives Feedback gesammelt werden. Aufgrund der geringen Anzahl an Teilnehmern und des explorativen Charakters der Studie wurden die Ergebnisse daher nicht statistisch ausgewertet. Eine genaue Auflistung der Aussagen und Anmerkungen findet sich in der zugrundeliegenden Diplomarbeit (Hösl, 2013).

Usability-Studie

Die Usability-Studie wurde mit Hilfe eines digitalen Prototyps direkt am Curve durchgeführt. Insgesamt haben fünf Lehrstuhlmitarbeiter an der Studie teilgenommen. Die Lehrstuhlmitarbeiter verfügten jedoch über kein Wissen im Bereich des Katastrophenmanagements, so dass die Studie in Form einer Nutzerbeobachtung durchgeführt wurde. Da alle Studienteilnehmer mit dieser Art der Beobachtung vertraut waren, stellte sie hier eine interessante Möglichkeit zur Evaluierung des Prototyps dar. Der Versuchsleiter bediente das System als vermeintlicher Expertennutzer (siehe Abschnitt 7.2.3) und absolvierte zwei zuvor definierte Einsatzszenarien. Die Studienteilnehmer sollten nun den Versuchsleiter, die Abläufe und das System währenddessen beobachten. Sie konnten zu jeder Zeit Fragen an den Versuchsleiter stellen und Anmerkungen machen. Diese Aussagen wurden notiert und abschließend sortiert und ausgewertet.

Ergebnisse Insgesamt betrafen die Anmerkungen und Kommentare vor allem visuelle Teile des Prototyps und weniger die demonstrierte Interaktion des Versuchsleiters. Dies ist in Anbetracht der Tatsache, dass die Teilnehmer die Interaktion nicht selbst durchführen, aber auch nicht sehr überraschend. Dennoch äußerten zwei Teilnehmer ein gutes Verständnis für den Arbeitsablauf ohne selbst über Expertenwissen in diesem Bereich zu verfügen. Ein wesentlicher Punkt in den Kommentaren, der von allen Teilnehmern angesprochen wurde, war die **Farbgestaltung** der Oberfläche. Es wurde empfohlen den Kontrast der Darstellung zu erhöhen und die Farben insgesamt kräftiger darzustellen. Zwar wurde die Farbgestaltung auch von drei Teilnehmern gelobt, doch könnten hier bereits kleine Änderungen am

Kontrast und der Farbsättigung genügen. Da es sich beim Curve um ein Rückprojektionssystem handelt (siehe Kapitel 3), sind die Möglichkeiten die Farbwiedergabe zu verbessern jedoch durch die Konstruktion des Displays limitiert. Nachfolgende Systeme sollten aber auf jeden Fall auf deutlich unterscheidbare, kräftige Farben achten.

Darüber hinaus wurden aber auch einzelne **Funktionen** des Prototyps kritisch bewertet und Verbesserungen vorgeschlagen. Ein Kritikpunkt betrifft die visuelle Aufbereitung der verschiedenen Disponentenaufgaben. Ein Teilnehmer hat vorgeschlagen die Rollen der einzelnen Disponenten klarer unterscheidbar zu machen und die Nutzer somit besser beim Rollenwechsel zu unterstützen. Zusätzlich gaben drei Teilnehmer an, dass die Darstellung eingehender Anrufe zu unauffällig sei. Neben einer prominenteren Platzierung auf dem vertikalen Displaybereich oder in der Displaykurve könnte hier auch noch über zusätzliche visuelle Reize in der Nähe des Bildschirms nachgedacht werden.

Neben diesen relativ aufgabenbezogenen Anmerkungen wurden auch eher **allgemeine Fragestellungen** aufgeworfen. Ein Teilnehmer fragte wie das Interface mit der Verdeckung durch eine physikalische Tastatur zurechtkommt. Die Lösung für dieses Problem könnte eine zusätzliche Halterung für die Tastatur direkt vor dem gebogenen Bildschirm sein. Solange die Tastatur eine gewisse Tiefe nicht überschreitet, bleiben alle Flächen des vertikalen Bereichs erreichbar und die Tastatur verdeckt keine Inhalte auf dem horizontalen Displaybereich.

Insgesamt hat die Usability-Studie mit Lehrstuhlmitarbeitern keine schwerwiegenden Probleme bei der Bedienung des Prototyps aufgedeckt. Zwar wurden einige visuelle Schwächen angesprochen, diese sind jedoch im Fall des schlechten Kontrasts auf die Wiedergabequalität der Rückprojektion zurückzuführen. Ansonsten sind trotz des Studiendesigns in Form einer fiktiven Nutzerbeobachtung viele Fragen zu einzelnen Funktionen und Abläufen aufgetaucht. Diese waren an dieser Stelle nicht erwartet worden, da der Fokus der Studie eigentlich auf der Evaluierung der Benutzerschnittstelle lag. Die Anmerkungen der Teilnehmer können jedoch größtenteils durch das fehlende Vorwissen im Bereich des Katastrophenmanagements erklärt werden und betreffen daher das Interfacedesign nicht direkt. Das Gesamtfazit zur Usability und dem Interaktionsfluss bei beiden vorgestellten Szenarien fällt nach dieser ersten Studie also insgesamt positiv aus.

ILS-Kontext-Studie

Die Studie mit den Expertennutzern der ILS Ingolstadt konnte nur vor Ort durchgeführt werden. Da der Curve für diese Studie jedoch nicht transportiert werden konnte, musste ein anderer Weg genutzt werden, um sowohl das Konzept als auch den Ablauf der beiden Testszenarien zu zeigen. Anstelle eines Prototyps wie in der Usability-Studie am Lehrstuhl wurden eine intensive Einführung und Bildschirmfotos des Prototyps genutzt.

Den insgesamt drei Teilnehmern der Studie wurde zu Beginn jeweils ein Foto des digitalen Prototyps auf dem Curve gezeigt. Zusätzlich erfolgte eine Erklärung des Projekts und der grundsätzlichen Bildschirmeigenschaften des Curve. Danach wurden anhand eines vorgegebenen Szenarios nacheinander die verschiedenen Bildschirme gezeigt. Dabei wurde zunächst der gesamte Bildschirminhalt des Prototyps auf die Größe der verfügbaren Projektion

im Studienraum reduziert, so dass der gesamte Inhalt sichtbar war. Um auch die Details des Prototyps zeigen zu können, zoomte der sichtbare Ausschnitt dann auf den betreffenden Displaybereich.

Ergebnisse Wie zu erwarten war, bezieht sich das Feedback der Expertennutzer vor allem auf inhaltliche Stärken und Schwächen des gezeigten Prototyps. Aufgrund der fehlenden Interaktivität gab es keine direkten Aussagen über die Vorteile und Nachteile der stärkeren Integration von direkter Interaktion. Aufgrund der Präsentation des Prototyps über einen Projektor wurden auch keine Aussagen über die Sichtbarkeit oder Erreichbarkeit von einzelnen Komponenten gemacht.

Auf der Seite der **positiven Anmerkungen** wurde von allen Teilnehmern die allgemeine Darstellung und Visualisierung der Eingabemasken gelobt. Auch der visualisierte Einsatzverlauf, die Karte und die genutzten Pins wurden positiv hervorgehoben. Insgesamt gaben außerdem alle Teilnehmer an, dass das genutzte Einsatzszenario und die Führung durch die Benutzeroberfläche sinnvoll seien.

Der Großteil der **kritischen Anmerkungen** bezog sich auf Details der Benutzeroberfläche, die bei den ersten Beobachtungen und Gesprächen nicht korrekt erfasst wurden. Dabei ging es besonders um die korrekte Bezeichnung von Einsatzmitteln, Funkkanälen oder die Wichtigkeit von Einsatzinformationen. Ein Beispiel hierfür ist, dass die Adresse eines Einsatzes für den Nutzer wichtiger ist als ein zugewiesenes Einsatzschlagwort. Zwei der Teilnehmer schlugen daher eine Restrukturierung der Listenansicht aller Einsätze vor.

Insgesamt lieferte die Studie im ILS-Kontext vor allem Rückmeldungen auf inhaltlicher Ebene, die zu weiteren Verbesserung des Prototyps und zur Beseitigung von Fehlern genutzt wurde. Es hat sich zwar gezeigt, dass das Expertenwissen in die ersten Versionen des Prototypdesigns eingeflossen ist, aber auch, dass das Anwendungsfeld viel zu komplex ist um in wenigen Iterationsschritten vollständig erfasst zu werden. Weiterentwicklungen in diesem Bereich sollten daher unbedingt fachliche Experten während der Entwicklung einbinden. Wie diese zweite Studie gezeigt hat, führt bereits eine einfache Darstellung der Programmoberfläche zu wertvollem inhaltlichen Feedback.

7.2 Verwendung von Prototypingtechniken

Im Rahmen der Entwicklung der Leitstandoberfläche am Curve wurden verschiedene Methoden zur Erstellung von Prototypen während des Designprozesses genutzt (Hösl, 2012; Palleis u. a., 2013). Am Anfang der nutzerzentrierten Entwicklung standen Gespräche mit Experten des Leitstands in Ingolstadt. Nach den Expertengesprächen wurde ein Ablaufszenario für die Evaluierung der Benutzeroberfläche anhand eines Prototypen erstellt. Dieses Ablaufszenario wurden während der Entwicklung für alle Prototypen genutzt, so dass die Bedienung der Prototypen durchweg vergleichbar war. Lediglich kleinere Ungenauigkeiten und inhaltliche Fehler wurden in diesem Prozess zwischen den verschiedenen Prototypstufen korrigiert.

Die ersten beiden Prototypen der Entwicklung wurden aus Papier und in unterschiedlichen Qualitätsstufen gefertigt (Rettig, 1994). Mit beiden Prototypen wurden nacheinander Studien durchgeführt, die zur Verbesserung der jeweils nächsten Stufe führten. Nach den beiden Papierprototypen wurde ein pixelgenauer, digitaler Prototyp erstellt. Dieser wurde in beiden finalen Studien evaluiert (siehe Abschnitt 7.1) und stellt den Abschluss der Entwicklung in diesem Projekt dar.

Dieser Abschnitt beschreibt die genutzten Prototypstufen in chronologischer Reihenfolge, so dass von einem zum nächsten Prototyp die Entwicklungsschritte deutlich werden. Zusätzlich werden die gemachten Erfahrungen aus den Studiensitzungen mit verschiedenen Nutzergruppen vorgestellt.

7.2.1 Skalierter Papierprototyp

Der erste Papierprototyp (siehe Abbildung 7.8) diente zu Beginn des Projekts als Grundlage für Designentwürfe und als Diskussionsgrundlage mit Expertennutzern und Designern. Er sollte außerdem einfach zu transportieren sein, um ihn flexibel bei Besprechungen und Studienterminen mit den Expertennutzern in Ingolstadt einsetzen zu können. Neben den wesentlichen Umsetzungsdetails zeigt dieser Abschnitt auch die größten Probleme dieses Prototyps und die daraus gezogenen Schlüsse für die nächste Version auf.

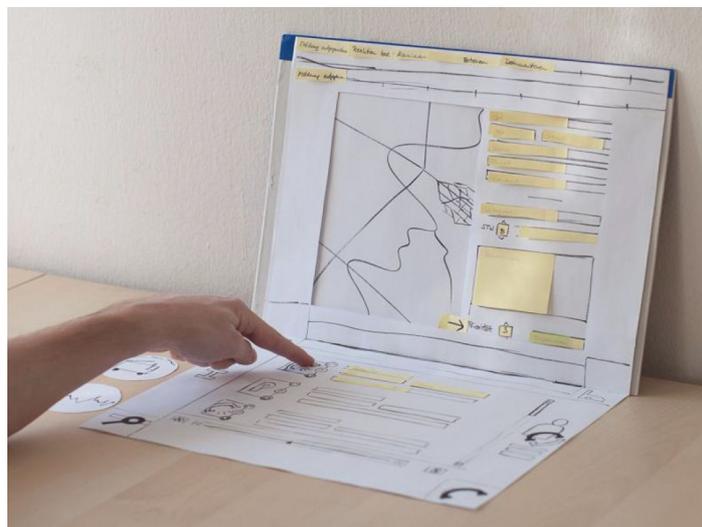


Abbildung 7.8: Der erste Papierprototyp der Leitstand-Benutzeroberfläche bestand aus zwei einzelnen DIN A3 Papierbögen, die die Displayproportionen und die Form des Curves nur ungefähr nachbilden (Hösl, 2012). Die Größe einzelner Elemente auf dem Display ist außerdem nicht maßstabsgetreu.

Umsetzung

Um die Transportfähigkeit zu gewährleisten basiert der skalierte Prototyp auf zwei querliegenden DIN A3 Papierbögen, die jeweils einen der Displaybereiche des Curves repräsentieren. Auf den Bögen sind die ungefähren Inhalte der Benutzeroberfläche skizziert, so dass sie einen ersten Eindruck über die Art und die Aufteilung der Informationen vermitteln.

Aufgrund seiner Größe kann der Prototyp problemlos in einem Zeichenblock transportiert werden. Klappt man den Zeichenblock auf, bilden die beiden Bögen eine skalierte Version des Curves. Da die beiden Bögen jedoch nicht direkt miteinander verbunden sind, verfügt dieser Prototyp allerdings über eine kantige Verbindung anstelle einer nahtlosen Kurve.

Die Grundzüge auf beiden Papierbögen werden darüber hinaus durch austauschbare Post-Its und zusätzliche Papierelemente erweitert. Während der Entwicklung hat dies dazu beigetragen, dass verschiedene Entwürfe mit denselben Inhalten und Bausteinen schnell getestet werden konnten. Die Post-Its simulieren hierbei das Ausfüllen von Textfeldern und werden während der Testdurchläufe und Präsentationen nach und nach aufgeklebt (siehe Abbildung 7.9 links). Die zusätzlichen Papierelemente dienen stattdessen zur Integration komplexer dynamischer Elemente wie der Darstellung von Informationen selektierter Elemente (siehe Abbildung 7.9 mittig). Sie dienen außerdem zur Simulation von physikalischen Steuerungsobjekten (siehe Kapitel 5), um diese Art der Interaktion bereits in einem frühen Entwicklungsstadium miteinzubeziehen. Diese zusätzlichen Elemente sind ebenso wie der eigentliche Prototyp handgezeichnet und repräsentieren somit auch den frühen Entwicklungsstand des Designs.



Abbildung 7.9: Durch die geringe Größe des Prototyps konnten während einer Studie interaktive Elemente einfach simuliert werden. Es wurden unter anderem die Eingabe von Text (links), das Selektieren von Einsatzmitteln auf der Karte (mittig) und das Starten eines Anrufs (rechts) nachgestellt.

Im Vergleich zum Curves ist dieser Prototyp aufgrund des verwendeten Papierformats deutlich kleiner. Die DIN A3 Bögen führen zu einer Breite des Prototyps von etwa 42cm, während der Curves insgesamt eine Breite von 120 cm hat. Zwar stehen hiervon je nach Kalibrierung nur zwischen 80 und 90 cm als Display zur Verfügung, jedoch ist dies immer noch etwa die doppelte Seitenlänge. Während der Formfaktor also deutlich herunterskaliert ist, sind die dargestellten Schaltflächen und Texte in Originalgröße. Die Texte sind gut lesbar und die interaktiven Flächen so dimensioniert, dass sie gut zu bedienen sind (siehe Abbildung 7.9

rechts). Dieser Unterschied führt dazu, dass auf dem Prototyp weniger Informationen dargestellt werden können als auf dem Curve.

Erfahrungen

Der skalierte Papierprototyp wurde in einer ersten qualitativen Studie von unterschiedlichen Experten begutachtet. Die erste Feedbackrunde wurde mit einem Interfacedesigner durchgeführt. Hier wurden vor allem Platzierungen von Schaltflächen und ganzen Interfaceteilen angesprochen. Eine Idee hierbei war die perspektivische Kartendarstellung entsprechend des Ansatzes von Perspective+Detail (siehe Abschnitt 6.2), um zusätzlich zur flachen Karte auch dreidimensionale Informationen vermitteln zu können.

In der zweiten Feedbackrunde wurde der skalierte Prototyp sechs Expertennutzern des Leitstands in Ingolstadt präsentiert. Die generelle Rückmeldung der Teilnehmer zum Konzept war positiv. Dennoch wurden auch Bedenken geäußert, die vor allem die Realisierbarkeit und die Anpassungsfähigkeit eines solchen Interfaces in ergonomischer Hinsicht (z.B. Justieren der Displayhöhe über dem Fußboden) betrafen. Ein konkreter Punkt, der mit Hilfe dieses Prototyps geklärt werden konnte, ist der Einsatz eines Tangible User Interfaces. Durch den häufigen Wechsel zwischen mehreren Einsätzen ist die vom System unveränderliche Position der Objekte problematisch. Ein Objekt, das für die Karteninteraktion bei Einsatz A genutzt wird, kann möglicherweise bei Einsatz B wichtige Informationen verdecken. Daher wurde die Idee von Objekten zur Steuerung im weiteren Projektverlauf verworfen.

Insgesamt hat sich bei dieser Feedbackrunde aber vor allem ein Problem gezeigt, das unabhängig von der eigentlichen Benutzerschnittstelle ist. Die Expertennutzer hatten Probleme dabei den skalierten Papierprototyp als Abstraktion einer späteren Programmschnittstelle zu verstehen. Die Teilnehmer standen dem Prototyp zu Beginn der Sitzungen skeptisch gegenüber. Einige von ihnen waren auch offensichtlich amüsiert über die Art und Präsentation dieses frühen Prototyps. Selbst als durch Erklärungen der genutzten Prototypentechnik und der damit beabsichtigten Qualität des Feedbacks Verständnis für den Prototyp hergestellt war, sorgte der hohe Abstraktionsgrad bei den Teilnehmern für Probleme. Die zusätzlichen Abstraktionsgrade Größe und Formfaktor führten also dazu, dass die Expertennutzer Probleme hatten die Idee der Benutzerschnittstelle auf die tatsächliche Bildschirmgröße des Curve zu übertragen. Somit ist es ihnen auch schwergefallen die spätere Größe und die Positionierung von Elementen zu bewerten.

7.2.2 Maßstabsgetreuer Papierprototyp

Diese Probleme des skalierten Prototyps sollten mit Hilfe eines Papierprototyps in Originalgröße und der korrekten Displayform beseitigt werden (siehe Abbildung 7.10). Die damit einhergehende schlechte Transportfähigkeit wird dabei in Kauf genommen, um auf der inhaltlichen Ebene womöglich besseres Feedback zu erhalten. Zusätzlich trägt die Original-

größe dazu bei eventuelle Probleme bezüglich der Erreichbarkeit von wichtigen Elementen zu identifizieren.



Abbildung 7.10: Der zweite Papierprototyp bildet die korrekte Größe des Curve und dessen Form exakt nach (Hösl, 2012). Somit ist der Abstraktionsgrad deutlich geringer als beim skalierten Prototyp der ersten Entwicklungsstufe.

Umsetzung

Genau wie die skalierte Version aus DIN A3 Papierbögen besteht auch der Prototyp in Originalgröße aus Papier. Als Grundfläche dienen mehrere Ausschnitte einer großen Papierrolle, die jeweils die Maße des Curve haben. Da diese Ausschnitte jedoch nicht von selbst die gebogene Displayform des Curve beibehalten, stützt sie eine zusätzliche Plexiglassplatte. Diese Platte wurde beim Bau des Curve als mögliche Erweiterung mitbestellt und ist im Unterschied zum tatsächlichen Display 160 cm breit. Die Papiergrundflächen, die auf diese Platte aufgebracht sind, haben jedoch dieselbe Breite wie der Curve (120 cm), so dass hier von einem originalgetreuen Prototyp gesprochen werden kann.

Aufgrund des Aufbaus ist dieser Prototyp jedoch nicht so transportabel und bedienbar wie die skalierte Version. Neben dem erhöhten Transportaufwand, der durch die große Plexiglassplatte entsteht, muss auch eine größere Menge an Papierelementen genutzt werden. Dafür bietet dieser Prototyp nicht nur die Darstellung und Positionierung von Elementen in Originalgröße, er schließt auch die Displaykurve mit ein. Diese wurde im skalierten Prototyp nicht nachgebildet und somit auch im eigentlichen Interfacekonzept nicht berücksichtigt.

Wie auch schon beim skalierten Papierprototyp basiert die Version in Originalgröße auf zwei verschiedenen Umsetzungen von Interfaceelementen. Während großflächige Bereiche wie die interaktive Karte auf den großen Papierbögen dargestellt sind, werden kleine interaktive Elemente durch klebende Papierelemente umgesetzt. Je nach Interaktion wird also entweder der große Papierausschnitt ausgetauscht oder kleinere Papierelemente hinzugefügt oder entfernt.

Durch die korrigierten Größenverhältnisse besteht auch keine Abweichung mehr zwischen der Größe einzelner Elemente und der Gesamtfläche des Prototyps. Um einzelne Elementgrößen zu untersuchen wurden sie mit Hilfe abstrakter Papierelemente umgesetzt und die

Auswirkung auf das Layout und die mögliche Bedienbarkeit untersucht. Besonders die Größe der Zwischenablage in der Displaykurve und mögliche Schaltflächen an den Displayrändern wurde auf diese Weise entworfen (siehe Abbildung 7.11).



Abbildung 7.11: Aufgrund der originalgetreuen Maße des Prototyps konnten auch spezifische Dinge wie die Größe der Zwischenablage in der Displaykurve direkt am Prototyp untersucht werden (Hösl, 2012). Hierbei spielten die Erreichbarkeit und die einfache Selektion der Elemente eine Rolle.

Erfahrungen

Der Prototyp in Originalgröße wurde mit drei Expertennutzern evaluiert. Zu diesem Zweck wurde der gesamte Prototyp in den Leitstand nach Ingolstadt transportiert und dort aufgebaut. Wie schon zuvor wurde der Prototyp anhand eines Einsatzszenarios evaluiert und Anmerkungen und Kommentare der Teilnehmer festgehalten. Zusätzlich wurde nach jeder Sitzung ein semi-strukturiertes Interview mit den Nutzern durchgeführt. Details zu den Studienergebnissen finden sich in der entsprechenden Projektarbeit (Hösl, 2012).

Neben dem inhaltlichen Feedback, das die Expertennutzer in der Studie äußerten, haben sich auch weitere Eigenschaften des Prototyps herauskristallisiert. Während die schlechte Transportfähigkeit des Prototyps und der Platzbedarf beim Aufbau schon während der Konzeption bekannt waren, stellte auch die Bedienung während der Studie ein Problem dar. Besonders der Wechsel der großen Papierausschnitte war mühsam und nicht immer problemlos möglich. Dies führte dazu, dass der Arbeitsablauf während der Studie immer wieder unterbrochen wurde und kein Interaktionsfluss entstand. Es kann nicht mit Gewissheit gesagt werden, ob die inhaltlichen Ergebnisse und Rückmeldungen unter diesem Problem gelitten haben. Ein weiteres Problem bestand in der Eigenart eines Papierprototyps dieser Größe. Während beim skalierten Prototyp die einzelnen Elemente und Schaltflächen den vorhandenen Platz gut ausfüllten, finden sich beim Prototyp in Originalgröße viele weiße Flächen. Ein Beispiel hierfür ist die skizzierte Karte, die sich bei dieser Version noch auf dem vertikalen Bildschirm befand (siehe Abbildung 7.11). Die Darstellung von Straßen und Gebäuden war hierbei extrem einfach gehalten, um keine Details der Benutzeroberfläche in den Vordergrund zu stellen. Dies hat allerdings auch dazu geführt, dass die Expertennutzer teilweise Probleme mit diesen großen Freiflächen hatten. Sie haben laut Aussage der Teilnehmer den Eindruck einer prototypischen Programmoberfläche gestört und somit unter Umständen einige Ergebnisse beeinflusst. Insgesamt ist dieses Problem vermutlich jedoch auf die Unerfahrenheit der

Expertennutzer hinsichtlich dieser Prototypingtechnik zurückzuführen. Zukünftige Arbeiten sollten die gestalterische Qualität (fidelity) des Prototyps berücksichtigen und deren Einfluss auf die Verständlichkeit für Expertennutzer genauer untersuchen.



Abbildung 7.12: Der maßstabsgetreue Prototyp erlaubte auch das Testen von Multi-Touch-Gesten (Hösl, 2012). Diese waren auf dem skalierten Prototyp nur eingeschränkt durchführbar und konnten daher nur schlecht überprüft und getestet werden.

Der große Prototyp erlaubte aber auch das Überprüfen von Interaktionen, die mit dem skalierten Prototyp nicht durchführbar waren. Neben der Analyse mit dem Mensch-Modell RAMSIS (Forschungsvereinigung Automobiltechnik, 1995) liefert auch dieser Prototyp erste Erkenntnisse zur Erreichbarkeit einzelner Displaybereiche. Da während der Studie keine der Funktionen in dieser Hinsicht negativ bewertet wurde, kann von einer guten Erreichbarkeit der wesentlichen Funktionen ausgegangen werden.

Neben dieser Überprüfung konnten im Gegensatz zum skalierten Prototyp erstmals auch Multi-Touch-Gesten realistisch eingebunden werden (siehe Abbildung 7.12). Während der Displayplatz des skalierten Prototyps zu gering war, erlauben große Flächen, wie die Übersichtskarte, auch den Einsatz beider Hände zur Interaktion. Da die Teilnehmer ohnehin eine bessere Integration der Karte in die Benutzeroberfläche forderten, konnten auf diese Weise verschiedene Gesten direkt getestet werden (z.B. das Skalieren der Kartenansicht).

7.2.3 Pixelgenauer Prototyp

Basierend auf den gemachten Erfahrungen beider Papierprototypen wurde abschließend ein pixelgenauer Prototyp der Benutzeroberfläche in Adobe Fireworks⁵ erstellt. Vor der eigentlichen Umsetzung wurden zusätzlich noch Storyboards des zu testenden Einsatzszenarios erstellt, um eventuelle Probleme damit vor der Umsetzung zu identifizieren. Da dieser digitale Prototyp direkt auf dem Curve bedient werden soll, ist er jedoch noch schlechter zu

⁵ <http://www.adobe.com/de/products/fireworks.html>, zuletzt aufgerufen am 15.10.2013

transportieren als der große Papierprototyp. Dennoch konnte er direkt am Curve von Lehrstuhlmitarbeitern hinsichtlich der Usability und Visualisierung und von Expertennutzern anhand von Fotos und Bildern evaluiert werden.

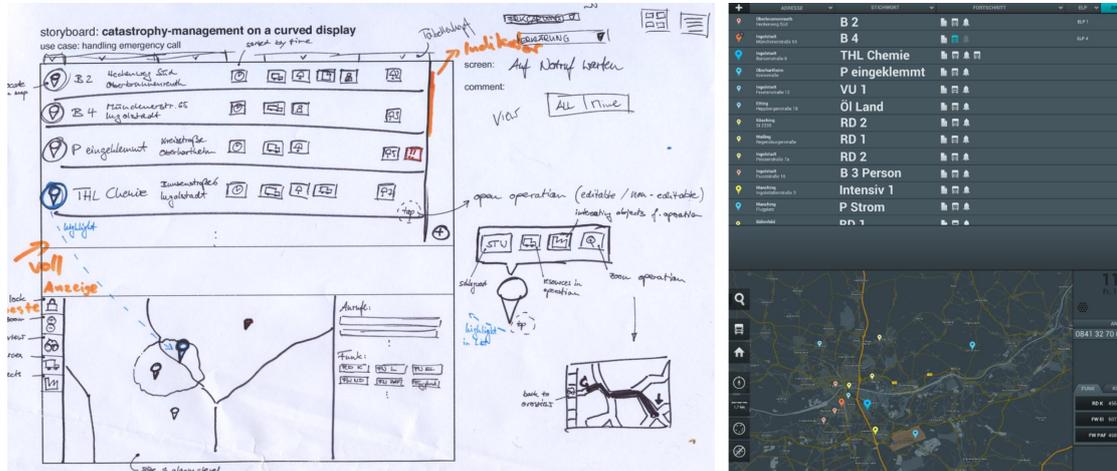


Abbildung 7.13: Basierend auf einzelnen Storyboard Frames wurden digitale, pixelgenaue Entwürfe der späteren Benutzeroberfläche entworfen (Hösl, 2013). Durch das Feedback von Experten wurden diese groben Skizzen (links) noch iterativ verbessert bevor die finalen Versionen (rechts) erstellt wurden.

Umsetzung

Die Grundlage für die Erstellung eines pixelgenauen Prototyps ist ein ausgearbeitetes Storyboard, das aus diversen einzelnen Frames besteht (siehe Abbildung 7.13 links). Dieses Storyboard definiert zum einen den Ablauf der darzustellenden Interaktionen und stellt zum anderen eine Diskussionsgrundlage während der Entwicklung dar. Zur einfacheren Erstellung der einzelnen Frames kommen vorgefertigte Entwürfe zum Einsatz, auf denen die Displaybereiche des Curve eingezeichnet sind. So wird eine Konstanz bezüglich der Gesamtaufteilung zwischen den einzelnen Frames sichergestellt. Neben jedem Frame können auch zusätzliche Notizen und Ideen schriftlich festgehalten werden.

Aus den finalen Versionen der Frames entsteht abschließend ein pixelgenauer Prototyp, der auf dem Curve dargestellt wird. Hinter diesem Prototyp steckt jedoch keinerlei Anwendungslogik. Es handelt sich lediglich eine Vielzahl von Einzelbildern, die in einer festen Reihenfolge durchlaufen werden. Die von Adobe Fireworks erstellten Einzelbilder werden mit Hilfe der vorhandenen Entzerrungsmethoden (siehe Abschnitt 3.2) entzerrt. Somit erscheinen sie auf dem Curve wie eine einheitliche, durchgehende Programmoberfläche.

Um aus diesen vielen Einzelbildern einen glaubhaften Prototyp entstehen zu lassen, müssen die Einzelbilder passend zu einer stattfindenden Interaktion umgeschaltet werden. Daher wurde vorab ein fester Ablauf des Anwendungsszenarios bestimmt, in dem sowohl die

Orte einer vermeintlichen Touch-Eingabe als auch der jeweils nächste Bildschirminhalt definiert war. Während der genaue Ablauf des Szenarios im Laufe des gesamten Projekts durch die Expertennutzer mitentwickelt wurde, ergeben sich die Positionen für die vermeintlichen Touch-Eingaben durch das Design der Programmoberfläche.

Das erforderliche Weiterschalten der statischen Bilder kann auf zwei Arten erfolgen: entweder per Touch an einer beliebigen Stelle auf dem Display oder durch ein externes Eingabegerät. Um das ungewollte Weiterschalten von Bildern während der Diskussionen in der Studie zu verhindern, erfolgt die Interaktion mit dem pixelgenauen Prototyp mittels eines externen Eingabegeräts. Mit einem Fußpedal schaltet der Versuchsleiter die Bilder unmerklich vom Teilnehmer durch (siehe Abbildung 7.14). Auf diese Weise erscheint das System für den Teilnehmer sowohl interaktiv wenn er selbst bedient als auch wenn der Studienleiter das System bedient und der Teilnehmer die Interaktionsabläufe bewerten soll.

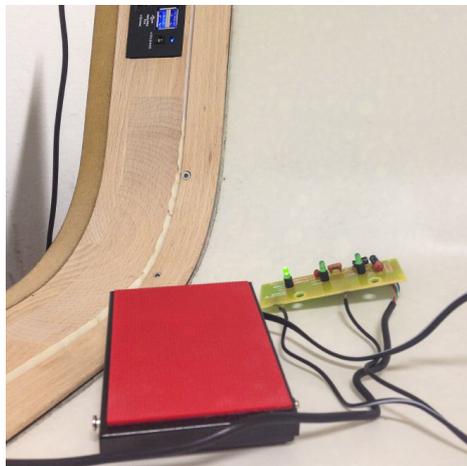


Abbildung 7.14: Das Gitarrenpedal dient zu unauffälligen Steuerung des pixelgenauen Prototyps (Hösl, 2013). Mit ihm schaltet der Versuchsleiter durch eine kurze Bewegung mit dem Fuß zum nächsten Bildschirm weiter, ohne dass der Teilnehmer dies bemerkt.

Erfahrungen

Die in Abschnitt 7.1.4 beschriebenen Studien wurden basierend auf dem hier vorgestellten pixelgenauen Prototyp durchgeführt. Entsprechend des Studiendesigns sind auch die Erfahrungen mit dieser Art Prototyp in zwei Bereiche unterteilt. Während die Studie am Curve aufgrund des Fußpedals ein relativ direktes Interaktionserlebnis ermöglichte, waren die Eindrücke der Expertennutzer stark eingeschränkt.

Die Lehrstuhlmitarbeiter, die den pixelgenauen Prototyp getestet haben, konnten aufgrund des detaillierten Designs ausführliches Feedback zur Gestaltung der Benutzerschnittstelle geben. Dieses Feedback wurde zwar durch die kontrastarme Darstellung der Rückprojektion beeinflusst, lieferte aber dennoch wertvolle Anhaltspunkte für die Weiterentwicklung (siehe Abschnitt 7.1.4). Die Teilnehmer lobten die erlebbare Interaktivität des Prototyps, die durch

die unauffällige Bedienung des Fußpedals zustande kam. Im Gegensatz zu den vorherigen Papierprototypen wurden dadurch auch Diskussionen über die Interaktionsabläufe und die Häufigkeit von Interaktionen auf den jeweiligen Displaybereichen angeregt.

Diese Interaktivität fehlte der Version, die im ILS-Kontext mit den Expertennutzern evaluiert wurde, völlig. Da der Curve für die Studie nicht transportiert werden konnte, wurde auf Fotos und die zum Teil vergrößerte Darstellung der pixelgenauen Prototypen zurückgegriffen. Zwar haben die Experten hierbei auch Feedback zu den Interaktionsabläufen in den getesteten Szenarien gegeben, jedoch konnte die Form des Displays und die damit verbundene Aufteilung der Benutzerschnittstelle nicht überprüft werden. Die Teilnehmer konnte immer einen großen Teil des Interfaces überblicken, während ein Nutzer am Curve vor allem beim Betrachten des Inhalts auf dem horizontalen Bereich den Kopf neigen muss.

7.2.4 Eignung der verschiedenen Prototypen

Eine allgemeine Empfehlung einer einzelnen Prototypingtechnik aufgrund der hier vorgestellten Entwicklung ist nicht möglich. Welche Art Prototyp für eine neue Entwicklung passend ist, hängt stark vom eigentlichen Ziel des Prototyps ab und variiert von Projekt zu Projekt. Außerdem spielt die Form des Displays, für das ein Prototyp erstellt werden soll, eine wichtige Rolle. Die hier zusammengefassten Erfahrungen und gezogenen Schlüsse beziehen sich daher ausdrücklich auf ein Display, das eine Form hat, die mit der des Curve vergleichbar ist.

Soll eine erste, ungefähre Aufteilung der Benutzerschnittstelle auf das Display evaluiert werden, eignet sich ein **skalierter Prototyp**, der die Displayproportionen und die Form nur sehr vage abbildet. Der hohe Abstraktionsgrad verhindert zwar ein detailliertes Feedback zu genauen Dimensionen und Interaktionsabläufen, genügt aber um die wichtigsten Funktionen auf dem Display zu verteilen. Durch die geringe Größe ist ein solcher Prototyp außerdem einfach zu transportieren und schnell modifizierbar. Änderungen, die bei einem digitalen Prototyp eventuell dazu führen, dass viele Bildschirme neu gerendert werden müssen, sind hier einfach zu realisieren.

Die Probleme, die der skalierte Prototyp hat, fängt ein **Prototyp in Originalgröße** und Form ab. Dieser eignet sich trotz der weiterhin extrem abstrakten Darstellung zur genaueren Verteilung von Elementen auf den einzelnen Displaybereichen. Zusätzlich können die Erreichbarkeit von Elementen und die Sinnhaftigkeit von Interaktionsabläufen untersucht werden. Allerdings muss hier beachtet werden, dass großflächige Elemente ohne detaillierten Inhalt den Abstraktionsgrad des Prototyps noch einmal erhöhen. Dies kann im schlimmsten Fall die Qualität und den Umfang des erhaltenen Feedbacks negativ beeinflussen.

Diese Probleme wiederum gleicht ein **pixelgenauer Prototyp** zum Teil aus. Er erlaubt aufgrund des hohen Detailgrads auch Feedback zu großflächigen Elementen einzuholen und erhöht die Glaubwürdigkeit der Darstellung enorm. Allerdings ist ein solcher Prototyp nur auf dem Originaldisplay sinnvoll darstellbar. Handelt es sich bei dem Display um einen großen, schwer beweglichen Prototyp, müssen Expertennutzer für Studien zum Displaystandort eingeladen werden. Die Darstellung von Fotos und teilweisen Ausschnitten der Benutzerober-

fläche über einen gewöhnlichen Projektor kann dieses Problem nur teilweise ausgleichen. Die Expertennutzer müssen zwar nicht zum Displayprototyp anreisen, dafür geht der Eindruck der Displayform und deren Einfluss auf die Sichtbarkeit und Erreichbarkeit von Elementen verloren. Insgesamt habt sich also die Kombination der genutzten Techniken zur Erstellung und Evaluierung der Prototypen einer Leitstandoberfläche am Curve als sinnvoll erwiesen.

tl;dr

Der Curve eignet sich zur Adaption einer Multi-Display-Umgebung aus dem Bereich des Katastrophenmanagements. Sowohl Papierprototypen als auch digitale, pixelgenaue Prototypen können dabei unter gewissen Voraussetzungen zur Entwicklung eingesetzt werden. Besonders die Displaygröße, die Displayform und ein realistischer Interaktionsfluss während der Studien sind dabei Kriterien anhand derer sich die Eignung der einzelnen Techniken entscheidet. Während die ungefähre Aufteilung der Benutzeroberfläche mit einfachen Papierprototypen überprüft werden kann, macht die Displaygröße einen digitalen Prototyp zur Bewertung großflächiger Elemente und des Interaktionsflusses notwendig.

IV

ABSCHLUSS UND AUSBLICK

Kapitel 8

Wissenschaftlicher Beitrag

Ich habe fertig.

– Giovanni Trapattoni, Fußballtrainer –

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein gebogenes, interaktives Display vorgestellt: der Curve. Anhand des Projektverlaufs wurden zunächst Erfahrungen aus der frühen Konzeptionsphase und anschließend aus der Konstruktionsphase des Displayprototyps beschrieben. Im weiteren Verlauf der Arbeit wurden dann die Auswirkungen der Displayform auf bekannte Interaktionsformen wie Dragging oder Pointing untersucht. Auf diesen Erkenntnissen basierten auch die Entwürfe für neuartige Visualisierungen und Benutzerschnittstellen, die die gebogene Displayoberfläche des Curve nutzen. Dieses Kapitel fasst die wesentlichen wissenschaftlichen Ergebnisse noch einmal zusammen. Basierend auf den gesammelten Erfahrungen aus den vorgestellten Arbeiten werden am Ende vier Empfehlungen für vergleichbare Projekte formuliert.

8.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und anhand der beiden zentralen Forschungsfragen strukturiert (siehe Abschnitt 1).

8.1.1 Effekte der gebogenen Displayform

Die Lage und Ausrichtung eines gewöhnlichen, planaren Bildschirms in Relation zum Nutzer reicht bereits aus, um die Interaktion mit dem Display zu beeinflussen (Forlines u. a., 2007; Wigdor u. a., 2006). Daher beschäftigt sich die erste Forschungsfrage dieser Arbeit

damit, welche Effekte die gebogene Displayform des Curve auf die Interaktion des Nutzers mit dem System hat. In verschiedenen Studien wurden sowohl die indirekte Interaktion mit einer Maus als auch die direkte Interaktion mittels Berührung (Touch) untersucht. Die Ergebnisse haben zum einen objektiv messbare Effekte und zum anderen eine Beeinflussung der subjektiven Wahrnehmung durch die Nutzer offenbart.

Bei der Betrachtung von **Pointing** (siehe Abschnitt 4.2), einer der am weitesten verbreiteten Interaktionsarten heutiger Benutzerschnittstellen, zeigen sich verschiedene Effekte der gebogenen Displayform. Bei den getesteten Eingabearten Pointer und Touch wurden zum Teil deutliche Unterschiede bei der Interaktionsgeschwindigkeit und der Genauigkeit festgestellt. Unabhängig von der Art der Eingabe war die gemessene Interaktion an den Displayrändern tendenziell langsamer als in der Mitte des Displays. Während eine längere Bewegung des Nutzers in den äußeren Bereichen die Ergebnisse für Touch-Interaktion erklärt, trifft diese Erklärung bei der Maus nicht zu, da deren Position während der Studie nicht verändert wurde. Hier scheinen die an den Displayrändern beobachteten, nach innen gebogenen Bewegungspfade des Mauszeigers zu den verlängerten Interaktionszeiten zu führen. Trotz dieser festgestellten Effekte lassen sich die Interaktionszeiten für beide Eingabearten in Anlehnung an Fitts' Law sehr gut vorhersagen.

Interessanterweise wich die wahrgenommene Interaktionsgeschwindigkeit der Teilnehmer teilweise von den gemessenen Werten ab. Obwohl kein objektiver Unterschied gefunden wurde, empfanden die Teilnehmer die aufwärts verlaufende, indirekte Interaktion mit der Maus als schneller als die abwärts gerichtete. Interessanterweise ist die Bewertung der direkten Interaktion genau andersherum - hier schneidet die abwärts laufende Interaktion leicht besser ab, obwohl es auch hierfür keinen objektiven Beleg gibt.

Im Gegensatz zur Interaktionszeit wurde die gemessene Genauigkeit der Interaktion nur bei direkter Eingabe von der Position des Ziels auf dem Curve beeinflusst. Da hier vor allem Ziele im linken Randbereich des Curve schlecht abschnitten, ist die Händigkeit der Teilnehmer eine plausible Erklärung - an der Studie hatten größtenteils Rechtshänder teilgenommen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Händigkeit späterer Nutzer eines gebogenen Displays in Designentscheidungen der grafischen Benutzerschnittstelle berücksichtigt werden sollte. Es wurde aber auch ein Effekt der Displayorientierung nahe der Kurve gefunden. Die gebogene Displayform sorgt also für eine bessere Erreichbarkeit einer großen Displayfläche im Vergleich zu einem ausschließlich horizontalen Display.

Als weitere zentrale Interaktionsart wurde **Dragging** (siehe Abschnitt 4.3) und dessen Beeinflussung durch den Übergang zwischen den beiden Displayflächen des Curve überprüft. In einer Studie mit drei verschiedenen Displayübergängen (Kurve, Kante, Rahmen) haben sich für die beiden Eingabearten Touch und Pointer vor allem messbare Unterschiede bei der Genauigkeit von Dragging-Gesten gezeigt. Während die Interaktionsgeschwindigkeit nicht signifikant von der Art der Verbindung beeinflusst wurde, gab es bei der Genauigkeit der Dragging-Geste teils deutliche Unterschiede. Der signifikante Unterschied zwischen der kantigen Verbindung und der Kurve des Curve entsteht vor allem durch Abweichungen nahe der Displayverbindung. Die Studienteilnehmer versuchten scheinbar die Dragging-Geste vollständig durch die Kante hindurch auszuführen. Hierdurch entstanden in diesem Bereich

zum Teil deutliche Abweichungen vom kürzesten Pfad zwischen Start und Ziel. Wurde kein Pfad vorgegeben sind die Dragging-Pfade in der kantigen Verbindung außerdem deutlich breiter über das Display gestreut als bei den anderen beiden Verbindungstypen.

Bei der subjektiven Selbstwahrnehmung der Nutzer zeigte sich, wie beim Pointing, ein deutlicher Einfluss der Displayform, der ebenfalls nicht immer durch objektive Messdaten belegt werden konnte. Während die kantige Verbindung insgesamt bei der indirekten Maus-Eingabe sehr gut bewertet wurde, schnitt bei der Touch-Eingabe die Kurve als Verbindung sehr gut ab. Interessanterweise zeigen sich diese Unterschiede auch bei der Frage nach der wahrgenommenen Interaktionsgeschwindigkeit. Hier werden die Displayverbindungen ebenfalls unterschiedlich bewertet, obwohl die objektiven Messdaten keinen Unterschied aufzeigen. Insgesamt wurde gezeigt, dass die gebogene Displayverbindung des Curve sehr gut für die direkte Interaktion geeignet ist, bei indirekter Mauseingabe jedoch schlechter als eine vergleichbare kantige Verbindung abschneidet.

Zusätzlich zu diesen grundlegenden Interaktionsformen wurde mit einem **Tangible User Interface** (TUI) auch ein neues Interfaceparadigma untersucht, das bisher vor allem auf horizontalen Displays eingesetzt wird (siehe Kapitel 5). Dabei stand zunächst die Konstruktion eines TUI im Vordergrund, das auf den beiden planaren Bereichen des Curves genutzt werden kann: die Vertibles. Diese sind eine Gruppe transparenter Objekte, die verschiedene Funktionen zur Steuerung von Programmen ermöglichen. Die einzelnen Objekte haften aufgrund vakuum-basierter Adhäsion außerdem auch auf dem vertikalen Displaybereich des Curve. Basierend auf derselben Technik wurden weitere Objekte für eine Studie zur Nutzung eines TUI am Curve gestaltet. In der Studie spielten die Nutzer mit einigen physikalischen Objekten ein einfaches Spiel, wobei sich das Spielbrett in der einen Hälfte der Durchläufe auf der horizontalen Fläche und in der anderen Hälfte auf der vertikalen Fläche befand. Es stellte sich heraus, dass die Teilnehmer mit den Objekten auf dem horizontalen Bereich signifikant häufiger interagierten. Auch wenn der Unterschied im Vergleich zum vertikalen Displaybereich relativ groß ausfiel, gaben die Teilnehmer an, keinen der Bereiche häufiger genutzt zu haben. Auch hier zeigt sich also ein Unterschied zwischen objektiven Daten und subjektiver Wahrnehmung.

Antwort auf Forschungsfrage 1

Betrachtet man diese Ergebnisse, so zeigt sich deutlich, dass die gebogene Displayform des Curves einen Einfluss auf die unterschiedlichen Interaktionsarten hat. Sowohl die Interaktion zwischen den Displaybereichen als auch durch die Displayverbindung hindurch wird durch die Orientierung und die Form der interaktiven Fläche beeinflusst. Dieser Einfluss zeigt sich dabei sowohl anhand objektiver Messwerte als auch bei der Selbsteinschätzung der Studienteilnehmer. Dabei gehen die beiden Bewertungen jedoch nicht immer in dieselbe Richtung und sollten daher unbedingt beide betrachtet werden. Insgesamt hat sich jedoch anhand beider Bewertungsarten gezeigt, dass die Displaykurve für die direkte Touch-Interaktion sehr gut geeignet ist. Dagegen ist für die Interaktion mit dem Mauszeiger die Kurve weniger gut geeignet als eine direkte, kantige Verbindung.

8.1.2 Potenziale eines gebogenen Displays

Neben den Einflüssen der gebogenen Displayform auf die Eingabe ergeben sich auch neue Möglichkeiten für die Darstellung von Informationen und grafischen Benutzerschnittstellen. Im Rahmen der Untersuchung der zweiten Forschungsfrage wurden daher Prototypen entwickelt und untersucht, die die Form des Curve zur Darstellung einer perspektivischen Visualisierung und einer darauf aufbauenden virtuellen Arbeitsumgebung nutzen. Darüber hinaus wurden in diesem Zusammenhang auch erste Erfahrungen zu Eignung konventioneller Prototypingtechniken grafischer Benutzerschnittstellen gesammelt.

Die Visualisierung **Perspective+Detail** kombiniert eine zweidimensionale Kartenansicht mit einer perspektivisch korrekten Erweiterung dieser Karte. Dazu wird auf dem horizontalen Displaybereich ein Kartenausschnitt aus der Vogelperspektive dargestellt - vergleichbar mit einer konventionellen Karte, auf die ein Betrachter direkt von oben schaut. In der nahtlosen Displaybiegung des Curve wird diese Karte perspektivisch vom Nutzer weg erweitert. Für diesen erscheint es also so, als ruge die Karte in den Curve hinein. Während diese perspektivische Erweiterung dazu führt, dass sich die Übersicht über die dargestellte Karte verbessert, dient der vertikale Displaybereich gleichzeitig zur Integration von textuellen Detailinformationen. Diese sind direkt mit den Informationen im perspektivischen Bereich verknüpft und ermöglichen das schnelle Navigieren zu Punkten auf der perspektivischen Karte. Eine erste Studie hat gezeigt, dass diese Visualisierungsart verständlich ist und bei einer einfacheren Navigation über große Pläne hinweg hilft.

Eine solche perspektivische Erweiterung nutzt auch der **PerspectiveTable**, eine virtuelle Kollaborationsumgebung für zwei Nutzer. Das System nutzt die perspektivische Darstellung aus Perspective+Detail, stellt aber statt einer Karte einen virtuellen Konferenztisch mit der grafischen Repräsentation des Arbeitspartners am anderen Ende dar. Diese Repräsentation in Form eines Avatars wird durch die zur Laufzeit aufgenommenen Bewegungen des jeweiligen Nutzers animiert.

Um potenzielle Probleme bei der Kommunikation der Nutzer hinsichtlich einfacher links-/rechts-Referenzen zu vermeiden, wurde das Prinzip des **Spatial Mirroring** eingeführt. Hierbei wird die Darstellung für einen der beiden Nutzer an mehreren Stellen gespiegelt, so dass die Referenzen links und rechts für beide Nutzer identisch sind. Die vollständig virtuelle Darstellung verhindert dabei, dass diese Spiegelung für den Nutzer direkt offensichtlich ist. In einer ersten Studie wurde gezeigt, dass Spatial Mirroring die Fehlerrate und Interaktionszeit bei einfachen Selektionsaufgaben reduziert. In einer Folgestudie wurde außerdem gezeigt, dass eine gespiegelte Visualisierung auch in realen Kollaborationsszenarien die Probleme unterschiedlicher Referenzsysteme reduziert.

Ein anderer Ansatz wurde bei der Adaption einer **Leitstand-Umgebung** im Rahmen des Katastrophenmanagements gewählt. Als Ausgangspunkt diente dabei eine integrierte Leitstelle (ILS) in Ingolstadt, die im Regelfall aus mindestens vier verschiedenen Bildschirmen besteht. Zunächst wurden diese einzelnen Elemente entsprechend ihrer Eignung bezüglich Lesbarkeit und direkter Interaktivität auf die Displaybereiche des Curve verteilt. Während die Eingabe und Verwaltung textueller Informationen auf dem vertikalen Bereich darge-

stellt wird, findet die direkte Interaktion mit einer Landkarte auf dem horizontalen Bereich statt. Die Kurve, die bei den perspektivischen Visualisierungen als verbindendes Element genutzt wurde, dient bei dieser Benutzeroberfläche als visuell trennendes Element zwischen den Displaybereichen. Hier befindet sich eine einfach zu erreichende und gut einsehbare Zwischenablage, von der aus die gespeicherten Informationen und Einsätze auf die beiden Displaybereiche gezogen werden können.

Während der Entwicklung dieser Benutzeroberfläche sind zudem verschiedene klassische **Prototypingtechniken** zum Einsatz gekommen. Neben zwei Papierprototypen wurde auch ein pixelgenauer, digitaler Prototyp für eine abschließende Evaluierung eingesetzt. Während sich der erste, sehr einfache Papierprototyp aufgrund seiner Transportfähigkeit gut für Feedbackgespräche bei den Expertennutzern vor Ort eignete, verhinderte seine schlechte Adaption der gebogenen Displayform und die verzerrten Größenverhältnisse detailliertes Feedback. Der Papierprototyp in Originalgröße hatte diese Probleme zwar nicht, er war jedoch deutlich schlechter zu transportieren und während der Studie vom Studienleiter schwer zu bedienen. Außerdem führte die sehr abstrakte Darstellung großflächiger Elemente dazu, dass die Expertennutzer sich nicht richtig in das vorgegebene Szenario einfühlen konnten.

Der finale, pixelgenaue Prototyp war aufgrund seiner Bindung an den Curve nicht mehr transportabel. Deswegen wurde er in zwei getrennten Studien einerseits von Usability-Experten und andererseits von den Expertennutzern anhand von Fotos und skalierten Darstellungen der Benutzeroberfläche evaluiert. Diese Studien haben vor allem Feedback zum Design und den Arbeitsabläufen des Prototyps geliefert, während von den Experten jedoch kaum Feedback zur generellen Struktur oder möglichen Positionierungsproblemen gegeben wurde.

Antwort auf Forschungsfrage 2

Eine gebogene Displayform wie die des Curves ermöglicht neuartige grafische Benutzeroberflächen, die über die Möglichkeiten konventioneller Bildschirme hinausgehen. Die perspektivischen Visualisierungen zeigen, dass die Form des Displays und der nahtlose Übergang zwischen den Displaybereichen erlauben, verschiedene Ansichten miteinander zu kombinieren. Dabei entspricht die eigentliche Darstellung einer Nachbildung der tatsächlichen Form der Daten - ein Teil einer Karte oder eines Tisches wird direkt von oben betrachtet und breitet sich perspektivisch vor dem Nutzer aus. Zusätzlich profitieren aber auch zweidimensionale grafische Benutzerschnittstellen von einem gebogenen Display. Aufgrund der Displaybereiche, die für verschiedene Aufgaben unterschiedlich gut geeignet sind, können bisherige Arbeitsabläufe anhand einzelner Teilschritte optimal auf dem gebogenen Display verteilt werden. Während Teilschritte, die vor allem aus Betrachten und Lesen von Inhalten bestehen, besonders auf dem vertikalen Bereich des Curve sinnvoll sind, eignet sich der horizontale Bereich besonders für die direkte Interaktion. Die Verbindung durch die Kurve verknüpft dabei beide Bereiche nahtlos miteinander, so dass eine einheitliche Benutzeroberfläche entsteht.

8.2 Diskussion

Während die vorgestellten Projekte dieser Arbeit jeweils zu eindeutigen Ergebnissen geführt haben, ergeben sich durch die Kombination aller gemachten Erfahrungen zusätzliche Empfehlungen zum Vorgehen bei ähnlichen Projekten. Die einzelnen Empfehlungen werden in diesem Abschnitt formuliert¹. Da der Erfahrungsschatz der vorgestellten Projekte begrenzt ist, bilden sie außerdem auch Ausgangspositionen für weitere Forschungsarbeiten. Denn die angesprochenen Bereiche sind zu komplex, um eine abschließende Empfehlung auszusprechen.

8.2.1 Frühzeitige Evaluation der Displayform

Betrachtet man alle Prototypen, die während dieser Arbeit entstanden sind, so zeigt sich, dass die frühzeitigen Evaluationen der Displayform maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat. Dabei genügt jedoch keiner der Einzelschritte für sich allein. Sowohl die Expertenanalyse als auch die Nutzerstudie mit Papierprototypen haben jeweils unterschiedliche Faktoren des Displays behandelt und somit zu dessen Verbesserung beigetragen. Dabei sind Überschneidungen zwischen den einzelnen Techniken zwar nicht zu vermeiden. Die direkte Erreichbarkeit aller Displaybereiche ist beispielsweise durch den Papierprototyp sehr früh überprüft worden. Die zusätzliche Analyse mit dem digitalen Mensch-Modell RAMSIS (Forschungsvereinigung Automobiltechnik, 1995), das normalerweise für Analysen zur Ergonomie von Fahrzeugcockpits eingesetzt wird, lieferte zusätzliche Hinweise zur Sicht- und Lesbarkeit von Elementen auf dem Curve. Diese konnten in dieser detaillierten Form nicht durch einen Papierprototyp erfasst werden.

Insgesamt hat sich also die Kombination unterschiedlicher Evaluationsmethoden als sinnvoll herausgestellt. Vergleichbare Projekte sollten in ähnlicher Weise auf verschiedene Prototypen setzen, auch wenn die Eignung der einzelnen Methoden von Fall zu Fall entschieden werden muss. Da die Analyse mit RAMSIS vollständig digital erfolgt, kann sie für beliebige Displayformen durchgeführt werden und somit als universelle Methode in Betracht gezogen werden. Basierend auf ihren Ergebnissen können dann weitere Studien zum Verfeinern der Ergebnisse und Einholen der Nutzermeinungen durchgeführt werden. Denn wie sich in den Studien dieser Arbeit gezeigt hat, stimmen die objektiven Daten einer Studie

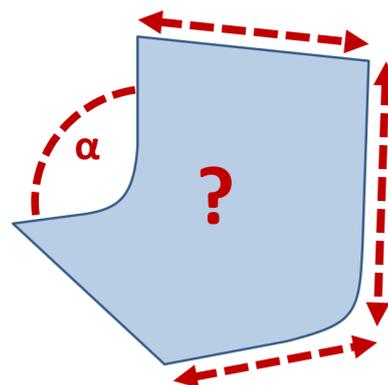


Abbildung 8.1: Displayparameter iterativ untersuchen.

¹ Der Inhalt dieses Abschnitts basiert auf einer publizierten Arbeit (Hennecke, 2013). Der Autor der Veröffentlichung ist Fabian Hennecke.

nicht immer mit den wahrgenommenen Erfahrungen der Nutzer überein.

8.2.2 Messwerte und Nutzermeinungen einbeziehen

In den durchgeführten Studien dieser Arbeit wurden meist auf zwei Arten Daten gewonnen. Zum einen wurden objektive Messwerte erhoben und zum anderen wurden die Studienteilnehmer mit Hilfe von Fragebögen zu ihrer Einschätzung der eigenen Leistung befragt. Dabei hat sich herausgestellt, dass diese Ergebnisse teils deutlich voneinander abweichen. Besonders bei den Grundlagenuntersuchungen zu Effekten der Displayform auf die Nutzerinteraktion (siehe Kapitel 4) wurden solche Unterschiede beobachtet.

Während es in der Studie zum Einfluss der Displayverbindung beispielsweise keine signifikanten, objektiven Unterschiede bei der Interaktionsgeschwindigkeit gab, wichen die Bewertungen der Nutzer bei der Frage nach der Geschwindigkeit deutlich voneinander ab. Die direkte Interaktion durch die Kurve wurde von deutlich mehr Teilnehmern als schnell bewertet als dieselbe Interaktion durch die kantige Verbindung. Eine Abweichung in die andere Richtung konnte bei der Untersuchung von Tangible User Interfaces am Curve festgestellt werden. Hier gaben die Teilnehmer an, dass sie auf keinem der beiden Displaybereiche häufiger interagiert hätten als auf dem anderen. In Wahrheit interagierten sie aber auf dem horizontalen Bereich signifikant häufiger.

Aus diesem Grund sollte während der Untersuchung einer neuen Displayform immer beide Datenerhebungsmethoden genutzt werden. Nur so ist sichergestellt, dass die späteren Nutzer kein Display vorgesetzt bekommen, dass zwar objektiv gesehen sehr schnell ist, dessen Bedienung sich für den Nutzer jedoch anders anfühlt. Je nach späterem Nutzungskontext kann es somit sogar sinnvoll sein, die Meinung der Nutzer in den Vordergrund zu stellen und die objektiven Messungen erst danach zu betrachten. So wäre das Gefühl der Nutzer der wichtigste Faktor bei der Entwicklung, ohne dass die objektive Leistungsfähigkeit des Displays völlig außer Acht gelassen wird.

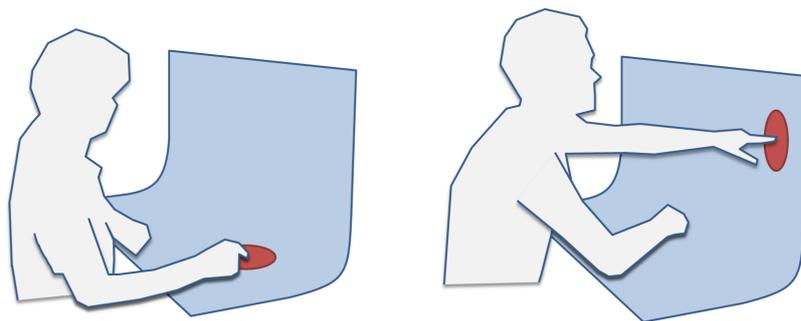


Abbildung 8.2: Interaktionen auf den Displayflächen sind zum Teil unterschiedlich schnell und werden unterschiedlich wahrgenommen. Dies sollte man beim Design einer Anwendung berücksichtigen.

8.2.3 Form des Displays nutzen

Gebogene Displays wie der Curve bieten neben einer besseren Erreichbarkeit einer großen Displayfläche noch zwei weitere Vorteile: Sie erlauben im Vergleich zu herkömmlichen, planaren Displays neue Arten der Informationsdarstellung und haben das Potenzial vorhandene grafische Benutzeroberflächen mit Hilfe der unterschiedlich orientierten Displaybereiche zu optimieren.

Eine Möglichkeit ein gebogenes Display für eine Visualisierung zu nutzen zeigen Perspective+Detail und der PerspectiveTable. Beide nutzen die Displayform, um unterschiedliche Ansichten auf räumliche Informationen zu kombinieren. Da die gezeigte perspektivische Erweiterung einer virtuellen Verlängerung des horizontalen Displaybereichs entspricht, ist die Darstellungsart für den Nutzer sofort verständlich. Dieselbe Darstellung auf einem

flachen Display (Lorenz u. a., 2008) erscheint hingegen auf den ersten Blick extrem ungewohnt und unübersichtlich. Neben diesen Visualisierungen erlaubt der Curve auch die Optimierung einer zweidimensionalen grafischen Benutzeroberfläche. Diese kann hinsichtlich der Lesbarkeit und Erreichbarkeit von Inhalten durch die Displaybereiche eines gebogenen Displays wie dem Curve optimiert werden. Aufgaben, die einen hohen Leseanteil besitzen, werden auf dem vertikalen Displaybereich untergebracht, die direkte Interaktion findet dagegen auf dem horizontalen Bereich statt.

Aus diesen Beispielen lassen sich zwei wesentliche Empfehlungen für das Ausnutzen einer non-planaren Displayform formulieren. Zum einen sollten Visualisierungen realitätsnaher Daten die Displayform so nutzen, dass sie ihrer natürlichen Darstellung möglichst nahe kommen. Dies vereinfacht das Verständnis der Visualisierung und erlaubt es außerdem, Interaktionen, die der Nutzer aus der realen Welt kennt (z.B. das Herüberreichen eines Dokuments), in die virtuelle Darstellung zu übertragen. Die zweite Empfehlung bezieht sich auf die Optimierung zweidimensionaler Benutzeroberflächen. Der Entwurf einer Leitstandsoberfläche hat gezeigt, dass selbst komplexe Aufgabengebiete anhand der bestehenden Anforderungen ihrer Teilaufgaben auf ein non-planares Display aufgeteilt werden können. Dabei spielen sowohl die Erreichbarkeit und Sichtbarkeit von Informationen als auch die Meinung der späteren Nutzer eine wichtige Rolle. Orientiert man sich an diesen Parametern, kann ein gebogenes Display auch konventionelle zweidimensionale Benutzerschnittstellen verbessern.

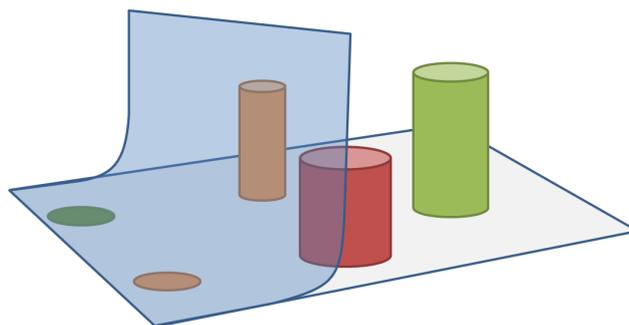


Abbildung 8.3: Displayform für Visualisierungen und Interfaces nutzen.

8.2.4 Prototyping-Methoden bewusst auswählen

Im Laufe dieser Arbeit ist bei der Entwicklung von grafischen Benutzerschnittstellen eine Vielzahl unterschiedlicher Prototypen gebaut und evaluiert worden. Dabei sind sowohl klassische Papierprototypen als auch vollständig digitale Mockup-Prototypen zum Einsatz gekommen. Es hat sich gezeigt, dass sehr einfache Papierprototypen zwar für die Entwicklung und die Planung sinnvoll sein können, aber die grundlegende Idee der Displayform im Rahmen einer Nutzerstudie eventuell nicht ausreichend umsetzen.

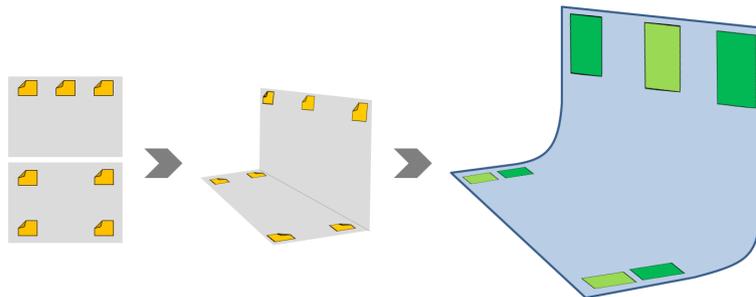


Abbildung 8.4: Prototyping-Methoden sollten je nach Bedarf bewusst ausgewählt werden.

Diese Papierprototypen können von der Größe theoretisch auch dem eigentlichen Display entsprechen, es sollte aber darauf geachtet werden, dass die Prototypen in einer Studie für den Versuchsleiter bedienbar bleiben. Dauert der Wechsel zwischen verschiedenen Bildschirmen zu lang, kommt der Interaktionsfluss zum Erliegen und die Ergebnisqualität der Studie leidet. Des Weiteren muss die Ausarbeitungsqualität großer Papierprototypen beachtet werden. Neben der Nachbildung der korrekten Displayform betrifft dies auch die Darstellungsqualität der einzelnen Elemente. Der sehr einfache, originalgetreue Prototyp der Leitstandsoberfläche führte durch relativ großflächige, leere Interfaceelemente dazu, dass die teilnehmenden Expertennutzer Schwierigkeiten hatten, den Prototyp als tatsächliches Interface zu verstehen. Insgesamt gilt es hier also die Balance zu finden zwischen einfachen, schnell erstellbaren Prototypen auf der einen Seite und ausreichend komplexen, aber dennoch bedienbaren Prototypen auf der anderen Seite.

8.3 Ausblick

Neben der Weiterentwicklung der vier Empfehlungen für Projekte, gibt es auch konkrete Entwicklungsmöglichkeiten für den Curve. Eine Richtung ist die weitere Untersuchung der Beeinflussung der Nutzerinteraktion durch die Displayform. Zwar wurden bereits einige Studien hierzu durchgeführt, jedoch ist dieser Bereich noch längst nicht vollständig erforscht. Relativ unerforscht ist beispielsweise die indirekte Interaktion mit Inhalten auf dem vertikalen Displaybereich durch direkte Interaktion auf dem horizontalen Bereich. Erste Untersu-

chungen (Voelker u. a., 2013) zeigen das Potenzial dieser Interaktionsform. Doch auch für die konkrete Weiterentwicklung des Curve gibt es mehrere Möglichkeiten. Zum einen bieten technischen Neuerungen (z.B. OLED) der letzten Jahre neue Möglichkeiten bei der Displayentwicklung und dem Prototyping der Displayform. Zum anderen eröffnen weitere Anwendungsszenarien die Möglichkeit, die gebogene Form des Curve zu nutzen.

8.3.1 Technische Weiterentwicklung

Der offensichtlichste Teil für eine zukünftige Weiterentwicklung ist die genutzte Technik des Curve. Die Möglichkeiten zur Verbesserung beziehen sich dabei sowohl auf den Prototyp selbst als auch auf die Möglichkeiten für ein verbessertes Prototyping bei der Entwicklung grafischer Benutzerschnittstellen. Ebenso erlauben flexible Displays, die zu Beginn dieses Projekts noch nicht verfügbar waren, ein interaktives Evaluieren der Displayform. Es besteht außerdem auch die Möglichkeit die Interaktionsmodalitäten mit dem Curve zu erweitern. Ein offensichtlicher Ansatzpunkt ist hierbei eine Gestensteuerung, die die berührungslose Interaktion mit Inhalten ermöglicht.

Flexible Displays

In den letzten Jahren sind vermehrt gebogene Displays in verschiedenen Größen auf den Markt gekommen. Neben gebogenen Mobiltelefonen (z.B. LG Flex) sind mittlerweile auch große, gebogene Fernseher erhältlich, die dem Nutzer eine verbesserte Darstellungsqualität bieten sollen. Die Grundlage dieser Bildschirme sind OLED-Panels, die aufgrund ihrer Bauweise eine gebogene und theoretisch sogar flexible Displayform ermöglichen (siehe Abschnitt 2.1). Die Verwendung eines OLEDs hätte im Zusammenhang mit dem Curve mehrere Vorteile und würde neue Möglichkeiten eröffnen.

Der offensichtlichste Vorteil ist die deutlich **verbesserte Bildqualität** im Vergleich zur bisherigen Rückprojektion. Aufgrund der durchgehenden Displayfläche treten außerdem keine Bildüberschneidungen in der Displaykurve auf. Zusätzlich eliminiert ein OLED die Unschärfe, die bei Projektionssystemen aufgrund der Veränderung des Projektionsabstands entstehen. Außerdem wäre die bisherige Bildkorrektur durch angepasste Software (siehe Abschnitt 3.2) nicht mehr erforderlich, wodurch die Einschränkungen hinsichtlich der nutzbaren Anwendungen wegfallen. Ein weiterer Vorteil eines OLED-basierten Prototyps ist der geringere Platzbedarf des Systems, so dass er deutlich besser in einen Raum integriert und an den jeweiligen Nutzer angepasst werden kann. Rein theoretisch ist mit einem OLED auch ein vollkommen flexibles, gebogenes Display umsetzbar. Hier könnte der Nutzer die Form des Displays der jeweiligen Anwendung anpassen.

Neben diesen Vorteilen im laufenden Betrieb bietet ein flexibles Display aber bereits während der **Prototypingphase** Vorteile. Ähnlich wie der konfigurierbare Papierprototyp zu Beginn dieses Projekts kann ein flexibles OLED dazu genutzt werden die wichtigsten Parameter der Displayform zu evaluieren. Im Gegensatz zur ausschließlich qualitativen Evaluation des

Papierprototyps könnte ein digitaler Prototyp jedoch auch gleichzeitig für objektive Messungen genutzt werden. Die Interaktionszeiten verschiedener Displayformen könnten sofort miteinander verglichen und die Displayform auf diese Weise für einzelne Anwendungsfälle optimiert werden.

Gestenerkennung

Die Arbeiten zum PerspectiveTable integrieren bereits eine rudimentäre Gesteninteraktion am Curve. Der Nutzer kann durch seine Körperbewegungen mit seinem Gegenüber kommunizieren. In Zukunft wäre es daher denkbar, dass diese Gesten zur direkten Steuerung des Curve genutzt werden. Zwar gibt es in diesem Bereich schon viele Arbeiten, die sich besonders mit der Gestensteuerung großflächiger Displays beschäftigen, doch bietet der Curve eine Besonderheit, die flache Displays nicht bieten: Er definiert durch seine gebogene Form ein Volumen, das zwischen den Displaybereichen liegt. Während der horizontale Bereich die Ausdehnung dieses Volumens in der Tiefe und Breite definiert, beschränkt der vertikale Bereich das Volumen zusätzlich in der Höhe. Der Raum, in dem das System auf Gesten reagiert, wäre dadurch also bereits auf natürliche Weise definiert. So könnte die Tendenz zu Fehlinterpretationen und unbeabsichtigten Interaktionen verringert werden.

Im Gegensatz zu planaren Displays ist beim Curve jedoch nicht unbedingt klar, auf welchen Displaybereich sich die Geste bezieht. Eine Wischgeste mit der flachen Hand über dem horizontalen Bereich erscheint vom vertikalen Bereich aus gesehen völlig anders. Eine entsprechende Auswahl an Gesten muss diese mögliche Mehrdeutigkeit berücksichtigen und die damit verbundenen Probleme behandeln. Neben einer Möglichkeit zwischen diesen Interaktionsbereichen zu wählen, kann eine Geste aber auch als Verbindung zwischen den Displaybereichen genutzt werden. Statt Objekte über das Display zu verschieben oder zu schubsen, kann eine Geste genutzt werden, um sie direkt zwischen den Bereichen zu verschieben (Bolt, 1980). Hierfür sind allerdings relativ genaue Trackingtechnologien nötig, die das genaue Erkennen einzelner Finger erlauben.

8.3.2 Neue Nutzungsszenarien

Das größte Potenzial für zukünftige Forschungsarbeiten liegt jedoch bei neuen Nutzungsszenarien. Besonders Bereiche, die verschiedene Arbeitsschritte unmittelbar miteinander kombinieren, sind hierfür interessant. Durch die unterschiedlich orientierten Displaybereiche bietet der Curve die Möglichkeit einzelne Arbeitsschritte auf dem jeweils besser geeigneten Displaybereich auszuführen. Sollten dennoch einmal Wechsel zwischen den Bereichen nötig sein, hilft die nahtlose Verbindung bei einem einfachen Transfer von Inhalten zwischen den Bereichen.

Im Folgenden werden zwei mögliche Szenarien für zukünftige Entwicklungen exemplarisch vorgestellt. Insgesamt sind jedoch viel mehr Szenarien denkbar, da unzählige Arbeitsabläufe von unterschiedlich orientierten Displaybereichen profitieren würden. Um dabei die Vorteile

einer Umsetzung am Curve oder einem vergleichbaren Display zu verdeutlichen, werden unterschiedliche Arbeitsschritte hervorgehoben, die von verschiedenen Displayorientierungen profitieren. Durch die Verbesserung der Displaytechnik könnten dann außerdem erstmals vergleichende Langzeitstudien über die Auswirkungen eines gebogenen Displays auf die Arbeitsleistung durchgeführt werden. Diese sind bisher aufgrund von Problemen bei der Bildqualität und der fehlenden Integration der Bildverzerrung und Toucheingabe in das Betriebssystem nicht möglich.

Autorenarbeitsplatz

Ein mögliches Nutzungsszenario für den Curve ist ein speziell angepasster Autorenarbeitsplatz. Die Idee hierfür ist während der Arbeit an verschiedenen Publikationen zum Curve entstanden. Die grundlegende Idee besteht darin, die Darstellung des Texts und die Repräsentation häufig genutzter Werkzeuge auf dem gebogenen Display zu verteilen.

Um eine gute Lesbarkeit zu gewährleisten und Ermüdungserscheinungen zu verhindern, sollte der zu bearbeitende Text auf dem vertikalen Displaybereich angezeigt werden. Häufig genutzte Werkzeuge werden jedoch in der Nähe der Tastatur auf dem horizontalen Displaybereich angeordnet, um eine schnelle, direkte Interaktion zu ermöglichen. Sinnvoll sind hier vermutlich eher komplexe Aufgaben oder Scripts, da einfache Befehle bereits sehr gut mittels Tastenkürzeln über die Tastatur ausführbar sind. Denkbar wäre auch, dass sich Nutzer eigene Widgets um die Tastatur herum platziert, mit denen man beispielsweise vorgefertigte Elemente einfügen oder an vordefinierte Textstellen springen kann.

Die Kurve könnte in diesem Szenario, wie bei der vorgestellten Leitstandoberfläche (siehe Abschnitt 7.1), als Zwischenablage dienen. Im Gegensatz zur herkömmlichen Zwischenablage bietet die Kurve Platz für mehrere parallel gespeicherte Elemente. Außerdem hat der Nutzer jederzeit im Blick, was sich in der Zwischenablage befindet, da hier zumindest eine kleine Vorschau der einzelnen Elemente angezeigt werden kann. Der Zugriff auf die Elemente per Touch erlaubt, dass sie direkt mit dem Finger an die gewünschte Position im Text gezogen werden können.

Ein Problem, das sich hier jedoch ergibt ist, dass ein Nutzer bereits über einen großen Erfahrungsschatz mit herkömmlichen Autorenwerkzeugen verfügt und seine Arbeitsweise entsprechend angepasst hat. Es ist also schwierig, die potenziellen Vorteile eines solchen Autorenarbeitsplatzes am Curve in einer kurzen Studie zu überprüfen. Die einzige Lösung hierfür ist eine Langzeitstudie, die jedoch einen verlässlichen Prototyp und eine ordentliche Bildqualität voraussetzt. Hinsichtlich der Bildqualität ist besonders die geringe Auflösung des aktuellen Prototyps ein Problem. Sollten diese Probleme durch die fortschreitende technische Entwicklung gelöst werden, könnten die potenziellen Vorteile eines solchen Designs überprüft werden. Hierbei könnten auch spontane Interaktionsmuster der Nutzer am gebogenen Display beobachtet und in zukünftigen Entwicklungen berücksichtigt werden.

Videoschnittplatz

Ein weiteres Anwendungsszenario, das von einem gebogenen, interaktiven Display profitieren könnte, ist die Arbeit an einem Videoschnittplatz. Dieser ist bereits von Haus aus in

unterschiedliche Bereiche aufgeteilt. Sie lassen sich grob in Darstellungsbereiche, die etwa eine Vorschau des aktuellen Videos anzeigen, und interaktive Bereiche mit Werkzeugen unterteilen. Wie schon beim Autorenarbeitsplatz könnten diese Elemente entsprechend ihrer Interaktivität auf dem gebogenen Display aufgeteilt werden. Neben dem Einsatz als Zwischenablage kann die Displaykurve in diesem Szenario außerdem als Zeitstrahl genutzt werden. Die zentrale Position und die Verknüpfung zu beiden planaren Displaybereichen erlaubt dabei die direkte grafische Verbindung von einzelnen Interfaceelementen zum Zeitstrahl. Zusätzlich würde diese Arbeitsumgebung auch von einem Tangible User Interface wie den Vertibles profitieren. Ein professioneller Schnittplatz verfügt über eine Vielzahl physikalischer Kontrollelemente, so dass die Umstellung für den Nutzer durch die Vertibles vereinfacht würde. Die Vorteile eines TUI gegenüber der direkten Interaktion wurden in einem ähnlichen Szenario bereits untersucht (Hancock u. a., 2009b). Da die Vertibles aufgrund ihrer Haftfähigkeit auf beiden planaren Displaybereichen des Curves eingesetzt werden können, besteht zusätzlich die Möglichkeit, ihnen auch je nach Displaybereich unterschiedliche Funktionen zuzuweisen. Während ein Drehregler auf dem horizontalen Bereich also etwa für die Feineinstellung eines Bildfilters eingesetzt wird, spult der Nutzer auf dem vertikalen Bereich mit ihm ein dargestelltes Video vor oder zurück. Hier stellt sich dann die Frage, wie die Zuweisung von Funktionen zu den einzelnen Objekten funktioniert und wie viele Steuerungsobjekte maximal sinnvoll eingesetzt werden können.

LITERATURVERZEICHNIS

- [9241-9 2000] 9241-9, ISO: *Ergonomic Requirements for Work with Visual Display Terminals, Non-keyboard Input Device Requirements*. 2000
- [Ahlström u. a. 1992] AHLSTRÖM, Bengt ; LENMAN, Sören ; MARMOLIN, Thomas: Overcoming Touchscreen User Fatigue by Workplace Design. In: *Posters and Short Talks of the 1992 SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1992 (CHI '92), S. 101–102
- [Allison u. a. 2004] ALLISON, Herman ; FRICKER, Ronald K. ; SMIT, Marthinus C.: *Electro Adhesion Device*. US, 09 2004
- [de Almeida u. a. 2012] ALMEIDA, Rodrigo A. ; PILLIAS, Clément ; PIETRIGA, Emmanuel ; CUBAUD, Pierre: Looking Behind Bezels: French Windows for Wall Displays. In: *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (AVI '12). – ISBN 978–1–4503–1287–5, S. 124–131
- [Arai u. a. 1995] ARAI, Toshifumi ; MACHII, Kimiyoshi ; KUZUNUKI, Soshiro ; SHOJIMA, Hiroshi: InteractiveDESK: A Computer-augmented Desk Which Responds to Operations on Real Objects. In: *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1995 (CHI '95). – ISBN 0–89791–755–3, S. 141–142
- [van Baar u. a. 2002] BAAR, Jeroen van ; RASKAR, Ramesh ; RASKAR, Ramesh ; BAAR, Jeroen ; CHAI, Jin X. ; CHAI, Jin X.: A Low-Cost Projector Mosaic with Fast Registration. In: *Asian Conference on Computer Vision, 2002 (ACCV '02)*
- [Bandyopadhyay u. a. 2001] BANDYOPADHYAY, Deepak ; RASKAR, Ramesh ; FUCHS, Henry: Dynamic Shader Lamps: Painting on Movable Objects. In: *In Proceedings of Int. Symp. On Augmented Reality, 2001*, S. 207–216
- [Barden u. a. 2012] BARDEN, Pollie ; COMBER, Rob ; GREEN, David ; JACKSON, Daniel ; LADHA, Cassim ; BARTINDALE, Tom ; BRYAN-KINNS, Nick ; STOCKMAN, Tony ; OLIVIER, Patrick: Telematic Dinner Party: Designing for Togetherness Through Play and Performance. In: *Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (DIS '12). – ISBN 978–1–4503–1210–3, S. 38–47

- [Baudisch u. a. 2010] BAUDISCH, Patrick ; BECKER, Torsten ; RUDECK, Frederik: Lumino: Tangible Blocks for Tabletop Computers Based on Glass Fiber Bundles. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, 2010, S. 1165–1174
- [Baudisch u. a. 2004] BAUDISCH, Patrick ; CUTRELL, Edward ; HINCKLEY, Ken ; GRUEN, Robert: Mouse Ether: Accelerating the Acquisition of Targets Across Multi-monitor Displays. In: *CHI '04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2004 (CHI EA '04). – ISBN 1–58113–703–6, S. 1379–1382
- [Baudisch u. a. 2001] BAUDISCH, Patrick ; GOOD, Nathaniel ; STEWART, Paul: Focus Plus Context Screens: Combining Display Technology with Visualization Techniques. In: *Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York, NY, USA : ACM, 2001 (UIST '01). – ISBN 1–58113–438–X, S. 31–40
- [Bederson u. a. 1994] BEDERSON, Ben B. ; STEAD, Larry ; HOLLAN, James D.: Pad++: Advances in Multiscale Interfaces. In: *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1994 (CHI '94). – ISBN 0–89791–651–4, 315–316
- [Bederson u. a. 2003] BEDERSON, Benjamin B. ; CLAMAGE, Aaron ; CZERWINSKI, Mary P. ; ROBERTSON, George G.: A Fisheye Calendar Interface for PDAs: Providing Overviews for Small Displays. In: *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2003 (CHI EA '03). – ISBN 1–58113–637–4, S. 618–619
- [Belzner 2011] BELZNER, Lenz: *Druckempfindliche Eingabegeräte auf Interaktiven Oberflächen*, Ludwig-Maximilians-Universität, Projektarbeit, 2011
- [Benko 2009] BENKO, Hrvoje: Beyond Flat Surface Computing: Challenges of Depth-aware and Curved Interfaces. In: *Proceedings of the 17th ACM International Conference on Multimedia*. New York, NY, USA : ACM, 2009 (MM '09). – ISBN 978–1–60558–608–3, 935–944
- [Benko u. Feiner 2007] BENKO, Hrvoje ; FEINER, Steven: Pointer Warping in Heterogeneous Multi-Monitor Environments. In: *Proceedings of Graphics Interface 2007*. New York, NY, USA : ACM, 2007 (GI '07). – ISBN 978–1–56881–337–0, 111–117
- [Benko u. a. 2012] BENKO, Hrvoje ; JOTA, Ricardo ; WILSON, Andrew: MirageTable: Free-hand Interaction on a Projected Augmented Reality Tabletop. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (CHI '12). – ISBN 978–1–4503–1015–4, 199–208
- [Benko u. a. 2009] BENKO, Hrvoje ; MORRIS, Meredith R. ; BRUSH, A. J. B. ; WILSON, Andrew D.: Insights on Interactive Tabletops: A Survey of Researchers and Developers / Microsoft Research. 2009 (MSR-TR-2009-22). – Forschungsbericht

- [Benko u. a. 2008] BENKO, Hrvoje ; WILSON, Andrew D. ; BALAKRISHNAN, Ravin: Sphere: Multi-touch Interactions on a Spherical Display. In: *Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York, NY, USA : ACM, 2008 (UIST '08). – ISBN 978–1–59593–975–3, 77-86
- [Berwein 2011] BERWEIN, Franz: *Pressure-Sensitive Tangible User Interfaces Through Optical Tracking*, Ludwig-Maximilians-Universität, Diplomarbeit, 2011
- [Beyer u. a. 2011] BEYER, Gilbert ; ALT, Florian ; MÜLLER, Jörg ; SCHMIDT, Albrecht ; ISAKOVIC, Karsten ; KLOSE, Stefan ; SCHIEWE, Manuel ; HAULSEN, Ivo: Audience Behavior around Large Interactive Cylindrical Screens. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2011 (CHI '11). – ISBN 978–1–4503–0228–9, 1021-1030
- [Beyer u. Butz 2013] BEYER, Gilbert ; BUTZ, Andreas: Communicating the Interactivity of Differently Shaped Displays. In: *Workshop on Displays Take New Shape: An Agenda for Interactive Surfaces in conjunction with CHI 2013, Paris.*, 2013
- [Beyer u. a. 2009] BEYER, Gilbert ; ISAKOVIC, Karsten ; KLOSE, Stefan: Die Digitale Litfaßsäule als interaktives Werbemedium. In: *Workshop-Proceedings of Mensch & Computer 2009*. Berlin : Logos Verlag, 2009, S. 6–9
- [Bimber u. Emmerling 2006] BIMBER, O. ; EMMERLING, A.: Multifocal Projection: a Multiprojector Technique for Increasing Focal Depth. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 12 (2006), Nr. 4, S. 658–667. <http://dx.doi.org/10.1109/TVCG.2006.75>. – DOI 10.1109/TVCG.2006.75. – ISSN 1077–2626
- [Bimber u. a. 2008] BIMBER, Oliver ; IWAI, Daisuke ; WETZSTEIN, Gordon ; GRUNDHÖFER, Anselm: The Visual Computing of Projector-Camera Systems. In: *Computer Graphics Forum* 27 (2008), Nr. 8, 2219-2245. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8659.2008.01175.x>. – DOI 10.1111/j.1467–8659.2008.01175.x. – ISSN 1467–8659
- [Bimber u. Raskar 2005] BIMBER, Oliver ; RASKAR, Ramesh: *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*. AK Peters/CRC Press, 2005
- [Bitzer u. Slottow 1966] BITZER, D. L. ; SLOTTOW, H. G.: The Plasma Display Panel: A Digitally Addressable Display with Inherent Memory. In: *Proceedings of the November 7-10, 1966, Fall Joint Computer Conference*. New York, NY, USA : ACM, 1966 (AFIPS '66 (Fall)), 541-547
- [Bolt 1980] BOLT, Richard A.: 'Put-that-there': Voice and Gesture at the Graphics Interface. In: *Proceedings of the 7th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA : ACM, 1980 (SIGGRAPH '80). – ISBN 0–89791–021–4, 262-270

- [Boring u. a. 2010] BORING, Sebastian ; BAUR, Dominikus ; BUTZ, Andreas ; GUSTAFSON, Sean ; BAUDISCH, Patrick: Touch Projector: Mobile Interaction Through Video. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (CHI '10). – ISBN 978–1–60558–929–9, 2287-2296
- [Broll u. a. 2000] BROLL, Wolfgang ; MEIER, Eckhard ; SCHARDT, Thomas: The Virtual Round Table - a Collaborative Augmented Multi-user Environment. In: *Proceedings of the Third International Conference on Collaborative Virtual Environments*. New York, NY, USA : ACM, 2000 (CVE '00). – ISBN 1–58113–303–0, S. 39–45
- [Buxton 1997] BUXTON, W.: Living in Augmented Reality: Ubiquitous Media and Reactive Environments. In: FINN, K. (Hrsg.) ; SELLEN, A. (Hrsg.) ; WILBER, S. (Hrsg.): *Video Mediated Communication*. Hillsdale, NJ : Erlbaum, 1997
- [Buxton 1990] BUXTON, William: A Three-state Model of Graphical Input. In: *Proceedings of the IFIP TC13 Third International Conference on Human-Computer Interaction*. Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands : North-Holland Publishing Co., 1990 (INTERACT '90). – ISBN 0–444–88817–9, 449-456
- [Card u. a. 1978] CARD, Stuart K. ; ENGLISH, William K. ; BURR, Betty J.: Evaluation of mouse, rate-controlled isometric joystick, step keys, and text keys for text selection on a CRT. In: *Ergonomics* 21 (1978), Nr. 8, S. 601–613
- [Cham u. a. 2003] CHAM, Tat-Jen ; REHG, J.M. ; SUKTHANKAR, R. ; SUKTHANKAR, G: Shadow Elimination and Occluder Light Suppression for Multi-Projector Displays. In: *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 2003, S. 513–520
- [Chang u. a. 2002] CHANG, Dempsey ; DOOLEY, Laurence ; TUOVINEN, Juhani E.: Gestalt Theory in Visual Screen Design - A New Look at an Old Subject. In: MCDUGALL, Anne (Hrsg.) ; MURNANE, John (Hrsg.) ; CHAMBERS, Dianne (Hrsg.): *WCCE2001 Australian Topics: Selected Papers from the Seventh World Conference on Computers in Education* Bd. 8. Copenhagen, Denmark : ACS, 2002 (CRPIT), S. 5–12
- [Chattoe u. a. 1995] CHATTOE, John ; LEACH, John ; RIESENBAACH, Ron: Ontario Telepresence Project / Information Technology Research Centre, Telecommunications Research Institute of Ontario. 1995. – Forschungsbericht
- [Citrix Online 2010] CITRIX ONLINE: *Virtuelles Arbeiten boomt in deutschen Unternehmen*. http://www.citrixonline.de/fileadmin/user_upload/pdf/citrix/news/press_releases/DE_PR_20101020_Collaboration_Studie.pdf, 10 2010
- [Coldefy u. Louis-dit Picard 2007] COLDEFY, François ; PICARD, Stphane Louis-dit: Di-giTable: an interactive multiuser table for collocated and remote collaboration enabling remote gesture visualization. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007* IEEE, 2007 (CVPR '07), S. 1–8

- [Collomb u. a. 2005] COLLOMB, Maxime ; HASCOËT, Mountaz ; BAUDISCH, Patrick ; LEE, Brian: Improving Drag-and-drop on Wall-size Displays. In: *Proceedings of Graphics Interface 2005*. School of Computer Science, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada : Canadian Human-Computer Communications Society, 2005 (GI '05). – ISBN 1-56881-265-5, 25-32
- [Comiskey u. a. 1998] COMISKEY, Barrett ; ALBERT, JD ; YOSHIZAWA, Hidekazu ; JACOBSON, Joseph: An electrophoretic ink for all-printed reflective electronic displays. In: *Nature* 394 (1998), Nr. 6690, S. 253–255
- [Correa u. a. 2002] CORREA, Carlos ; ZWING, Rainer ; WEITBRUCH, Sebastien ; THEBAULT, Cedric: *Burn-in compensation for plasma display panels*. 2002
- [Crampton Smith 1995] CRAMPTON SMITH, Gillian: The Hand that Rocks the Cradle. In: *ID magazine* (1995), S. 60–65
- [Czerwinski u. a. 2003] CZERWINSKI, Mary ; SMITH, Greg ; REGAN, Tim ; MEYERS, Brian ; ROBERTSON, George ; STARKWEATHER, Gary: Toward Characterizing the Productivity Benefits of Very Large Displays. In: *Proceedings of Human-Computer Interaction INTERACT '03: IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction* Bd. 3, 2003, S. 9–16
- [Dietz u. Leigh 2001] DIETZ, Paul ; LEIGH, Darren: DiamondTouch: A Multi-user Touch Technology. In: *Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York, NY, USA : ACM, 2001 (UIST '01). – ISBN 1-58113-438-X, 219-226
- [Dillon u. Emurian 1996] DILLON, T. W. ; EMURIAN, H.H.: Some Factors Affecting Reports of Visual Fatigue Resulting From Use of a VDU. In: *Computers in Human Behavior* 12(1) (1996), S. 49–59
- [DIN 33402-2 2005] DIN 33402-2: *Ausgabe:2005-12 'Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte; Deutsche Fassung*. 2005 (Deutsche Norm)
- [DIN EN 527-1 2000] DIN EN 527-1: *Ausgabe:2000-07 Büromöbel - Büro-Arbeitstische - Teil 1: Maße; Deutsche Fassung*. 2000
- [Donelson 1978] DONELSON, William C.: Spatial Management of Information. In: *SIGGRAPH Computer Graphics* 12 (1978), August, Nr. 3, 203-209. <http://dx.doi.org/10.1145/965139.807391>. – DOI 10.1145/965139.807391. – ISSN 0097-8930
- [Douglas u. a. 1999] DOUGLAS, Sarah A. ; KIRKPATRICK, Arthur E. ; MACKENZIE, I. S.: Testing Pointing Device Performance and User Assessment with the ISO 9241, Part 9 Standard. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1999 (CHI '99). – ISBN 0-201-48559-1, 215-222

- [Drewes 2010] DREWES, Heiko: Only One Fitts' Law Formula Please! In: *CHI EA '10: Proceedings of the 28th of the international conference extended abstracts on Human factors in computing systems*. New York, NY, USA : ACM, 2010. – ISBN 978–1–60558–930–5, S. 2813–2822
- [Elliott u. Hearst 2000] ELLIOTT, Ame ; HEARST, Marti A.: How Large Should a Digital Desk Be?: Qualitative Results of a Comparative Study. In: *CHI '00 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2000 (CHI EA '00). – ISBN 1–58113–248–4, 165-166
- [Elrod u. a. 1992] ELROD, Scott ; BRUCE, Richard ; GOLD, Rich ; GOLDBERG, David ; HALASZ, Frank ; JANSSEN, William ; LEE, David ; MCCALL, Kim ; PEDERSEN, Elin ; PIER, Ken ; TANG, John ; WELCH, Brent: Liveboard: a Large Interactive Display Supporting Group Meetings, Presentations, and Remote Collaboration. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1992 (CHI '92). – ISBN 0–89791–513–5, 599-607
- [Fitts 1954] FITTS, P. M.: The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement. In: *Journal of Experimental Psychology* 47 (1954), Juni, Nr. 6, 381-391. <http://view.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/13174710>. – ISSN 0022–1015
- [Fitzmaurice u. a. 1995] FITZMAURICE, George W. ; ISHII, Hiroshi ; BUXTON, William A. S.: Bricks: Laying the Foundations for Graspable User Interfaces. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1995 (CHI '95). – ISBN 0–201–84705–1, 442-449
- [Foley u. a. 1984] FOLEY, James D. ; WALLACE, Victor L. ; CHAN, Peggy: The human factors of computer graphics interaction techniques. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 4 (1984), November, Nr. 11, 13-48. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2347.2348>. – ISSN 0272–1716
- [Forlines u. a. 2007] FORLINES, Clifton ; WIGDOR, Daniel ; SHEN, Chia ; BALAKRISHNAN, Ravin: Direct-Touch vs. Mouse Input for Tabletop Displays. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2007 (CHI '07). – ISBN 978–1–59593–593–9, 647-656
- [Forschungsvereinigung Automobiltechnik 1995] FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK: *FAT-Bericht 123: RAMSIS - ein System zur Erhebung und Vermessung dreidimensionaler Körperhaltungen von Menschen zur ergonomischen Auslegung von Bedien- und Sitzplätzen im Auto*. http://www.vda.de/de/publikationen/publikationen_downloads/detail.php?id=823. Version: September 1995
- [Furnas u. Bederson 1995] FURNAS, George W. ; BEDERSON, Benjamin B.: Space-scale Diagrams: Understanding Multiscale Interfaces. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1995 (CHI '95). – ISBN 0–201–84705–1, 234-241

- [Geisler u. Stiefelhagen 2010] GEISLER, Jürgen ; STIEFELHAGEN, R: Eröffnung des 'Smart Control Room'-Labors: Forschen mit dem Smart Control Room. In: GEISLER, J. (Hrsg.) ; BEYERER, J. (Hrsg.): *Mensch-Maschine-Systeme: wissenschaftliches Kolloquium*, 5. März 2009, Fraunhofer IITB, Universitätsverlag Karlsruhe, 2010, pages 81-82
- [Geißler 1998] GEISSLER, Jörg: Shuffle, Throw or Take It! Working Efficiently with an Interactive Wall. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1998 (CHI '98). – ISBN 1-58113-028-7, 265-266
- [Gergle u. a. 2004] GERGLE, Darren ; KRAUT, Robert E. ; FUSSELL, Susan R.: Language Efficiency and Visual Technology Minimizing Collaborative Effort with Visual Information. In: *Journal of Language and Social Psychology* 23 (2004), Nr. 4, S. 491-517
- [Grabs 2010] GRABS, Stefan: *Tangibles on vertical interactive surfaces*, Ludwig-Maximilians-Universität, Bachelorarbeit, 2010
- [Grossman u. Balakrishnan 2004] GROSSMAN, Tovi ; BALAKRISHNAN, Ravin: Pointing at Trivariate Targets in 3D Environments. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2004 (CHI '04). – ISBN 1-58113-702-8, 447-454
- [Grudin 2001] GRUDIN, Jonathan: Partitioning Digital Worlds: Focal and Peripheral Awareness in Multiple Monitor Use. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2001 (CHI '01). – ISBN 1-58113-327-8, 458-465
- [Guiard 1987] GUIARD, Yves: Asymmetric Division of Labor in Human Skilled Bimanual Action: The Kinematic Chain as a Model. In: *Journal of Motor Behavior* 19 (1987), 486-517. <http://cogprints.org/625/>
- [Han 2005] HAN, Jefferson Y.: Low-cost Multi-touch Sensing Through Frustrated Total Internal Reflection. In: *Proceedings of the 18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York, NY, USA : ACM, 2005 (UIST '05). – ISBN 1-59593-271-2, 115-118
- [Hancock u. a. 2009a] HANCOCK, Mark ; HILLIGES, Otmar ; COLLINS, Christopher ; BAUR, Dominikus ; CARPENDALE, Sheelagh: Exploring Tangible and Direct Touch Interfaces for Manipulating 2D and 3D Information on a Digital Table. In: *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. New York, NY, USA : ACM, 2009 (ITS '09). – ISBN 978-1-60558-733-2, 77-84
- [Hancock u. a. 2009b] HANCOCK, Mark ; NACENTA, Miguel ; GUTWIN, Carl ; CARPENDALE, Sheelagh: The Effects of Changing Projection Geometry on the Interpretation of 3D Orientation on Tabletops. In: *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. New York, NY, USA : ACM, 2009 (ITS '09). – ISBN 978-1-60558-733-2, 157-164

- [Hardy 2012] HARDY, John: Experiences: A Year in the Life of an Interactive Desk. In: *Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (DIS '12). – ISBN 978-1-4503-1210-3, 679-688
- [Hennecke 2013] HENNECKE, Fabian: Erfahrungen aus der Entwicklung eines interaktiven, non-planaren Displays. In: *i-com Themenheft 'Interaktive Oberflächen in Forschung und Praxis' 3* (2013)
- [Hennecke u. a. 2011] HENNECKE, Fabian ; BERWEIN, Franz ; BUTZ, Andreas: Optical Pressure Sensing for Tangible User Interfaces. In: *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. New York, NY, USA : ACM, 2011 (ITS '11). – ISBN 978-1-4503-0871-7, 45-48
- [Hennecke u. a. 2013a] HENNECKE, Fabian ; LUCA, Alexander ; NGUYEN, NgoDieuHuong ; BORING, Sebastian ; BUTZ, Andreas: Investigating Pointing Tasks across Angularly Coupled Display Areas. In: KOTZE, Paula P. (Hrsg.) ; MARSDEN, Gary (Hrsg.) ; LINDGAARD, Gitte (Hrsg.) ; WESSON, Janet (Hrsg.) ; WINCKLER, Marco (Hrsg.): *Human-Computer Interaction - INTERACT 2013* Bd. 8117. Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-40482-5, S. 720-727
- [Hennecke u. a. 2012a] HENNECKE, Fabian ; MATZKE, Wolfgang ; BUTZ, Andreas: How Screen Transitions Influence Touch and Pointer Interaction Across Angled Display Arrangements. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (CHI '12). – ISBN 978-1-4503-1015-4, 209-212
- [Hennecke u. a. 2013b] HENNECKE, Fabian ; VOELKER, Simon ; SCHENK, Maximilian ; SCHAPER, Hauke ; BORCHERS, Jan ; BUTZ, Andreas: Simplifying Remote Collaboration through Spatial Mirroring. In: KOTZE, Paula (Hrsg.) ; MARSDEN, Gary (Hrsg.) ; LINDGAARD, Gitte (Hrsg.) ; WESSON, Janet (Hrsg.) ; WINCKLER, Marco (Hrsg.): *Human-Computer Interaction - INTERACT 2013* Bd. 8119. Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-40476-4, S. 624-631
- [Hennecke u. a. 2013c] HENNECKE, Fabian ; VÖLKER, Simon ; SCHENK, Maximilian ; SCHAPER, Hauke ; BORCHERS, Jan ; BUTZ, Andreas: *PerspectiveTable: Blending Physical and Virtual Collaborative Workspaces*. Workshop 'Blended Interaction: Envisioning Future Collaborative Interactive Spaces'. In conjunction with the ACM Conference on Computer-Human Interaction 2013 (CHI), 2013
- [Hennecke u. a. 2012b] HENNECKE, Fabian ; WIMMER, Raphael ; VODICKA, Eduard ; BUTZ, Andreas: Vertibles: Using Vacuum Self-adhesion to Create a Tangible User Interface for Arbitrary Interactive Surfaces. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (TEI '12). – ISBN 978-1-4503-1174-8, 303-306

- [Hereld u. a. 2000] HERELD, M. ; JUDSON, I.R. ; STEVENS, R.L.: Introduction to Building Projection-based Tiled Display System. In: *Computer Graphics and Applications, IEEE* 20 (2000), Nr. 4, S. 22–28. <http://dx.doi.org/10.1109/38.851746>. – DOI 10.1109/38.851746. – ISSN 0272–1716
- [Hilliges u. a. 2009] HILLIGES, Otmar ; IZADI, Shahram ; WILSON, Andrew D. ; HODGES, Steve ; GARCIA-MENDOZA, Armando ; BUTZ, Andreas: Interactions in the Air: Adding Further Depth to Interactive Tabletops. In: *Proceedings of the 22Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York, NY, USA : ACM, 2009 (UIST '09). – ISBN 978–1–60558–745–5, 139-148
- [Hilliges u. a. 2008] HILLIGES, Otmar ; KIM, David ; IZADI, Shahram: Creating Malleable Interactive Surfaces Using Liquid Displacement Sensing. In: *Proceedings of 3rd IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human Computer Systems IEEE, 2008 (Tabletop '08)*, S. 157–160
- [Hinckley u. a. 2004] HINCKLEY, Ken ; RAMOS, Gonzalo ; GUIMBRETIERE, Francois ; BAUDISCH, Patrick ; SMITH, Marc: Stitching: Pen Gestures That Span Multiple Displays. In: *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*. New York, NY, USA : ACM, 2004 (AVI '04). – ISBN 1–58113–867–9, 23-31
- [Holman u. Vertegaal 2008] HOLMAN, David ; VERTEGAAL, Roel: Organic User Interfaces: Designing Computers in Any Way, Shape, or Form. In: *Communications of the ACM* 51 (2008), Juni, Nr. 6, 48-55. <http://dx.doi.org/10.1145/1349026.1349037>. – DOI 10.1145/1349026.1349037. – ISSN 0001–0782
- [HoloPro 2013] HOLOPRO: *What is the difference between front and rear projection?* <http://www.holopro.com/>, 11 2013
- [Hösl 2012] HÖSL, Axel: *Katastrophenschutz am Curve*, Ludwig-Maximilians-Universität, Projektarbeit, 2012
- [Hösl 2013] HÖSL, Axel: *Promoting Stress-Resistance - Catastrophe Management using a Curved Display*, Ludwig-Maximilians-Universität, Diplomarbeit, 2013
- [Imaz u. Benyon 2007] IMAZ, M. ; BENYON, D.: *Designing With Blends: Conceptual Foundations of Human-computer Interaction And Software Engineering*. MIT Press, 2007 <http://books.google.de/books?id=TudQAAAAMAAJ>. – ISBN 9780262090421
- [Ishii u. Kobayashi 1992] ISHII, Hiroshi ; KOBAYASHI, Minoru: ClearBoard: A Seamless Medium for Shared Drawing and Conversation with Eye Contact. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1992 (CHI '92). – ISBN 0–89791–513–5, 525-532

- [Ishii u. Miyake 1991] ISHII, Hiroshi ; MIYAKE, Naomi: Toward an Open Shared Workspace: Computer and Video Fusion Approach of TeamWorkStation. In: *Communications of the ACM* 34 (1991), Dezember, Nr. 12, 37-50. <http://dx.doi.org/10.1145/125319.125321>. – DOI 10.1145/125319.125321. – ISSN 0001-0782
- [Ishii u. Ullmer 1997] ISHII, Hiroshi ; ULLMER, Brygg: Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces Between People, Bits and Atoms. In: *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1997 (CHI '97). – ISBN 0-89791-802-9, 234-241
- [Jacob u. a. 2002] JACOB, Robert J. K. ; ISHII, Hiroshi ; PANGARO, Gian ; PATTEN, James: A Tangible Interface for Organizing Information Using a Grid. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2002 (CHI '02). – ISBN 1-58113-453-3, 339-346
- [Jansen u. a. 2012] JANSEN, Yvonne ; DRAGICEVIC, Pierre ; FEKETE, Jean-Daniel: Tangible Remote Controllers for Wall-size Displays. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (CHI '12). – ISBN 978-1-4503-1015-4, 2865-2874
- [Jarvis 1997] JARVIS, Kevin: Real Time 60Hz Distortion Correction on a Silicon Graphics IG. In: *Real Time Graphics* 5 (1997), Nr. 7, S. 6-7
- [Johnson u. Fryberger 1972] JOHNSON, R. ; FRYBERGER, D.: *Touch Actuable Data Input Panel Assembly*. 1972
- [Jordà u. a. 2007] JORDÀ, Sergi ; GEIGER, Günter ; ALONSO, Marcos ; KALTENBRUNNER, Martin: The reacTable: Exploring the Synergy Between Live Music Performance and Tabletop Tangible Interfaces. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction*. New York, NY, USA : ACM, 2007 (TEI '07). – ISBN 978-1-59593-619-6, 139-146
- [Jordà u. a. 2005] JORDÀ, Sergi ; KALTENBRUNNER, Martin ; GEIGER, Günter ; BENCINA, Ross: The reacTable*. In: *Proceedings of the international computer music conference (ICMC 2005), Barcelona, Spain, 2005*, S. 579-582
- [Takehi u. a. 2008] TAKEHI, Yasuaki ; JO, Kensei ; SATO, Katsunori ; MINAMIZAWA, Kou-ta ; NII, Hideaki ; KAWAKAMI, Naoki ; NAEMURA, Takeshi ; TACHI, Susumu: ForceTile: Tabletop Tangible Interface with Vision-based Force Distribution Sensing. In: *ACM SIGGRAPH 2008 New Tech Demos*. New York, NY, USA : ACM, 2008 (SIGGRAPH '08), 17:1-17:1
- [Kaltenbrunner u. Bencina 2007] KALTENBRUNNER, Martin ; BENCINA, Ross: reacTIVision: A Computer-vision Framework for Table-based Tangible Interaction. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction*. New York, NY, USA : ACM, 2007 (TEI '07). – ISBN 978-1-59593-619-6, 69-74

- [Kawamoto 2002] KAWAMOTO, Hirohisa: The History of Liquid-Crystal Displays. In: *Proceedings of the IEEE 90* (2002), Nr. 4, S. 460–500
- [Kim u. Dey 2009] KIM, SeungJun ; DEY, Anind K.: Simulated augmented reality windsheld display as a cognitive mapping aid for elder driver navigation. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2009 (CHI '09). – ISBN 978–1–60558–246–7, 133–142
- [Klemmer u. a. 2001] KLEMMER, Scott R. ; NEWMAN, Mark W. ; FARRELL, Ryan ; BILEZIKJIAN, Mark ; LANDAY, James A.: The Designers' Outpost: A Tangible Interface for Collaborative Web Site. In: *Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York, NY, USA : ACM, 2001 (UIST '01). – ISBN 1–58113–438–X, 1-10
- [Kobayashi u. a. 2007] KOBAYASHI, Kazue ; KAKIZAKI, Tatsuhito ; NARITA, Atsunobu ; HIRANO, Mitsunori ; KASE, Ichiro: Tangible User Interface for Supporting Disaster Education. In: *ACM SIGGRAPH 2007 Posters*. New York, NY, USA : ACM, 2007 (SIGGRAPH '07). – ISBN 978–1–4503–1828–0
- [Krueger 1977] KRUEGER, Myron W.: Responsive Environments. In: *Proceedings of the National Computer Conference*. New York, NY, USA : ACM, 1977 (AFIPS '77), 423-433
- [Kruger u. a. 2004] KRUGER, Russell ; CARPENDALE, Sheelagh ; SCOTT, StaceyD. ; GREENBERG, Saul: Roles of Orientation in Tabletop Collaboration: Comprehension, Coordination and Communication. In: *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)* 13 (2004), Nr. 5-6, 501-537. <http://dx.doi.org/10.1007/s10606-004-5062-8>. – DOI 10.1007/s10606-004-5062-8. – ISSN 0925–9724
- [Kunz 2010] KUNZ, Melanie: *Evaluation von Knete als Material für Prototyping von non-planaren interaktiven Oberflächen*, Ludwig-Maximilians-Universität, Projektarbeit, 2010
- [Laerhoven u. a. 2002] LAERHOVEN, Kristof V. ; SCHMIDT, Albrecht ; GELLERSEN, Hans-Werner: Pin&Play: Networking Objects through Pins. In: *Proceedings of the 4th international conference on Ubiquitous Computing*. London, UK, UK : Springer, 2002 (UbiComp '02). – ISBN 3–540–44267–7, 219-228
- [Lang 2010] LANG, Alexander: *Extending the Window Manager for Novel Interaction Techniques*, Ludwig-Maximilians-Universität, Projektarbeit, 2010
- [Lange u. Windel 2008] LANGE, Wolfgang ; WINDEL, Armin: *Kleine Ergonomische Datensammlung*. TÜV Media GmbH, 2008
- [Lanier 2001] LANIER, Jaron: Virtually There. In: *Scientific American* 284 (2001), Nr. 4, S. 66–75
- [Lauber 2011] LAUBER, Felix: *Das Curve Display in Leitstand-Arbeitsumgebungen: Entwicklung eines Visualisierungs- und Interaktionskonzepts*, Ludwig-Maximilians-Universität, Diplomarbeit, 2011

- [Laufs u. a. 2010] LAUFS, Uwe ; RUFF, Christopher ; ZIBUSCHKA, Jan: *MT4j-A Cross-platform Multi-touch Development Framework*. Presented at the workshop 'Engineering patterns for multi-touch interfaces' in conjunction with the ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems 2010 (EICS), 2010
- [Lee u. Kim 2006] LEE, Jangho ; KIM, Jee-In: u-Table: A Tabletop Interface for Multiple Users. In: *Proceedings of the 6th international conference on Computational Science and Its Applications*, Springer, 2006 (ICCSA '06). – ISBN 3-540-34070-X, 978-3-540-34070-6, S. 983-992
- [Leitner u. Haller 2011] LEITNER, Jakob ; HALLER, Michael: Geckos: Combining Magnets and Pressure Images to Enable New Tangible-object Design and Interaction. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2011 (CHI '11). – ISBN 978-1-4503-0228-9, 2985-2994
- [Lin u. a. 2009] LIN, Jin-Yao ; CHEN, Yen-Yu ; KO, Ju-Chun ; KAO, HuiShan ; CHEN, Wei-Han ; TSAI, Tsun-Hung ; HSU, Su-Chu ; HUNG, Yi-Ping: i-m-Tube: An Interactive Multi-resolution Tubular Display. In: *Proceedings of the 17th ACM International Conference on Multimedia*. New York, NY, USA : ACM, 2009 (MM '09). – ISBN 978-1-60558-608-3, 253-260
- [Lins 2010] LINS, Corinna: *Evaluation von Gips als Material für Prototyping von non-planaren interaktiven Oberflächen*, Ludwig-Maximilians-Universität, Bachelorarbeit, 2010
- [Lorenz u. a. 2008] LORENZ, Haik ; TRAPP, Matthias ; JOBST, Markus ; DÖLLNER, Jürgen: Interactive Multi-Perspective Views of Virtual 3D Landscape and City Models. In: *11th AGILE International Conference on GI Science*, Springer, 2008 (Lecture Notes in Geoinformation and Cartography), S. 301-321
- [MacKenzie u. Buxton 1994] MACKENZIE, I ; BUXTON, William: The Prediction of Pointing and Dragging Times in Graphical User Interfaces. In: *Interacting with Computers* 6 (1994), Nr. 2, S. 213-227
- [MacKenzie u. Buxton 1992] MACKENZIE, I. S. ; BUXTON, William: Extending Fitts' Law to Two-Dimensional Tasks. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1992 (CHI '92). – ISBN 0-89791-513-5, 219-226
- [MacKenzie u. a. 1991] MACKENZIE, I. S. ; SELLEN, Abigail ; BUXTON, William A. S.: A Comparison of Input Devices in Element Pointing and Dragging Tasks. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1991 (CHI '91). – ISBN 0-89791-383-3, 161-166
- [Marquardt u. a. 2009] MARQUARDT, Nicolai ; NACENTA, Miguel A. ; YOUNG, James E. ; CARPENDALE, Sheelagh ; GREENBERG, Saul ; SHARLIN, Ehud: The Haptic Tabletop

- Puck: Tactile Feedback for Interactive Tabletops. In: *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. New York, NY, USA : ACM, 2009 (ITS '09). – ISBN 978–1–60558–733–2, 85-92
- [Matsushita u. a. 2004] MATSUSHITA, Mitsunori ; IIDA, Makoto ; OHGURO, Takeshi ; SHIRAI, Yoshinari ; KAKEHI, Yasuaki ; NAEMURA, Takeshi: Lumisight Table: A Face-to-face Collaboration Support System That Optimizes Direction of Projected Information to Each Stakeholder. In: *Proceedings of the 2004 ACM conference on Computer supported cooperative work*. New York, NY, USA : ACM, 2004 (CSCW '04). – ISBN 1–58113–810–5, 274-283
- [Matsushita u. Rekimoto 1997] MATSUSHITA, Nobuyuki ; REKIMOTO, Jun: HoloWall: Designing a Finger, Hand, Body, and Object Sensitive Wall. In: *ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 1997, S. 209–210
- [Matzke 2011] MATZKE, Wolfgang: *Blending horizontal and vertical surfaces: Effects on touch and pointer interaction*, Ludwig-Maximilians-Universität, Diplomarbeit, 2011
- [Mercator 1569] MERCATOR, Gerhard: *Nova et aucta orbis terrae descriptio ad usum navigantium emendate accomodata*. 1569
- [Micire u. a. 2007] MICIRE, Mark ; SCHEDLBAUER, Martin ; YANCO, Holly A.: Horizontal Selection: An Evaluation of a Digital Tabletop Input Device. In: *Proceedings of the Thirteenth Americas Conference on Information Systems*, Association for Information Systems, 2007 (AMCIS '07)
- [Microsoft 2008] MICROSOFT: *Microsoft DigiDesk - der Produktionsarbeitsplatz der Zukunft*. <http://download.microsoft.com/download/6/2/b/62b55730-fd4c-4229-bcaf-77311e22c42a/4-Factsheet%20DigiDesk.pdf>.
Version: 2008
- [Minsky 1980] MINSKY, Marvin: Telepresence. In: *OMNI* (1980)
- [Monmonier 2010] MONMONIER, Mark: *Rhumb Lines and Map Wars: A Social History of the Mercator Projection*. University of Chicago Press, 2010
- [Morris u. a. 2007] MORRIS, Meredith R. ; BRUSH, A. J. B. ; MEYERS, Brian R.: Reading Revisited: Evaluating the Usability of Digital Display Surfaces for Active Reading Tasks. In: *In Proc. of IEEE TABLETOP 2007*, 2007, S. 79–86
- [Morris u. a. 2008] MORRIS, Meredith R. ; BRUSH, A. J. B. ; MEYERS, Brian R.: A Field Study of Knowledge Workers' Use of Interactive Horizontal Displays. In: *Proceedings of IEEE TABLETOP 2008*, 2008. – ISBN 1–59593–271–2, 113–120
- [Morris u. a. 2010] MORRIS, Meredith R. ; LOMBARDO, Jarrod ; WIGDOR, Daniel: WeSearch: Supporting Collaborative Search and Sensemaking on a Tabletop Display. In: *Proceedings of the 2010 ACM conference on Computer supported cooperative work*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (CSCW '10). – ISBN 978–1–60558–795–0, 401-410

- [Moyle u. Cockburn 2002] MOYLE, Michael ; COCKBURN, Andy: Analysing Mouse and Pen Flick Gestures. In: *Proceedings of the SIGCHI-NZ Symposium on Computer-Human Interaction*. New York, NY, USA : ACM, 2002 (CHINZ '02). – ISBN 0-473-08500-3, S. 19-24
- [Nakajima u. a. 2010] NAKAJIMA, Kosuke ; ITOH, Yuichi ; YOSHIDA, Ai ; TAKASHIMA, Kazuki ; KITAMURA, Yoshifumi ; KISHINO, Fumio: FuSA2 Touch Display. In: *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (SIGGRAPH '10). – ISBN 978-1-4503-0392-7, 11:1-11:1
- [Nebe u. a. 2011] NEBE, Karsten ; KLOMPMAKER, Florian ; JUNG, Helge ; FISCHER, Holger: Exploiting New Interaction Techniques for Disaster Control Management Using Multitouch-, Tangible- and Pen-Based-Interaction. In: *Human-Computer Interaction, Part II*. Springer, 2011 (HCII 2011). – ISBN 978-3-642-21604-6, S. 100-109
- [Nestler u. a. 2008] NESTLER, S. ; ECHTLER, F. ; DOLLINGER, A. ; KLINKER, G.: Collaborative problem solving on mobile hand-held devices and stationary multi-touch interfaces. In: *Workshop on designing multi-touch interaction techniques for coupled public and private displays*, 2008
- [Newman u. Wellner 1992] NEWMAN, William ; WELLNER, Pierre: A Desk Supporting Computer-based Interaction with Paper Documents. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1992 (CHI '92). – ISBN 0-89791-513-5, 587-592
- [Nguyen 2012] NGUYEN, Ngo Dieu H.: *Fitts Law on Vertically Curved Displays*, Ludwig-Maximilians-Universität, Bachelorarbeit, 2012
- [Oetjen u. Ziefle 2009] OETJEN, S. ; ZIEFLE, Martina: A visual ergonomic evaluation of different screen types and screen technologies with respect to discrimination performance. In: *Applied Ergonomics* 40(1) (2009), S. 69-81
- [Paelke u. a. 2012] PAELKE, Volker ; NEBE, Karsten ; GEIGER, Christian ; KLOMPMAKER, Florian ; FISCHER, Holger: Designing Multi-Modal Map-Based Interfaces for Disaster Management. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions*, IARIA, 2012 (ACHI '12), S. 95-100
- [Palleis u. a. 2013] PALLEIS, Henri ; HENNECKE, Fabian ; HOESL, Axel ; HUSSMANN, Heinrich: Designing for Expert Users on a Large Non-standard Display. In: *In Proceedings of the ACM SIGCHI Interactive Tabletops and Surfaces 2013 Conference (ITS '13)*. St. Andrews, Scotland, October 6-9 2013., 2013
- [Paradiso u. a. 2002] PARADISO, Joseph A. ; LEO, Che K. ; CHECKA, Nisha ; HSIAO, Kaijen: Passive Acoustic Knock Tracking for Interactive Windows. In: *CHI '02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2002 (CHI EA '02). – ISBN 1-58113-454-1, 732-733

- [Patten u. a. 2001] PATTEN, James ; ISHII, Hiroshi ; HINES, Jim ; PANGARO, Gian: Sensetable: A Wireless Object Tracking Platform for Tangible User Interfaces. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2001 (CHI '01). – ISBN 1–58113–327–8, 253-260
- [Pedersen u. Hornbæk 2012] PEDERSEN, Esben W. ; HORNBÆK, Kasper: 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*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (NordCHI '12). – ISBN 978–1–4503–1482–4, 370-379
- [Peinsipp-Byma u. a. 2007] PEINSIPP-BYMA, Elisabeth ; ECK, Ralf ; BADER, Thomas ; GEISLER, Jürgen: Teamarbeit am Digitalen Lagetisch mit Fovea-Tablett. In: *MMI-Interaktiv Nr. 12, April 2007* 12 (2007), S. 36–42
- [Pickering 1986] PICKERING, J.A.: Touch-sensitive screens: the technologies and their application. In: *International Journal of Man-Machine Studies* 25 (1986), Nr. 3, 249-269. [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7373\(86\)80060-8](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7373(86)80060-8). – DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7373\(86\)80060-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7373(86)80060-8). – ISSN 0020–7373
- [Po u. a. 2004] PO, Barry A. ; FISHER, Brian D. ; BOOTH, Kellogg S.: Mouse and Touchscreen Selection in the Upper and Lower Visual Fields. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2004 (CHI '04). – ISBN 1–58113–702–8, 359-366
- [Pralhad u. a. 2008] PRAHLAD, H. ; PELRINE, R. ; STANFORD, S. ; MARLOW, J. ; KORNBLUH, R.: Electroadhesive Robots - Wall Climbing Robots Enabled By a Novel, Robust, and Electrically Controllable Adhesion Technology. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008*, 2008 (ICRA 2008). – ISSN 1050–4729, S. 3028–3033
- [Psihogios u. a. 2001] PSIHOGIOS, Jennie P. ; SOMMERICH, Carolyn M. ; MIRKA, Gary A. ; MOON, Samuel D.: A field evaluation of monitor placement effects in VDT users. In: *Applied Ergonomics* 32(4) (2001), Nr. 4, 313-325. [http://dx.doi.org/10.1016/S0003-6870\(01\)00014-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0003-6870(01)00014-X). – DOI 10.1016/S0003–6870(01)00014–X. – ISSN 0003–6870
- [Ragutt 2010] RAGUTT, Corinna: *Evaluation von Papier als Material für Prototyping von non-planaren interaktiven Oberflächen*, Ludwig-Maximilians-Universität, Projektarbeit, 2010
- [Ramos u. a. 2004] RAMOS, Gonzalo ; BOULOS, Matthew ; BALAKRISHNAN, Ravin: Pressure Widgets. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2004 (CHI '04). – ISBN 1–58113–702–8, 487-494
- [Raskar u. a. 2003] RASKAR, Ramesh ; BAAR, Jeroen van ; BEARDSLEY, Paul ; WILLWACHER, Thomas ; RAO, Srinivas ; FORLINES, Clifton: iLamps: Geometrically Aware and

- Self-Configuring Projectors. In: *ACM SIGGRAPH 2003 Papers*. New York, NY, USA : ACM, 2003 (SIGGRAPH '03). – ISBN 1–58113–709–5, 809-818
- [Raskar u. a. 1998] RASKAR, Ramesh ; WELCH, Greg ; CUTTS, Matt ; LAKE, Adam ; STEIN, Lev ; FUCHS, Henry: The office of the future: a unified approach to image-based modeling and spatially immersive displays. In: *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA : ACM, 1998 (SIGGRAPH '98). – ISBN 0–89791–999–8, 179–188
- [Reetz u. a. 2006] REETZ, Adrian ; GUTWIN, Carl ; STACH, Tadeusz ; NACENTA, Miguel ; SUBRAMANIAN, Sriram: Superflick: a natural and efficient technique for long-distance object placement on digital tables. In: *Proceedings of Graphics Interface 2006*. Toronto, Ont., Canada, Canada : Canadian Information Processing Society, 2006 (GI '06). – ISBN 1–56881–308–2, 163–170
- [Reinitzer 1888] REINITZER, Friedrich: *Beiträge zur Kenntniss des Cholesterins*. Wiener Monatsh. Chemie 9, 1888
- [Rekimoto 2002] REKIMOTO, Jun: SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2002 (CHI '02). – ISBN 1–58113–453–3, 113–120
- [Rekimoto u. a. 2001] REKIMOTO, Jun ; ULLMER, Brygg ; OBA, Haruo: DataTiles: A Modular Platform for Mixed Physical and Graphical Interactions. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2001 (CHI '01). – ISBN 1–58113–327–8, 269-276
- [Rettig 1994] RETTIG, Marc: Prototyping for Tiny Fingers. In: *Communications of the ACM* 37 (1994), Nr. 4, S. 21–27
- [Robertson u. a. 2005] ROBERTSON, George ; CZERWINSKI, Mary ; BAUDISCH, Patrick ; MEYERS, Brian ; ROBBINS, Daniel ; SMITH, Greg ; TAN, Desney: The Large-Display User Experience. In: *Computer Graphics and Applications, IEEE* 25 (2005), Nr. 4, S. 44–51
- [Rosco 2009] ROSCO: Rosco Guide to Projection Screens. http://www.rosco.com/litreq/catalogs/Rosco_Projection_Screen.pdf, 2009. – Forschungsbericht. – aufgerufen am 14.05.2013
- [Roth 1982] ROTH, Scott D.: Ray casting for modeling solids. In: *Computer Graphics and Image Processing* 18 (1982), Nr. 2, S. 109–144
- [Roudaut u. a. 2011] ROUDAUT, Anne ; POHL, Henning ; BAUDISCH, Patrick: Touch input on curved surfaces. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2011 (CHI '11). – ISBN 978–1–4503–0228–9, 1011–1020

- [Sadagic u. a. 2001] SADAGIC, Amela ; TOWLES, Herman ; HOLDEN, Loring ; DANIILIDIS, Kostas ; ZELEZNIK, Bob: Tele-immersion portal: Towards an ultimate synthesis of computer graphics and computer vision systems. In: *Proceedings of 4th International Workshop on Presence*, 2001 (PRESENCE 2001)
- [Sasangohar u. a. 2009] SASANGO HAR, Farzan ; MACKENZIE, I S. ; SCOTT, Stacey D.: Evaluation of mouse and touch input for a tabletop display using Fitts' reciprocal tapping task. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* Bd. 53 SAGE Publications, 2009, S. 839–843
- [Schenk 2012a] SCHENK, Maximilian: *Perspective Table - Kollaboratives Arbeiten auf gebogenen Displays*, Ludwig-Maximilians-Universität, Diplomarbeit, 2012
- [Schenk 2012b] SCHENK, Maximilian: *Remote Collaboration am Curve*, Ludwig-Maximilians-Universität, Projektarbeit, 2012
- [Schober 1993] SCHÖBER, Michael F.: Spatial perspective-taking in conversation. In: *Cognition* 47 (1993), Nr. 1, S. 1–24
- [Schöning u. a. 2008] SCHÖNING, Johannes ; BRANDL, Peter ; DAIBER, Florian ; ECHTLER, Florian ; HILLIGES, Otmar ; HOOK, Jonathan ; LÖCHTEFELD, Markus ; MOTALMEDI, Nima ; MULLER, Laurence ; OLIVIER, Patrick ; ROTH, Tim ; ZADOW, Ulrich von: Multi-Touch Surfaces: A Technical Guide / University of Munich (TUM). Version: 2008. <http://drehscheibe.in.tum.de/forschung/pub/reports/2008/TUM-I0833.pdf>. gz. 2008. – techreport. – 19 S.
- [Schulz 2010] SCHULZ, Florian: *Design and Implementation of a Curved Multi-Touch Desktop*, Ludwig-Maximilians-Universität, Diplomarbeit, 2010
- [Schulze 2003] SCHULZE, M.: A new monotonic and clone-independent single-winner election method. In: *Voting Matters* 17 (2003), S. 9–19
- [Schwarz u. a. 2012] SCHWARZ, Tobias ; HENNECKE, Fabian ; LAUBER, Felix ; REITERER, Harald: Perspective+detail: a visualization technique for vertically curved displays. In: *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (AVI '12). – ISBN 978–1–4503–1287–5, 485–488
- [Sears 1991] SEARS, Andrew: Improving touchscreen keyboards: design issues and a comparison with other devices. In: *Interacting with computers* 3 (1991), Nr. 3, S. 253–269
- [Shen u. a. 2006] SHEN, C. ; RYALL, K. ; FORLINES, C. ; ESENTER, A. ; VERNIER, F.D. ; EVERITT, K. ; WU, M. ; WIGDOR, D. ; MORRIS, M.R. ; HANCOCK, M. ; TSE, E.: Informing the Design of Direct-Touch Tabletops. In: *Computer Graphics and Applications, IEEE* 26 (2006), Nr. 5, S. 36–46. <http://dx.doi.org/10.1109/MCG.2006.109>. – DOI 10.1109/MCG.2006.109. – ISSN 0272–1716

- [Sheridon u. Berkovitz 1977] SHERIDON, Nicholas K. ; BERKOVITZ, Michael A.: The Gyricon - A Twisting Ball Display. In: *SID Digest of Technical Papers*, 1977, S. 114–115
- [Soukoreff u. MacKenzie 2004] SOUKOREFF, R. W. ; MACKENZIE, I. S.: 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 (2004), Dezember, Nr. 6, 751-789. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhcs.2004.09.001>. – DOI 10.1016/j.ijhcs.2004.09.001. – ISSN 1071–5819
- [Ståhl u. a. 2002] STÅHL, Olov ; WALLBERG, Anders ; SÖDERBERG, Jonas ; HUMBLE, Jan ; FAHLÉN, Lennart E. ; BULLOCK, Adrian ; LUNDBERG, Jenny: Information exploration using The Pond. In: *Proceedings of the 4th international conference on Collaborative virtual environments*. New York, NY, USA : ACM, 2002 (CVE '02). – ISBN 1–58113–489–4, 72-79
- [Stefik u. a. 1987] STEFIK, Mark ; FOSTER, Gregg ; BOBROW, Daniel G. ; KAHN, Kenneth ; LANNING, Stan ; SUCHMAN, Lucy: Beyond the chalkboard: computer support for collaboration and problem solving in meetings. In: *Communications of the ACM* 30 (1987), Januar, Nr. 1, 32-47. <http://dx.doi.org/10.1145/7885.7887>. – DOI 10.1145/7885.7887. – ISSN 0001–0782
- [Streitz u. a. 1999] STREITZ, Norbert A. ; GEISSLER, Jörg ; HOLMER, Torsten ; KONOMI, Shin'ichi ; MÜLLER-TOMFELDE, Christian ; REISCHL, Wolfgang ; REXROTH, Petra ; SEITZ, Peter ; STEINMETZ, Ralf: i-LAND: an interactive landscape for creativity and innovation. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1999 (CHI '99). – ISBN 0–201–48559–1, 120-127
- [Sukthankar 2005] SUKTHANKAR, R.: Towards Ambient Projection for Intelligent Environments. In: *Computer Vision for Interactive and Intelligent Environment, 2005*, IEEE, 2005, S. 162–172
- [Tang u. VanSlyke 1987] TANG, C. W. ; VANSLYKE, S. A.: Organic electroluminescent diodes. In: *Applied Physics Letters* 51 (1987), Nr. 12, 913-915. <http://dx.doi.org/10.1063/1.98799>. – DOI 10.1063/1.98799
- [Tang u. Minneman 1991] TANG, John C. ; MINNEMAN, Scott: VideoWhiteboard: video shadows to support remote collaboration. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1991 (CHI '91). – ISBN 0–89791–383–3, 315-322
- [Teichert u. a. 2010] TEICHERT, Jens ; HERRLICH, Marc ; WALTHER-FRANKS, Benjamin ; SCHWARTEN, Lasse ; FEIGE, Sebastian ; KRAUSE, Markus ; MALAKA, Rainer: Advancing large interactive surfaces for use in the real world. In: *Advances in Human-Computer Interaction 2010* (2010), Januar, S. 4:1–4:26. – ISSN 1687–5893

- [Tognazzini 1994] TOGNAZZINI, Bruce: The “Starfire“ video prototype project: a case history. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1994 (CHI '94), S. 99–105
- [Tseng u. a. 2011] TSENG, Tiffany ; BRYANT, Coram ; BLIKSTEIN, Paulo: Collaboration through documentation: automated capturing of tangible constructions to support engineering design. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Interaction Design and Children*. New York, NY, USA : ACM, 2011 (IDC '11). – ISBN 978–1–4503–0751–2, 118-126
- [Tuchina 2012] TUCHINA, Anna: *Tangible User Interfaces am Curve*, Ludwig-Maximilians-Universität, Projektarbeit, 2012
- [Ullmer u. Ishii 1997] ULLMER, Brygg ; ISHII, Hiroshi: The metaDESK: models and prototypes for tangible user interfaces. In: *Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology*. New York, NY, USA : ACM, 1997 (UIST '97). – ISBN 0–89791–881–9, 223-232
- [Underkoffler u. Ishii 1999] UNDERKOFFLER, John ; ISHII, Hiroshi: Urp: a luminous-tangible workbench for urban planning and design. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 1999 (CHI '99), S. 386–393
- [Vodicka 2011] VODICKA, Eduard: *Vertibles: Designing Applications for TUIs on Vertical Interactive Surfaces*, Ludwig-Maximilians-Universität, Diplomarbeit, 2011
- [Voelker u. a. 2012] VOELKER, Simon ; SUTTER, Christine ; WANG, Lei ; BORCHERS, Jan: Understanding flicking on curved surfaces. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (CHI '12). – ISBN 978–1–4503–1015–4, 189-198
- [Voelker u. a. 2013] VOELKER, Simon ; WACHARAMANOTHAM, Chat ; BORCHERS, Jan: An Evaluation of State Switching Methods for Indirect Touch Systems. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2013 (CHI '13). – ISBN 978–1–4503–1899–0, 745-754
- [Vogel u. Balakrishnan 2005] VOGEL, Daniel ; BALAKRISHNAN, Ravin: Distant freehand pointing and clicking on very large, high resolution displays. In: *Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology*. New York, NY, USA : ACM, 2005 (UIST '05). – ISBN 1–59593–271–2, 33-42
- [Waldner u. a. 2006] WALDNER, Manuela ; HAUBER, Jörg ; ZAUNER, Jürgen ; HALLER, Michael ; BILLINGHURST, Mark: Tangible tiles: design and evaluation of a tangible user interface in a collaborative tabletop setup. In: *Proceedings of the 18th Australia conference on Computer-Human Interaction: Design: Activities, Artefacts and Environments*. New York, NY, USA : ACM, 2006 (OZCHI '06). – ISBN 1–59593–545–2, 151-158

- [Weiss u. a. 2008] WEISS, Malte ; JENNINGS, Roger ; WAGNER, Julie ; HOLLAN, James D. ; KHOSHABEH, Ramsin ; BORCHERS, Jan: SLAP: Silicone Illuminated Active Peripherals. In: *Extended Abstracts of Horizontal Interactive Human Computer Systems, 2008*, 2008 (Tabletop 2008), S. 37–38
- [Weiss u. a. 2010a] WEISS, Malte ; SCHWARZ, Florian ; JAKUBOWSKI, Simon ; BORCHERS, Jan: Madgets: Actuating Widgets on Interactive Tabletops. In: *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (UIST '10). – ISBN 978–1–4503–0271–5, 293-302
- [Weiss u. a. 2009a] WEISS, Malte ; VOELKER, Simon ; BORCHERS, Jan: BendDesk: Seamless Integration of Horizontal and Vertical Multi-Touch Surfaces in Desk Environments. In: *Adjunct Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. New York, NY, USA : ACM, 2009 (ITS '09). – ISBN 978–1–60558–733–2
- [Weiss u. a. 2010b] WEISS, Malte ; VOELKER, Simon ; SUTTER, Christine ; BORCHERS, Jan: BendDesk: dragging across the curve. In: *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (ITS '10). – ISBN 978–1–4503–0399–6, 1-10
- [Weiss u. a. 2011] WEISS, Malte ; WACHARAMANOTHAM, Chat ; VOELKER, Simon ; BORCHERS, Jan: FingerFlux: near-surface haptic feedback on tabletops. In: *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*. New York, NY, USA : ACM, 2011 (UIST '11). – ISBN 978–1–4503–0716–1, 615-620
- [Weiss u. a. 2009b] WEISS, Malte ; WAGNER, Julie ; JANSEN, Yvonne ; JENNINGS, Roger ; KHOSHABEH, Ramsin ; HOLLAN, James D. ; BORCHERS, Jan: SLAP Widgets: Bridging the Gap Between Virtual and Physical Controls on Tabletops. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2009 (CHI '09), S. 481–490
- [Wellner 1991] WELLNER, Pierre: The DigitalDesk calculator: tangible manipulation on a desk top display. In: *Proceedings of the 4th annual ACM symposium on User interface software and technology*. New York, NY, USA : ACM, 1991 (UIST '91). – ISBN 0–89791–451–1, 27-33
- [Wellner 1993] WELLNER, Pierre: Interacting with paper on the DigitalDesk. In: *Communications of the ACM* 36 (1993), Nr. 7, 87-96. <http://dx.doi.org/10.1145/159544.159630>. – DOI 10.1145/159544.159630. – ISSN 0001–0782
- [Wigdor u. a. 2007a] WIGDOR, Daniel ; PENN, Gerald ; RYALL, Kathy ; ESENTHER, Alan ; SHEN, Chia: Living with a Tabletop: Analysis and Observations of Long Term Office Use of a Multi-Touch Table. In: *Second Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems, 2007*, 2007 (TABLETOP '07), S. 60–67

- [Wigdor u. a. 2006] WIGDOR, Daniel ; SHEN, Chia ; FORLINES, Clifton ; BALAKRISHNAN, Ravin: 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*. New York, NY, USA : ACM, 2006 (CHI '06). – ISBN 1–59593–372–7, 309-318
- [Wigdor u. a. 2007b] WIGDOR, Daniel ; SHEN, Chia ; FORLINES, Clifton ; BALAKRISHNAN, Ravin: Perception of elementary graphical elements in tabletop and multi-surface environments. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2007 (CHI '07). – ISBN 978–1–59593–593–9, 473-482
- [Wilson u. a. 2008] WILSON, Andrew D. ; IZADI, Shahram ; HILLIGES, Otmar ; GARCIA-MENDOZA, Armando ; KIRK, David: Bringing physics to the surface. In: *Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User interface software and technology*. New York, NY, USA : ACM, 2008 (UIST '08). – ISBN 978–1–59593–975–3, 67-76
- [Wimmer u. a. 2009] WIMMER, R. ; SCHULZ, F. ; HENNECKE, F. ; BORING, S. ; HUSSMANN, H.: Curve: Blending horizontal and vertical interactive surfaces. In: *Adjunct Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Tabletops and Interactive Surfaces*, IEEE, 2009 (Tabletop 2009)
- [Wimmer u. a. 2010] WIMMER, Raphael ; HENNECKE, Fabian ; SCHULZ, Florian ; BORING, Sebastian ; BUTZ, Andreas ; HUSSMANN, Heinrich: Curve: revisiting the digital desk. In: *Proceedings of the 6th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Extending Boundaries*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (NordiCHI '10). – ISBN 978–1–60558–934–3, 561-570
- [Yang u. a. 2001] YANG, Ruigang ; GOTZ, D. ; HENSLEY, J. ; TOWLES, H. ; BROWN, M.S.: PixelFlex: a reconfigurable multi-projector display system. In: *Proceedings of the conference on Visualization '01*. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2001 (VIS '01), S. 167–174

Eidesstattliche Versicherung

(Siehe Promotionsordnung vom 12.07.11, § 8, Abs. 2 Pkt. .5.)

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass die Dissertation von mir selbstständig und ohne unerlaubte Beihilfe angefertigt wurde.

München, den 11. November 2013

Fabian Hennecke