

Taktile Interaktion auf flächigen Brailledisplays

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt im August 2016 an der
Technischen Universität Dresden
Fakultät Informatik

eingereicht von
Dipl.-Medieninf. Denise Prescher
geboren am 15. Juni 1984 in Großröhrsdorf

Gutachter:

Prof. Dr. rer. nat. habil. Gerhard Weber
Technische Universität Dresden

Prof. Dr. Albrecht Schmidt
Universität Stuttgart

Tag der Verteidigung: 21. November 2016

Dresden im Dezember 2016

Abstract

Blind people normally use screen readers as well as single-lined refreshable Braille displays for accessing graphical user interfaces (GUIs). These technologies allow for a non-visual perception of textual content but not for an effective handling of visual illustrations. Novel two-dimensional tactile pin-matrix devices are an appropriate solution to interactively access tactual graphics. In this way, they can enrich the interaction possibilities of blind users in dealing with graphical applications. For instance, such devices enable the exploration of spatial arrangements and also combine output of Braille, graphics and semi-graphical elements. To make the high amount of simultaneously presented information perceivable and efficiently usable for blind users, an adequate preparation of content as well as adapted navigation and orientation mechanisms must be provided.

In this thesis the BrailleDis devices of Metec AG, which have a tactile output area of 120 times 60 pins, were used. The goal was to investigate to what extent large pin-matrix devices enable blind people to use graphical user interfaces effectively and efficiently. Access to the GUI itself, reading text, and dealing with graphics are the main aspects of the application area of such devices. To facilitate the operation on a two-dimensional pin-matrix device a consistent organization of the content is helpful. Therefore, a novel tactile windowing system was implemented which divides the output area into multiple disjunctive regions and supports diverse tactile information visualizations.

Moreover, a taxonomy was developed to systematize the design and evaluation of tactile user interfaces. Apart from interaction that can be described by input and output as well as hand movements, the taxonomy includes user intention in terms of interactive task primitives and technical specifications of the device.

Based on the taxonomy, relevant aspects of tactile interaction were identified. These aspects were examined in multiple user studies with a total of 46 blind and visually impaired participants. The following research topics were considered during the user studies: 1. the effectiveness of diverse tactile view types (output), 2. user input and exploration, and 3. the efficiency of specific interaction techniques. As a result, practical recommendations for implementing user interfaces on two-dimensional pin-matrix devices were given. These recommendations include ergonomic issues of physical devices as well as design considerations for textual and graphical content as well as orientation aids.

In summary, the user studies showed that two-dimensional pin-matrix devices enable blind people an effective and efficient access to graphical user interfaces. Diverse tactile information visualizations can support users to fulfill various tasks. In general, two-dimensional interaction requires the extension of conventional exploration and input strategies of users. The provision of novel interaction techniques for supporting orientation can help to increase efficiency even more.

Kurzfassung

Für den Zugang zu grafischen Benutzungsoberflächen (GUIs) stehen blinden Menschen so genannte Screenreader und Braillezeilen zur Verfügung. Diese ermöglichen zwar das nicht-visuelle Wahrnehmen textueller Inhalte, allerdings kein effektives Arbeiten mit bildlichen Darstellungen. Neuartige taktile Flächendisplays können eine geeignete Lösung für den interaktiven Zugang zu tastbaren Grafiken darstellen und somit die Interaktionsmöglichkeiten blinder Benutzer im Umgang mit grafischen Anwendungen bereichern. Beispielsweise erlauben derartige Geräte nicht nur das Erkunden räumlicher Anordnungen, sondern darüber hinaus auch die kombinierte Ausgabe von Braille, Grafik und semi-grafischen Elementen. Um die deutlich größere Menge an gleichzeitig darstellbaren Informationen beherrschbar zu machen, sind neben entsprechenden Inhaltsaufbereitungen und Navigationsmechanismen auch geeignete Orientierungshilfen bereitzustellen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde am Beispiel der BrailleDis Geräte der Metec AG, welche eine taktile Ausgabefläche von 120 mal 60 Stiften bereitstellen, untersucht, inwieweit flächige Brailledisplays blinden Menschen eine effektive und effiziente Bedienung grafischer Benutzungsoberflächen ermöglichen. Neben dem Zugang zur GUI selbst sowie dem Lesen von Texten stellt dabei insbesondere das Arbeiten mit Grafiken einen wichtigen Aspekt dar. Um die Bedienung auf einem taktilen Flächendisplay zu erleichtern, ist eine konsistente Organisation der Inhalte hilfreich. Hierfür wurde ein neuartiges taktiles Fenstersystem umgesetzt, welches die Ausgabe nicht nur in mehrere disjunkte Bereiche unterteilt, sondern auch verschiedene taktile Darstellungsarten unterstützt.

Zur Systematisierung der Gestaltung und Evaluation derartiger taktiler Benutzungsoberflächen sowie der darin stattfindenden Benutzerinteraktionen wurde zunächst eine Taxonomie erarbeitet. Dabei wurden neben der Interaktion selber, welche durch die Ein- und Ausgabe sowie die Handbewegungen des Benutzers beschrieben werden kann, auch die Benutzerintention in Form von taktilen Elementaraufgaben sowie die technischen Spezifikationen des Geräts mit einbezogen.

Basierend auf der Taxonomie wurden anschließend relevante Aspekte identifiziert, welche in mehreren Benutzerstudien mit insgesamt 46 blinden und hochgradig sehbehinderten Menschen untersucht wurden. Die betrachteten Untersuchungsfragen betrafen dabei einerseits die Effektivität der Ausgabe in Form verschiedener taktiler Ansichtsarten sowie die Eingabe und Erkundung durch den Benutzer, andererseits auch Aspekte zur Effizienz konkreter Interaktionstechniken. Als Ergebnis der einzelnen Studien wurden abschließend konkrete Empfehlungen zur Umsetzung von Benutzungsoberflächen auf flächigen Brailledisplays gegeben. Diese beinhalten insbesondere Aspekte zur Ergonomie von taktilen Flächendisplays, zur Anzeige von textuellen Inhalten, zur Darstellung und Interaktion mit grafischen Inhalten sowie zu Orientierungshilfen.

Insgesamt konnte mit Hilfe der Benutzerstudien gezeigt werden, dass flächige Brailledisplays blinden Menschen einen effektiven und effizienten Zugang zu grafischen Benutzungsoberflächen ermöglichen. Verschiedene taktile Darstellungsarten können dabei das Lösen unterschiedlicher Aufgaben unterstützen. Generell erfordert die flächige Interaktion vom Benutzer allerdings auch die Erweiterung seiner konventionellen Erkundungs- und Eingabestrategien. Die Bereitstellung neuartiger Interaktionstechniken zur Unterstützung der Orientierung kann die Effizienz zusätzlich steigern.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Menschen bedanken, die mich bei meiner Promotion unterstützt haben.

Als Erstes möchte ich mich bei meinem Betreuer Prof. Dr. Gerhard Weber für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung während meiner Forschungsarbeiten am Lehrstuhl für Mensch-Computer Interaktion sowie für die konstruktiven Diskussionen bedanken. Außerdem danke ich auch Prof. Dr. Albrecht Schmidt für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie meinem Fachreferenten Prof. Dr. Rainer Groh. Der Graduiertenakademie der TU Dresden möchte ich für das entgegengebrachte Vertrauen sowie insbesondere für die Gewährung eines Kurzzeitstipendiums danken.

Ein ganz besonderer Dank gebührt meinem Ehemann Jens Bornschein, der mich nicht nur darin ermutigt hat, eine Promotion anzufertigen, sondern mir auch die gesamte Zeit über mit Rat und Tat zur Seite stand. Vor allem bedanke ich mich für die stetige Motivation und Unterstützung in stressigen Phasen. Auch meiner Familie sowie meinen Freunden danke ich für den Rückhalt. Insbesondere bin ich Franziska Ilbring und Robert Krahn für das Korrekturlesen sowie die daraus resultierende sprachliche Aufwertung meiner englischsprachigen Veröffentlichungen sehr dankbar.

Weiterhin danke ich meinen KollegInnen bzw. ehemaligen KollegInnen, allen voran Dr. Mei Miao, Dr. Michael Schmidt sowie Claudia Loitsch für das Korrekturlesen meiner Ausarbeitung, die hilfreichen Anregungen und Verbesserungsvorschläge sowie die angenehme Arbeitsatmosphäre. Ebenso bin ich allen Partnern des HyperBraille Projekts dankbar für die gute Zusammenarbeit sowie die Implementierungen für das HyperReader System, ohne welche die Untersuchungen dieser Arbeit nicht möglich gewesen wären. Zudem danke ich Ursula Weber und Anja Winkler ganz besonders für die Unterstützung beim Erarbeiten und Erproben der nicht-visuellen Konzepte sowie für die Hilfe beim Vorbereiten der Benutzerstudien und Rekrutieren von blinden Probanden.

Zum Schluss möchte ich mich natürlich auch ganz herzlich bei allen blinden und sehbehinderten Probanden bedanken, die mit ihrer Teilnahme an den Benutzerstudien einen großen Anteil am Erfolg dieser Arbeit hatten. Speziell danke ich Dr. Jan Blüher, Sebastian Humenda, Eric Scheibler und Frank Schirlitz für ihre stete Bereitschaft, an den Studien und Umfragen mitzuwirken, sowie für die hilfreichen Verbesserungsvorschläge und Anregungen.

Denise Prescher
Dresden, 5. Dezember 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problembeschreibung	2
1.2	Zielstellung und Lösungsansätze	3
1.3	Aufbau der Arbeit	4
2	Interaktionsformen blinder Menschen	7
2.1	Taktile Wahrnehmung	7
2.2	Taktile Medien	10
2.2.1	Taktilles Lesen	10
2.2.2	Taktile Grafiken	12
2.2.3	Strategien zum Lesen von Braille und zur Erkundung taktiler Grafiken	16
2.3	Screenreader und Braillezeile	19
2.3.1	Barrieren beim Zugang zu grafischen Benutzungsoberflächen	20
2.3.2	Datenquellen für Screenreader	21
2.3.3	Screenreader-Funktionalitäten und deren Bedienung	21
2.3.4	Taktile Ausgabe auf der Braillezeile	22
2.4	Explore by Touch auf Smartphones und Tablets	23
2.5	Grafisch-taktile und haptische Displays	25
2.5.1	Geräte mit Krafrückmeldung	27
2.5.2	Virtuell-taktile Displays	29
2.5.3	Grafisch-taktile Displays	31
2.5.4	Die taktilen Stiftplatten der Metec AG	33
2.5.5	Bewertung der Eignung der verschiedenen Displayarten	35
2.6	Zusammenfassung	35
3	Darstellung von grafischen Benutzungsoberflächen auf einem flächigen Brailledisplay	37
3.1	Anwendungsszenarien und Anforderungen an die Interaktion auf flächigen Brailledisplays	37
3.1.1	Benutzerbefragung zu herkömmlichen Arbeitsweisen und möglichen Anwendungsszenarien grafisch-taktile Displays	38
3.1.2	Besonderheiten und Anforderungen an die Interaktion auf flächigen Brailledisplays	40
3.1.3	Bisherige Anwendungsgebiete der taktilen Stiftplatte	41
3.2	Interaktionstechniken auf Basis des taktilen Fenstersystems	42
3.2.1	Taktile Informationsvisualisierung	43
3.2.2	Haptische Interaktion	46
3.2.3	Softwarearchitektur des HyperReaders	50
3.2.4	Benutzerinteraktionen am Beispiel von PowerPoint	51
3.3	Bewertung des taktilen Fenstersystems	54
3.3.1	Methodik	55
3.3.2	Ergebnisse	56
3.3.3	Diskussion	57
3.4	Zusammenfassung	58

4	Entwurf einer Taxonomie für die taktile Interaktion auf flächigen Brailledisplays	59
4.1	Vorhandene Taxonomien	59
4.1.1	Taxonomien zur haptischen Interaktion	59
4.1.2	Taxonomien zu Eingabetechniken	61
4.2	Ansätze zur Entwicklung einer geeigneten Taxonomie	63
4.2.1	Beschreibung der Benutzerhandlungen während der Interaktion auf taktilen Flächendisplays	63
4.2.2	Dimensionen der taktilen Interaktion	65
4.2.3	Sichtweisen auf die taktile Interaktion	70
4.3	Anwendung der Taxonomie	71
4.3.1	Beschreibung des Geräts BrailleDis 7200	72
4.3.2	Beschreibung von Interaktionen auf dem BrailleDis 7200	73
4.3.3	Zuordnung der Stiftplattenbedienung zu den Elementaraufgaben	74
4.4	Diskussion	75
4.5	Zusammenfassung	77
5	Grundlagen zur Evaluierung der taktilen Interaktion	79
5.1	Evaluationsmethoden	79
5.1.1	Prototyping Methoden	80
5.1.2	Methoden zur Datenerhebung	81
5.2	Bewertungskriterien	82
5.3	Auswertungsmethoden	84
5.4	Zusammenfassung und Diskussion	85
6	Ergonomie der Bedienelemente zur Eingabe auf flächigen Brailledisplays	87
6.1	Entwurf zusätzlicher Bedienelemente für das BrailleDis	88
6.2	Evaluation der verschiedenen Bedienelemente	88
6.2.1	Methodik	90
6.2.2	Ergebnisse	91
6.2.3	Diskussion	92
6.3	Evaluation zur Platzierung der Bedienelemente	93
6.3.1	Methodik	93
6.3.2	Ergebnisse	95
6.3.3	Diskussion	96
6.4	Bewertung des neuen Designs	97
6.5	Empfehlungen zur Ergonomie einer Stiftplatte	98
7	Interaktionstechniken auf einem flächigen Brailledisplay	99
7.1	Forschungsfragen	99
7.2	Lesen von Braille-Inhalten	101
7.2.1	Studien zum Lesen von äquidistantem Braille auf der Stiftplatte	103
7.2.2	Studie zur taktilen Schwarzschrift	106
7.2.3	Zusammenfassung	108
7.2.4	Empfehlungen zur Anzeige von textuellen Inhalten	108
7.3	Erkundung taktiler Grafiken	109
7.3.1	Fallbeispiel 1: Taktile Grafikeditor	109
7.3.2	Fallbeispiel 2: Taktile Füllmuster	116
7.3.3	Zusammenfassung	126
7.3.4	Empfehlungen zur Darstellung und Interaktion mit grafischen Inhalten auf der taktilen Stiftplatte	126
7.4	Orientierung in grafischen Oberflächen	127
7.4.1	Studie zu Orientierungshilfen auf flächigen Brailledisplays	128
7.4.2	Vergleich verschiedener Eingabemethoden	136
7.4.3	Effizienzvergleich am Beispiel eines PDF Fragebogens	144
7.4.4	Untersuchung zum taktilen Zoomen	148
7.4.5	Empfehlungen zu Orientierungshilfen auf der taktilen Stiftplatte	156
7.5	Zusammenfassung	157

8 Zusammenfassung und Ausblick	161
Literaturverzeichnis	167
Anhang	193
A Eingabekommandos für den HyperReader	193
B Taxonomie zur taktilen Interaktion	199
C Beschreibung von Interaktionen auf dem BrailleDis 7200	203
D Zuordnung der Stiftplattenbedienung zu den Elementaraufgaben	207
E Beschreibungen zu den TLX-Faktoren	211
F Taktile Füllmuster	213

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aspekte der Mensch-Computer Interaktion	2
2.1	Komponenten der haptischen Wahrnehmung	8
2.2	Schematische Darstellung der Brailleschrift	10
2.3	Taktile Schriften	12
2.4	Beispiele zu den verschiedenen Herstellungsverfahren für taktile Grafiken	13
2.5	Verbreitung der verschiedenen Umsetzungsmethoden für taktile Grafiken bei den Institutionen sowie unter Personen der Zielgruppe	14
2.6	Braillezeilen	23
2.7	Einteilung taktiler Displays nach Vidal-Verdú und Hafez	26
2.8	Einteilung haptischer Displays basierend auf der Anzahl an Reizpunkten sowie der Ausgabefrequenz	27
2.9	Force Feedback Geräte	28
2.10	Virtuell-taktile Displays	30
2.11	Grafisch-taktile Displays	32
2.12	Taktile Stiftplatten der Metec AG	35
3.1	Häufigkeitsbewertung zur Anwendung der Strategien nach Borodin et al.	39
3.2	Anwendungsszenarien für flächige Brailledisplays	40
3.3	Konzept der Ansichten und Bereiche nach Schiewe et al.	43
3.4	Orientierungshilfen für die taktile Ausgabe auf der Stiftplatte (Minimap und Scrollbalken)	44
3.5	Schematische Darstellung des taktilen Fenstersystems	45
3.6	Darstellung eines Dokuments in den verschiedenen Ansichtsarten	47
3.7	Schematische Übersicht über die im HyperReader System verwendeten Gesten	48
3.8	Softwarearchitektur des HyperReader Systems	50
3.9	Zusammenspiel der HyperReader Komponenten am Beispiel des Öffnens eines GUI-Fensters	51
3.10	Zusammenspiel der HyperReader Komponenten am Beispiel eines Ansichtswechsels	51
3.11	Zusammenspiel der HyperReader Komponenten am Beispiel einer Zeigegeste auf ein GUI-Element	52
3.12	Interaktionen im taktilen Fenstersystem am Beispiel des Hinzufügens und Bearbeitens einer Folie in PowerPoint	54
3.13	Beurteilung der allgemeinen Bedienung der Stiftplatte	56
3.14	Bewertung einiger Interaktionsaspekte des Fenstersystems	57
3.15	Bewertung einiger Aspekte der Gestenbedienung	57
4.1	Taxonomie haptischer Interaktionsaufgaben nach Samur	60

4.2	Taxonomie taktiler Anzeigarten nach Kaczmarek und Bach-Y-Rita	61
4.3	Taxonomie für Selektionstechniken nach Foley	62
4.4	Taxonomie für Eingabegeräte nach Buxton	62
4.5	Taxonomie für Gesten in der Mensch-Computer Interaktion nach Pavlovic	62
4.6	Gestaltungsraum haptischer Benutzungsoberflächen bezüglich Wahrnehmungs- komponente und Aktivität des Benutzers	64
4.7	Einordnung der Interaktion mit der Stiftplatte innerhalb des Gestaltungsraums haptischer Benutzungsoberflächen	64
4.8	Elementaraufgaben für die taktile Interaktion	65
4.9	Zeitliche Relationen nach Allen	66
4.10	Kategorien der taktilen Interaktion	66
4.11	Aspekte taktiler Geräte	66
4.12	Taxonomie zu allgemeinen Eigenschaften taktiler Geräte	67
4.13	Taxonomie zu Eingabeeigenschaften taktiler Geräte	67
4.14	Taxonomie zu Ausgabeigenschaften taktiler Geräte	67
4.15	Taxonomie zur Intention bei der taktilen Interaktion	68
4.16	Aspekte taktiler Interaktionsarten	68
4.17	Taxonomie zu Handbewegungen bei der taktilen Interaktion	68
4.18	Taxonomie zu möglichen taktilen Lesebewegungsstrategien	69
4.19	Schematische Darstellung typischer taktiler Lese- und Erkundungsstrategien	69
4.20	Taxonomie zu taktilen Nicht-Lesebewegungen	70
4.21	Taxonomie zur Eingabe bei der taktilen Interaktion	70
4.23	Prozessmodell der taktilen Interaktion	70
4.22	Taxonomie zur Ausgabe auf taktilen Flächendisplays	71
4.24	Schematische Darstellung des BrailleDis 7200	72
4.25	Schematische Darstellung der Interaktion zum Einblenden der Strukturleiste auf dem BrailleDis 7200	73
5.1	Beispiele zur Visualisierung von Handbewegungen und Fingerpositionen	85
6.1	Stiftplatten Mock-ups zu verschiedenen Bedienelementen	89
6.2	Prototyp eines bewegbaren Tastatur-Schlittens über der Stiftplatte	91
6.3	Bewertung der Bedienelemente zur Realisierung von Panningoperationen	91
6.4	Bewertung der Bedienelemente zur Realisierung von Zoomingoperationen	91
6.5	Design für einen neuen Stiftplattenprototypen basierend auf den Ergebnissen der ersten Benutzerstudie zur Stiftplattenergonomie	93
6.6	Mock-up Szenarien	94
6.7	Bewertungen für die verschiedenen Platzierungen der PC Tastatur	96
6.8	Bewertungen für die verschiedenen Platzierungen der Brailletastatur	96
6.9	Design für einen neuen Stiftplattenprototypen basierend auf den Ergebnissen der zweiten Benutzerstudie zur Stiftplattenergonomie	97
6.10	Designentwurf für das Gehäuse des BrailleDis 7200	97
7.1	3x5-Punkt-Matrix der äquidistanten Brailleschrift	103
7.2	Leseraten der Probanden unter den vier Lesebedingungen	104
7.3	Originalansicht mit taktiler Schwarzschrift	107
7.4	Darstellung serifenloser und Serifenschrift in der Originalansicht	107
7.5	Taktile Benutzungsoberfläche des Tangram Zeichenarbeitsplatzes im Druckzoom	110

7.6	Verwendung der Tasten des rechten Cursorkreuzes bei den verschiedenen Editiermodi des taktilen Grafikeditors	111
7.7	Schematische Darstellung des Tastenkonzepts auf dem BrailleDis 7200 für den Zeichenmodus	113
7.8	Bewertung der Editiermöglichkeiten für Grafikobjekte auf der Stiftplatte	114
7.9	Bewertung wichtiger Konzepte und Funktionen des taktilen Grafikeditors	115
7.10	Für die Stiftplatte entworfene taktile Füllmuster	117
7.11	Beispiele von Musterkombinationen zur Bewertung der Unterscheidbarkeit	118
7.12	Untersuchte Varianten der taktilen Muster beim Vergleich auf den verschiedenen Medien	119
7.13	Beispiel eines Referenzmusters auf der Stiftplatte und Übersichtspaletten mit allen Texturvarianten als Schwellpapier- und Brailleausdruck	121
7.14	Korrektklassifikationsraten für die einzelnen Texturen	122
7.15	Toleranz der Probanden gegenüber verschiedenartigen Modifikationen (Texturen-Studie)	122
7.16	Prozentualer Anteil der korrekten Zuordnung zwischen Stiftplattentexturen und den Varianten auf Schwellpapier bzw. Brailleausdruck	123
7.17	Subjektive Bewertung der taktilen Muster durch die Probanden	123
7.18	Kontrastmatrix der taktilen Muster auf der Stiftplatte basierend auf den Benutzerbewertungen	124
7.19	Verwendung der verschiedenen Texturversionen innerhalb des Tangram Arbeitsplatzes	126
7.20	Original GUI-Dialoge und deren Ausgabe auf der Stiftplatte nach der Filterung	129
7.21	Taktile Ausdruck für einen der Dialoge aus Abbildung 7.20	130
7.22	Bewertung der vier Ansichtsarten (Lokalisierungsstudie)	133
7.23	Beispielfragebogen und die entsprechende taktile Darstellung	138
7.24	Benötigte Zeiten der Probanden bei Verwendung der verschiedenen Eingabemethoden (PDF-Studie)	139
7.25	Anzahl der Fehler beim Ausfüllen des Fragebogens bei Verwendung der verschiedenen Eingabemethoden	140
7.26	Benötigte Zeiten zum Ausfüllen des Fragebogens (Effizienzvergleichsstudie)	146
7.27	Visualisierung der Berührungsdauer einzelner Bereiche auf der Stiftplatte	147
7.28	Ausschnitt der Stiftplatte in drei verschiedenen Zoomstufen basierend auf Fokus- und Mittelpunktzoom	150
7.29	Screenshot eines Beispielbilds mit 18 verschiedenen Formen und die entsprechende Ausgabe auf dem BrailleDis 7200	152
7.30	Benötigte Zeit zum Wiederfinden der fokussierten Form nach Anwendung von Mittelpunkt- und Fokuszoom	154
7.31	Abstand zwischen den Mittelpunkten der fokussierten Form vor und nach Anwendung von Mittelpunkt- und Fokuszoom	154
7.32	Bewertung der TLX Faktoren für den Mittelpunkt- und den Fokuszoom	155
A.1	Schematische Darstellung der BrailleDis Geräte und deren Bedienelemente	193
B.1	Taxonomie zur taktilen Interaktion (Kategorie Intention)	199
B.2	Taxonomie zur taktilen Interaktion (Kategorie Interaktionsart)	200
B.3	Taxonomie zur taktilen Interaktion (Kategorie Gerät)	201
C.1	Schematische Darstellung einer unidirektional horizontalen Leseinteraktion auf dem BrailleDis 7200	203
C.2	Schematische Darstellung von Interaktionen zum Editieren eines Textfelds	204

Tabellenverzeichnis

2.1	Haptische Erkundungsprozeduren und deren Entsprechungen für die flächige Erkundung taktiler Ausgabemedien	18
2.2	Technische Eigenschaften der Metec Stiftplatten	34
3.1	Überblick über Aufgaben zur Erkundung und Bearbeitung einer Präsentation sowie die dabei von den Probanden benutzten Ansichtsarten	53
4.1	Zuordnung der Stiftplattenbedienung zu den Elementaraufgaben (Ausschnitt) . .	75
6.1	Probandenmeinungen zu verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten von Braille- und PC Tastatur	95
7.1	Überblick über die untersuchten Forschungsfragen und analysierten Aspekte der taktilen Interaktion sowie der Usability in den einzelnen Benutzerstudien	102
7.2	Leseraten bei Standard- und äquidistantem Braille	106
7.3	Erfahrungen der Probanden (Studie zum taktilen Grafikeditor)	114
7.4	Demografische Daten der Probanden (Texturen-Studie)	120
7.5	Aufteilung der Versuchsbedingungen auf die Testsitzungen (Lokalisierungsstudie)	131
7.6	Benötigte Zeiten und finale Zoomstufen beim Suchen der Widgets (Lokalisierungsstudie)	132
7.7	Suchstrategien der Probanden in den verschiedenen Ansichtsarten (Lokalisierungsstudie)	134
7.8	Benötigte Zeiten und Offsets beim Lokalisieren der Position eines Widgets auf dem taktilen Ausdruck (Lokalisierungsstudie)	135
7.9	Zuordnung der Eingabemethoden zu den Probanden (PDF-Studie)	137
7.10	Handbewegungsmuster beim Lesen auf der Stiftplatte (PDF-Studie)	142
7.11	In den Testsitzungen verwendete Screenreader-Setups der Probanden (Effizienzvergleich)	145
7.12	Untersuchte Zoombedingungen (Zoom-Studie)	153
A.1	Kommandos zur Bedienung der Bereiche	194
A.2	Kommandos zur Erkundung	195
A.3	Kommandos zur Bedienung der Braille-Fenster	196
A.4	Kommandos zu weiteren wichtigen HyperReader-Funktionen	196
A.5	Kommandos zur PC-Tastanemulation auf der Stiftplatte	197
D.1	Zuordnung der Stiftplattenbedienung zur Elementaraufgabe Suchen	207
D.2	Zuordnung der Stiftplattenbedienung zur Elementaraufgabe Überblick erhalten .	207
D.3	Zuordnung der Stiftplattenbedienung zur Elementaraufgabe Navigieren	208
D.4	Zuordnung der Stiftplattenbedienung zur Elementaraufgabe Identifizieren	208
D.5	Zuordnung der Stiftplattenbedienung zur Elementaraufgabe Auswählen	209
D.6	Zuordnung der Stiftplattenbedienung zur Elementaraufgabe Manipulieren	210
F.1	Taktiler Füllmuster Set (Teil I)	214
F.2	Taktiler Füllmuster Set (Teil II)	215

Abkürzungsverzeichnis

ACM	Association for Computing Machinery (wissenschaftliche Gesellschaft für Informatik)
API	Application Programming Interface (Anwendungsprogrammierschnittstelle)
ASCII	American Standard Code for Information Interchange (7-Bit-Zeichenkodierung)
BANA	Braille Authority of North America
BGG	Behindertengleichstellungsgesetz
BITV	Barrierefreie-Informationstechnik-Verordnung
CSS	Cascading Style Sheets
DOF	Degree Of Freedom (Freiheitsgrade)
DOM	Document Object Model
dpi	dots per inch (Punkte pro Zoll)
ERM	Eccentric Rotating Mass (Vibrationsmotor)
GUI	Graphical User Interface (Grafische Benutzeroberfläche)
HTML	Hypertext Markup Language
ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
MSAA	Microsoft Active Accessibility
OCR	Optical Character Recognition (Optische Zeichenerkennung)
OSM	Off-Screen-Model
PDF	Portable Document Format
RTFC	Rich Text Format Compiler
SVG	Scalable Vector Graphics
TASO	taktil-akustische Seitenorientierung
TLX	Task Load Index
UIA	UI Automation
VBD	Virtual Braille Display
W3C	World Wide Web Consortium
WCAG	Web Content Accessibility Guidelines (Richtlinien für barrierefreie Webinhalte)
wpm	Wörter pro Minute

Einleitung

Entsprechend des Behindertengleichstellungsgesetzes (BGG) dürfen behinderte Menschen nicht benachteiligt werden. Eine gleichberechtigte und selbstständige Teilnahme an der modernen Informations- und Kommunikationsgesellschaft erfordert dabei auch den uneingeschränkten Zugriff auf digitale Inhalte und Anwendungen. Die visuelle Ausrichtung heutiger grafischer Benutzungsoberflächen (GUIs) kann für blinde und sehbehinderte Menschen allerdings eine erhebliche Hürde darstellen. Um diese zu überwinden, ist die Entwicklung geeigneter Hilfsmittel und Interaktionstechniken für den Umgang mit Computern essentiell.

Für die *Interaktion zwischen Mensch und Computer* sind allerdings nicht nur deren jeweilige Eigenschaften und Anforderungen von Bedeutung, sondern auch der Kontext, in welchem die Interaktion stattfindet (vgl. Abbildung 1.1). Die Association for Computing Machinery (ACM) [HBC⁺92] bezieht in ihrem Überblick zur Mensch-Computer Interaktion dabei neben dem Anwendungsumfeld insbesondere auch den Arbeitskontext nach Dzida [DHV87] mit ein. Der Entwicklungsprozess interaktiver Systeme muss dementsprechend neben geeigneten Designansätzen und Adaptionmöglichkeiten basierend auf dem Kontext auch passende Evaluationstechniken berücksichtigen, um gebrauchstaugliche Umsetzungen zu gewährleisten. *Gebrauchstauglichkeit* (auch als *Usability* bezeichnet) wird dabei als Ausmaß definiert, inwieweit „ein Produkt durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ [ISO98].

Werden zur Interaktion mehrere Sinnesmodalitäten gleichzeitig angesprochen, so spricht man von *Multimodalität*. Die Eingabemodalität bezieht sich dabei auf die Informationsübertragung vom Menschen zum Computer, die Ausgabemodalität bezieht sich auf die Übertragung vom Computer zum Menschen (vgl. auch [Mia14]). Die Bereitstellung redundanter Ein- (z. B. Sprache, Tasten, Gesten) und Ausgabemöglichkeiten (z. B. Grafik, Sprache, Vibration) kann dabei insbesondere den Vorteil bieten, dass eine bessere Anpassbarkeit an individuelle Bedürfnisse ermöglicht wird. Dies wiederum kann dabei helfen, existierende Einschränkungen beim Zugang zu grafischen Benutzungsoberflächen für blinde und sehbehinderte Benutzer zu überwinden [BB94].

In interaktiven Systemen sind für die Zielgruppe blinder Menschen vor allem auditive und haptische bzw. taktile Modalitäten geeignet. Diese Arbeit beschäftigt sich vorrangig mit der taktilen Modalität. Der Gestaltungsraum (*design space*) für taktile Interaktion beinhaltet dabei alle berührenden Aspekte des Tastsinns. Die Wahrnehmung kann sowohl lesend als auch erkundend sowie aktiv oder passiv stattfinden. Eingaben können durch physische Tasten oder auch Touchgesten realisiert werden. Berührungslose Aktionen können dem Benutzer darüber

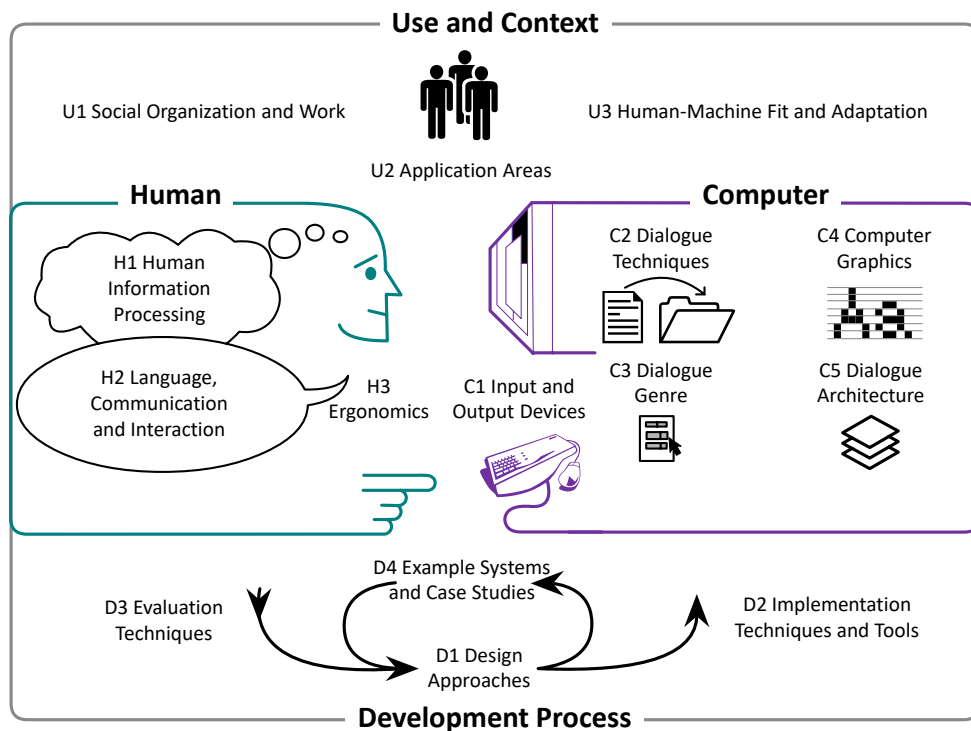


Abbildung 1.1: Aspekte der Mensch-Computer Interaktion nach [HBC⁺92]

hinaus wichtige Informationen zur Lage der Interaktionsmedien (Ein-/Ausgabegeräte bzw. Präsentationsmedien) zueinander liefern.

1.1 Problembeschreibung

Zur Interaktion mit grafischen Benutzungsoberflächen verwenden blinde Menschen seit über 25 Jahren so genannte *Screenreader* [BBV90]. Diese dienen dazu, Interaktionselemente und andere Bildschirmhalte in einer textuellen Repräsentation aufzubereiten, um sie auditiv über *Sprachausgabe* und taktil über *Braillezeile* auszugeben. Aufgrund der seriellen Ausgabe von Text und Sprache können räumliche Zusammenhänge sowie grafische Informationen allerdings nur bedingt vermittelt werden. Herkömmliche *taktile Grafiken* können hierfür zwar eine sinnvolle Ergänzung darstellen, jedoch ist deren Erstellung meist zeit- und kostenintensiv. Außerdem muss nicht nur für jede Änderung eine neue taktile Grafik erstellt werden, sondern es können auch kaum dynamische Darstellungen vermittelt werden.

Abhilfe können *dynamische taktile Flächendisplays* schaffen. Bereits Anfang der 70er Jahre wurden erste taktile Displays entwickelt, um räumliche Informationen über die Haut zu übertragen [BKRS70, WSS⁺70, BYR74]. Mit Hilfe dieser „tactile vision substitution“ Systeme, bei denen visuelle in taktile Reize umgewandelt werden, können unter anderem auch taktile Grafiken und grafische Benutzungsoberflächen dynamisch ausgegeben werden. Neuartige taktile Flächendisplays [KW04, VVB08, SM13b] erlauben zudem die Anzeige von Brailleschrift innerhalb von Grafiken. Im Gegensatz zu herkömmlichen Braillezeilen, bei denen jeweils nur eine einzelne Textzeile ausgegeben wird, können Inhalte auf derartigen Displays zweidimensional präsentiert werden. Neben den Interaktionsobjekten grafischer Benutzungsoberflächen an sich lassen sich so auch deren räumliche Beziehungen zueinander darstellen. Die übliche serielle Erkundung blinder Benutzer ist dabei jedoch nicht immer ausreichend, um eine effiziente Bedienung zu gewährleisten. Um die größere Informationsmenge beherrschen zu können, müssen entsprechende Inhaltsaufbereitungen, Navigationsmechanismen und Orientierungshilfen

bereitgestellt werden. Neben einem möglichen Kontextverlust kann dabei allerdings auch ein fehlendes räumliches Vorstellungsvermögen des Benutzers zu Problemen führen.

1.2 Zielstellung und Lösungsansätze

Das Ziel der Arbeit ist die Überprüfung, inwieweit ein flächiges Brailledisplay blinden Menschen eine *effektive und effiziente Bedienung von grafischen Benutzungsoberflächen* ermöglicht. Zwar erlauben herkömmliche Screenreader das Arbeiten mit GUIs per Sprachsynthese, allerdings existieren zahlreiche Anwendungen mit hohem grafischen Anteil, die sich nicht mit textbasierten Ausgaben allein bedienen lassen. Neben dem Zugang zur GUI selbst sowie dem Lesen von Texten stellt dabei insbesondere das Arbeiten mit Grafiken einen wichtigen Aspekt dar. Um die Bedienung auf einem taktilen Flächendisplay zu erleichtern, ist eine konsistente Organisation der Inhalte hilfreich. Hierfür wurde ein neuartiges *taktiler Fenstersystem* umgesetzt, welches die Ausgabe nicht nur in mehrere disjunkte Bereiche unterteilt, sondern auch verschiedene taktile Darstellungsarten unterstützt.

Um die Gestaltung und Evaluation derartiger taktiler Benutzungsoberflächen sowie der darin stattfindenden Benutzerinteraktionen zu systematisieren, kann die Erarbeitung einer Taxonomie hilfreich sein. Als Grundlage zur Bestimmung eines entsprechenden Gestaltungsraums können dabei die von der ACM definierten Aspekte der Mensch-Computer Interaktion aus Abbildung 1.1 herangezogen werden. Daraus ergibt sich die Anforderung, neben der Interaktion selber auch die Eigenschaften des Benutzers und des Geräts mit einzubeziehen sowie den Anwendungskontext und den Entwicklungsprozess zu berücksichtigen. Auf Letzteres wird im Rahmen dieser Arbeit vorwiegend durch die intensive Betrachtung der Evaluationsphase eingegangen.

Bezüglich der Interaktionen innerhalb des oben angesprochenen taktilen Fenstersystems stellen sich die folgenden Forschungsfragen, die entsprechend des Ziels dieser Arbeit näher untersucht werden sollen.

1. *Unterstützen verschiedene taktile Visualisierungsformen ein effektives und effizientes Arbeiten?*
Hierbei stellt sich insbesondere die Frage, ob verschiedene Darstellungsarten notwendig sind und welche jeweiligen Vor- und Nachteile sie beim Identifizieren verschiedenartiger GUI-Elemente aufweisen. Zudem muss dazu auch die Effektivität und Effizienz der einzelnen Darstellungsarten in ihrem jeweiligen Einsatzgebiet untersucht werden.
2. *Welche Erkundungsstrategien und Eingabemethoden eignen sich für die zweidimensionale Ausgabe?*
Im Rahmen dieser Frage ist zu klären, ob die Wahl der Eingabemethode einen Einfluss auf die Effektivität und Effizienz der Interaktion hat und welche Lesestrategien dabei angewendet werden. Außerdem muss untersucht werden, welche Erkundungsstrategien zum Auffinden von GUI-Elementen Verwendung finden und ob die zweihändige Bedienung dabei effizienter ist bzw. durch eine Einteilung in Bereiche unterstützt wird.
3. *Welche Interaktionstechniken können die Effizienz beim Arbeiten auf taktilen Flächendisplays steigern?*
Innerhalb dieser Frage spielen die im Rahmen des Fenstersystems angebotenen Orientierungshilfen und Zoomingansätze eine Rolle. Das heißt, es ist zu untersuchen, ob eine flächige Übersicht (Minimap) gegenüber taktilen Scrollbalken ein effizienteres und genaueres Orientieren ermöglicht und wie hilfreich eine Strukturleiste beim Auffinden von Elementen ist. Zudem muss überprüft werden, inwieweit sich das nicht-visuelle Zoomen auf der Stiftplatte effizienter und weniger beanspruchend gestalten lässt.

Zur Beantwortung der Forschungsfragen sowie zur Entwicklung konkreter Empfehlungen für die Umsetzung taktiler Benutzungsoberflächen auf flächigen Brailledisplays wurden mehrere

empirische Untersuchungen mit blinden Benutzern durchgeführt. Dabei wurden jeweils unterschiedliche Anwendungsszenarien verwendet, um einzelne Aspekte des taktilen Fenstersystems anhand der Gebrauchstauglichkeitskriterien zu überprüfen. Auf diese Weise kann die Komplexität der Aufgaben reduziert und somit die Untersuchung fokussierter gestaltet werden. Als Geräte standen dabei zwei Versionen flächiger Brailledisplays der Firma Metec AG zur Verfügung, welche eine taktile Ausgabe in Form von 120 x 60 Stiften bereitstellen (im Folgenden auch als *Stiftplatten* bezeichnet).

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich grundlegend in zwei Teile. Der erste Teil (Kapitel 2 bis 4) widmet sich einer genauen Betrachtung der Zielgruppe (blinde Menschen), des Zielgeräts (taktile Stiftplatte) sowie des Zielsystems (taktiles Fenstersystem). Zur Systematisierung des entsprechenden Gestaltungsraums wird zudem eine Taxonomie der taktilen Interaktion entwickelt. Im zweiten Teil der Arbeit (Kapitel 5 bis 7) werden die Erkenntnisse aus dem ersten Teil dazu verwendet, um verschiedene Aspekte der taktilen Interaktion auf der Stiftplatte zu evaluieren. Im Detail gliedert sich die Arbeit wie folgt.

In Kapitel 2 werden zunächst die besonderen Eigenschaften, Arbeitsweisen und Hilfsmittel blinder Menschen vorgestellt. Dabei wird der Fokus auf die verwendeten Technologien beim Zugang zu grafischen Benutzungsoberflächen gesetzt. Hierunter zählen insbesondere Screenreader und taktile Displays, mit deren Hilfe eine textuell-linearisierte Aufbereitung der Informationen erfolgt. Danach werden weitere Ansätze zur zwei- und dreidimensionalen Vermittlung von Informationen durch die haptische Wahrnehmung vorgestellt, welche darüber hinaus auch einen dynamischen Zugang zu grafischen Inhalten ermöglichen. In diesem Zusammenhang werden auch die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten taktilen Stiftplatten eingeführt.

Da die Konzeption geeigneter Interaktionsmechanismen neben dem Benutzer sowie dem Gerät auch den Kontext mit einbeziehen sollte, werden in Kapitel 3 anfangs konkrete Anwendungsszenarien und Benutzeranforderungen bezüglich derartiger Displays zusammengetragen. Zudem wird ein Überblick über bereits untersuchte Anwendungsgebiete auf der Stiftplatte gegeben. Anschließend wird das im Rahmen dieser Arbeit umgesetzte taktile Fenstersystem vorgestellt, welches eine konsistente Strukturierung der Informationen auf der Stiftplatte ermöglichen soll. Dabei werden insbesondere die bereitgestellten Darstellungs- und Interaktionsmöglichkeiten ausführlich beschrieben. Abschließend erfolgt eine grundlegende Bewertung des Fenstersystems durch blinde Benutzer.

Um eine bessere Kategorisierung der taktilen Interaktion für spätere Betrachtungen vornehmen zu können, wird in Kapitel 4 eine entsprechende Taxonomie entworfen. Dabei wird basierend auf vorhandenen Taxonomien zunächst eine Einordnung der Interaktion mit der Stiftplatte in den Gestaltungsraum haptischer Benutzungsoberflächen vorgenommen. Im Anschluss werden die einzelnen Dimensionen der taktilen Interaktion genauer beschrieben. Die erarbeitete Taxonomie kann auf diese Weise die systematische Gestaltung und Evaluation von taktilen Benutzungsoberflächen unterstützen.

Zur Beurteilung der Effektivität und Effizienz der Interaktion mit der Stiftplatte anhand der Taxonomie sind konkrete empirische Untersuchungen notwendig. Aus diesem Grund beginnt der zweite Teil der Arbeit zunächst mit einigen Grundlagen zur Evaluierung mit blinden Benutzern (Kapitel 5). Dabei werden insbesondere Bewertungskriterien vorgestellt, anhand derer interaktive Systeme beurteilt werden können.

Die folgenden beiden Kapitel stellen anschließend die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Benutzerstudien vor. Hierbei wird zunächst nicht die Software, sondern das Gerät selber betrachtet. Motiviert wurde dies durch erste Untersuchungen zum Fenstersystem, bei welchen ersichtlich wurde, dass Benutzer häufig versehentlich Tasten drücken. Zur Reduzierung der mentalen sowie physischen Belastung muss deshalb nicht nur der Inhalt, sondern auch die

Handhabung mit dem Gerät optimiert werden. In Kapitel 6 wird dementsprechend eine Studie vorgestellt, auf deren Grundlage ein neues und ergonomisches Stiftplattendesign konzipiert wurde.

Basierend auf den bei der Taxonomie identifizierten Aspekten der taktilen Interaktion werden anschließend in Kapitel 7 mehrere Benutzerstudien beschrieben. Die untersuchten Forschungsfragen verknüpfen dabei die Aspekte der taktilen Interaktion mit den Bewertungskriterien der Gebrauchstauglichkeit. Die einzelnen Studien sind anhand typischer Anwendungsszenarien flächiger Brailledisplays strukturiert, d. h. Arbeiten mit textuellen und grafischen Inhalten sowie Zugang zu und Orientierung in GUIs. Als Ergebnis werden Empfehlungen zur Gestaltung taktiler Benutzungsoberflächen für flächige Brailledisplays formuliert. Abschließend wird in Kapitel 8 eine Zusammenfassung der Arbeit sowie ein Ausblick gegeben.

Interaktionsformen blinder Menschen

Ziel dieses Kapitels ist es, ein Verständnis für die besondere Arbeitsweise und die angewendeten Techniken blinder Menschen im Umgang mit Informations- und Kommunikationstechnologien zu vermitteln. Basierend auf den Besonderheiten der taktilen gegenüber der visuellen Wahrnehmung werden zunächst die relevanten Medien sowie übliche Strategien zur Informationsaufnahme vorgestellt. Hierunter zählen nicht nur Texte in Blindenschrift, sondern auch tastbare Grafiken. Anschließend wird eine Übersicht über Hilfsmittel für den Zugang zu digitalen Anwendungen gegeben. Neben traditionellen Screenreadern und Braillezeilen zur Arbeit mit Computeranwendungen werden dabei auch spezielle Interaktionsmechanismen vorgestellt, welche den nicht-visuellen Zugang zu Touchscreens ermöglichen. Ein besonderes Augenmerk dieser Arbeit liegt auf den anschließend vorgestellten grafisch-taktilen Displays, welche die Vorteile taktiler Medien mit denen einer interaktiven flächigen Ausgabe verbinden.

2.1 Taktile Wahrnehmung

Dem Gesetz nach gilt in Deutschland ein Mensch als blind, wenn seine Sehschärfe weniger als 2 % beträgt oder sein Gesichtsfeld auf höchstens 5 Grad beschränkt ist. Aufgrund der fehlenden oder zumindest stark eingeschränkten visuellen Fähigkeiten blinder Menschen ist diese Zielgruppe auf andere Wahrnehmungsmodalitäten angewiesen, um in und mit ihrer Umgebung zu interagieren. Neben dem Hörsinn stellt dabei vor allem der *Tastsinn*, also die Fähigkeit Berührungen wahrzunehmen, ein wichtiges Mittel zur Kompensation des Sehsinns dar [Kob93]. Die folgenden Begriffsbestimmungen basieren insbesondere auf den Definitionen von Loomis und Lederman [LL86], Grunwald [Gru01] sowie der ISO Richtlinie zur taktilen und haptischen Interaktion (ISO 9241-910 [ISO11b]).

Es kann zwischen passivem und aktivem Tastsinn unterschieden werden (vgl. Abbildung 2.1). Beim passiven Tastsinn spielt die so genannte Oberflächensensibilität, auch als *taktile Wahrnehmung* bezeichnet, eine Rolle. Rezeptoren in der Haut reagieren dabei auf äußere Reize, die insbesondere auf mechanischen (Mechanorezeptoren), thermischen oder elektrischen Stimulationen basieren. Kommt zur taktilen Wahrnehmung die so genannte Tiefensensibilität hinzu, dann spricht man vom aktiven Tastsinn (auch *haptische Wahrnehmung*). Die Tiefensensibilität selber wird auch als *kinästhetische Wahrnehmung* bezeichnet und basiert auf Rezeptoren des menschlichen Bewegungsapparates, wie zum Beispiel der Ausrichtung der Gliedmaßen, Gelenkstellungen oder

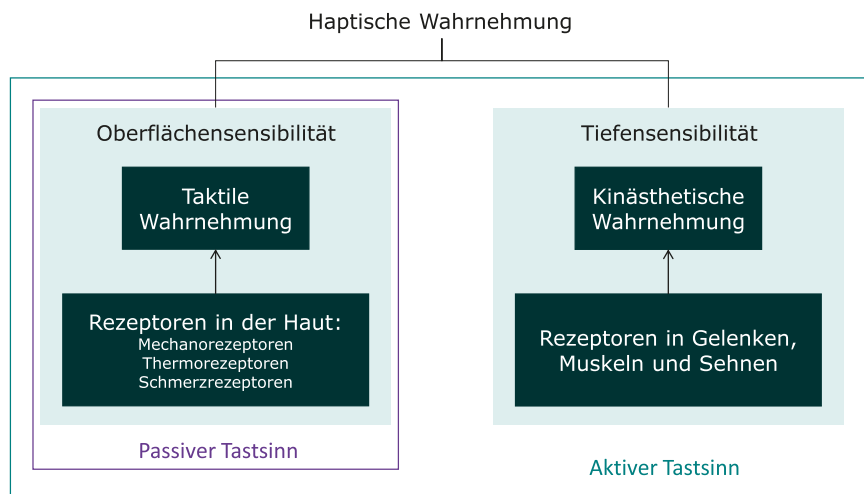


Abbildung 2.1: Komponenten der haptischen Wahrnehmung

Muskelspannungen. Diese Rezeptoren liefern insbesondere Informationen zum Lage-, Kraft- und Bewegungssinn, welche die Eigenwahrnehmung des Körpers ermöglichen.

Im Gegensatz zum passiven Tastsinn wird beim aktiven Tastsinn demzufolge die Kinästhesie (Bewegungsempfindung) mit eingeschlossen [ISO11b]. Schmidt [Sch85a] begründet die Überlegenheit der bewegten Hand gegenüber der ruhenden nicht nur damit, dass mehr Rezeptoren aktiviert werden, sondern auch mit der verminderten Adaption von Rezeptoren. Beispielsweise reagieren einige Mechanorezeptoren bei konstantem Druck auf der Haut nicht mehr, d.h. sie gewöhnen sich schnell an anhaltende Reize (siehe dazu auch [Gol89]). An den Fingerbeeren befinden sich vor allem schnell adaptierende Mechanorezeptoren, weshalb die Finger generell sensibler für dynamische als für statische Stimuli sind.

Laut Gibson [Gib62] ist die Schlussfolgerung von Schmidt allerdings unzureichend, da der Aspekt der Zielgerichtetheit des aktiven Tastens nicht berücksichtigt ist, obwohl dieser beim aktiven Tasten zu einem anderen Empfinden führt als bei der passiven Berührung. Für die Erkennung von Objekten ist nach Schwarz et al. [SPA75] jedoch nicht die Zielgerichtetheit wichtig, sondern die Bewegung über die Haut. Im Fall eines bewegten Objektes auf der passiven Hand sei also die passive Erkennung der aktiven nicht unterlegen. Beispielsweise wurde passives Tasten mittels Niedrig-Frequenz-Vibrationen ebenfalls als effektiv für das Unterscheiden von Texturen bewertet [KAKS05]. Im Allgemeinen ist jedoch für derartige Aufgaben das aktive Abtasten geeigneter, da ansonsten die Erfassung von Informationen erschwert wird. Dies bestätigt auch Katz in seinen Versuchen. Selbst wenn der Reiz mit einer optimalen Bewegungsrate von 15 cm/s unter dem Finger präsentiert wird, ist das aktive Tasten dem passiven überlegen [Kat25]. Dies liege nicht nur daran, dass man selbst bestimmen kann, wie lange man etwas ertastet, sondern dass auch alle Finger am Tastvorgang teilnehmen können. Für eine begrenzte Anzahl an bekannten Formen kann das passive Tasten dennoch eine effektive Strategie sein [HS91a].

An den Fingerspitzen beträgt die *räumliche Auflösung* etwa 1 mm, d.h. zwei Punkte werden ab einem Abstand von 1 mm als zwei Reize identifiziert (Zweipunktschwelle, [Han06]). Auf die tatsächliche Wahrnehmungsschwelle haben jedoch auch Aspekte, wie Übung, Müdigkeit oder Ablenkung, einen großen Einfluss (siehe Diskussion diverser Studien bei [Bor42]). Bei der Frage, ob blinde Menschen eine bessere Tastschärfe (*tactile acuity*) als sehende Menschen besitzen, liefern zahlreiche Studien kontroverse Ergebnisse. Eine umfangreiche Auseinandersetzung mit diesem Thema findet sich beispielsweise in [NB11]. Unabhängig davon, ob die taktilen Fähigkeiten blinder Menschen besser sind oder nicht, sind sie doch aufmerksamer bzw. sorgfältiger, da sie dem taktilen Kommunikationskanal mehr Beachtung schenken als sehende Menschen [War78, Hol89, LMV⁺08]. Dadurch lässt sich die qualitative Genauigkeit des Tastens erhöhen [BW01].

Da die *Aufnahmekapazität* des Tastsinns ($5 \cdot 10^5 \text{ bit/s}$) gegenüber dem Sehsinn (10^7 bit/s) geringer ist [Fra75], wird beim Tasten mehr Zeit zur Wahrnehmung benötigt. Aufgrund der Verschiedenartigkeit beider Sinne können insbesondere folgende Unterschiede in der Wahrnehmung identifiziert werden (siehe [Kob93]):

- Im Vergleich zum Sehen ist Tasten ein Nahsinn, die unmittelbare Objektnähe ist somit Voraussetzung für die Wahrnehmung (vgl. auch [Kat25]).
- Sehen ermöglicht die sofortige Erfassung von Einzelheiten in seiner Gesamtheit, wohingegen die taktile bzw. haptische Wahrnehmung sequentiell erfolgt. Einzelheiten müssen also nacheinander erfasst und anschließend zu einem Ganzen zusammengesetzt werden. Die sequentiell wahrgenommenen Informationen beim Tasten lassen sich allerdings nicht immer präzise in eine geeignete interne Repräsentation integrieren [WLVK08], sodass die Identifikation von Objekten deutlich schwieriger ist als in der visuellen Wahrnehmung.
- Durch das höhere Auflösungsvermögen kann das Auge auch sehr kleine Objekte gut differenzieren, die mittels Tasten nicht erfassbar bzw. deutbar sind.¹
- Sehen ist ein automatisch stattfindender unwillkürlicher Vorgang. Um Informationen aufzunehmen, erfordert das Tasten mit den Händen im Normalfall nicht nur eine bewusste Willensanstrengung, sondern auch viel Zeit und Geduld.²

In der visuellen Wahrnehmung spielen oft so genannte *Gestaltgesetze* eine Rolle, wenn es um die geeignete Visualisierung von Benutzungsoberflächen geht (siehe z. B. [CDT02, Gra08, KS14]). Diese beschreiben wie sich wahrgenommene Elemente priorisieren, gruppieren oder zueinander in Relation setzen. Formuliert wurden die ersten Gestaltgesetze, wie das Gesetz der Nähe, der Ähnlichkeit oder der guten Gestalt, von Max Wertheimer [Wer23]. Nähe ist dabei beispielsweise eine effizientere Möglichkeit der visuellen Gruppierung als Ähnlichkeit, da bei letzterer zunächst die einzelnen Elemente in ihren Eigenschaften erkannt werden müssen [HHC99]. Ein umfassender Überblick über die Prinzipien der Gestaltpsychologie findet sich bei Koffka [Kof35]. Auch bei der taktilen Wahrnehmung wurden bereits einige der Gestaltgesetze untersucht. Neben dem Gesetz der Ähnlichkeit und der Nähe [CNW07b] ist beispielsweise auch das Gesetz der Kontinuität (Gesetz der guten Fortsetzung) [CNW07a] in der taktilen Wahrnehmung anwendbar.

Bei der Interpretation taktil wahrgenommener Reize spielen individuelle Erfahrungen eine große Rolle (siehe u. a. [NB11, RRS04]). Die Zielgruppe blinder Menschen lässt sich grundlegend in zwei Untergruppen einteilen. Während von *Geburt an blinde Personen* nie gesehen haben und sich somit ihr Verständnis vom Raum mit Hilfe des taktilen Sinns entwickeln müssen, profitieren *späterblindete Menschen* von früheren visuellen Erfahrungen, sodass ihr haptischer Sinn durch ihre visuelle Vorstellungskraft bereichert werden kann [HS91b, War78]. Unabhängig davon ist das Trainieren der haptischen Fähigkeiten für blinde Menschen besonders wichtig, um die Leistungsfähigkeit zu steigern [DWK08].

Um den Besonderheiten der taktilen Wahrnehmung gerecht zu werden, ist es beim Entwurf von Kommunikationsmitteln und Benutzungsoberflächen vor allem wichtig, Wahrnehmungsschwellen zu beachten sowie die Linearisierung von Informationen zu ermöglichen. Dies in Kombination mit den Eigenschaften konkreter Darstellungsmedien stellt die Grundlage zur Gestaltung von Hilfsmitteln dar.

¹ Allerdings gibt es auch im Bereich der taktilen Wahrnehmung durchaus Sonderfälle, bei denen ein deutlich höheres Auflösungsvermögen erreicht wird – insbesondere bei schnellen Positionsänderungen von Reizen. Loomis und Collins [LC78] konnten beispielsweise zeigen, dass bei einem Wasserstrahl, der auf die Haut trifft, bereits eine Abweichung von 0,1 mm wahrnehmbar ist.

² Auf der anderen Seite kann die Zeit bis zur Wahrnehmung taktiler Nachrichten aber in einigen Fällen auch geringer als bei visuellen Reizen sein – zumindest wenn es nicht um das Identifizieren komplexer Informationen geht, beispielsweise bei Navigationshinweisen im Auto [EV01].

2.2 Taktile Medien

Zur Aufnahme von Informationen verwenden blinde Menschen verschiedenartige Kommunikationsmittel, die normalerweise den taktilen und/oder auditiven Kanal ansprechen. Neben speziellen Hörbüchern oder Zeitungen in Blindenschrift ist vor allem auch ein angepasster Computerarbeitsplatz wichtig. Die Betrachtung spezieller Mobilitäts- und Alltagshilfen (z. B. Blindenstock, zugängliche Taschenrechner und Uhren usw.) sowie rein auditiver Oberflächen, wie beispielsweise DAISY-Hörbücher (Digital Accessible Information System), wird an dieser Stelle nicht weiter aufgegriffen.

Im Allgemeinen gibt es zahlreiche Anwendungsfälle, wo rein textuelle oder auditive Informationen unzureichend erscheinen. Dazu zählen zum Beispiel Anwendungen, bei denen räumliche Zusammenhänge oder symbolische Aussagen den Kerngedanken darstellen, da diese nur schwer bis gar nicht verbalisierbar sind. Insbesondere kartographische Inhalte und künstlerische Darstellungen erfordern eine eigenständige Erkundung und Interpretation durch den Leser. Ebenso wichtig ist dies bei Inhalten, die sich an die visuelle Darstellung annähern sollen, um den Austausch mit sehenden Personen zu ermöglichen oder visuelle Konzepte zu vermitteln (z. B. graphische Notationen oder Abbildungen im Geometrieunterricht). Hier kann die Einbeziehung eines taktilen Darstellungsmediums ein geeigneter Lösungsansatz sein.

Im Folgenden werden zunächst die Besonderheiten beim Lesen von Blindenschrift sowie beim Erkunden tastbarer Grafiken beschrieben. Anschließend werden konkrete Strategien blinder Menschen beim Umgang mit diesen Medien betrachtet. Auf digitale Hilfsmittel für den Zugang zu Computern und Smartphones wird ab Abschnitt 2.3 detailliert eingegangen. Ein umfassender Überblick über assistive Technologien für blinde und sehbehinderte Menschen findet sich zum Beispiel in [PD09].

2.2.1 Taktiles Lesen

Um blinden Menschen das selbstständige Lesen von Texten zu ermöglichen, entwickelte der Franzose Louis Braille im Jahre 1825 die so genannte *Brailleschrift* (auch Blinden- bzw. Punktschrift). Die Buchstaben dieser tastbaren Schrift bestanden ursprünglich aus 6 Punkten (zwei Spalten mit jeweils drei Punkten, vgl. auch Abbildung 2.2a), was die Darstellung von insgesamt 64 Zeichen ermöglicht. Für die Arbeit mit dem Computer sind allerdings deutlich mehr Zeichen nötig, sodass zwei weitere Punkte hinzugefügt wurden. Die 256 Kombinationen des so genannten *Computerbraille* (bei Verwendung des westeuropäischen Zeichensatzes auch als *Eurobraille* bezeichnet) erlauben im Gegensatz zur 6-Punkt-Schrift nicht nur die Darstellung zahlreicher Sonderzeichen, sondern auch eine Unterscheidung zwischen Groß- und Kleinschreibung sowie die Kennzeichnung von Zahlen innerhalb eines Zeichens. Bei der 6-Punkt-Schrift sind derartige Auszeichnungen nur durch das Voranstellen eines zusätzlichen Zeichens möglich. In der DIN-Norm 32976 [DIN07] sind die Maße für die einzelnen Punkte sowie Abstände innerhalb der Brailleschrift geregelt (vgl. auch Abbildung 2.2b).

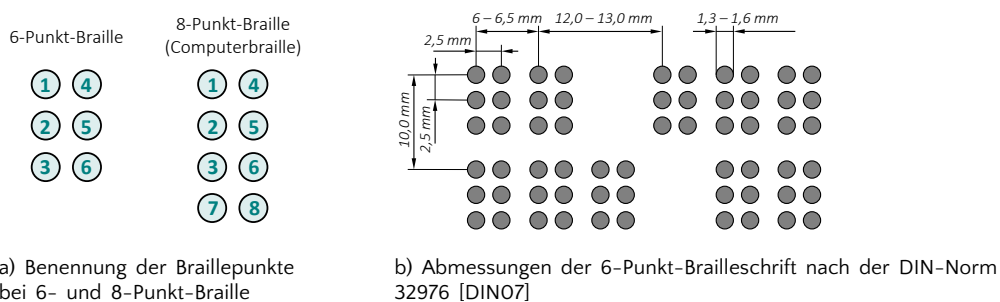


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Brailleschrift

Obwohl keine konkreten Statistiken existieren, wird geschätzt, dass nur etwa 20 % der blinden Menschen in Deutschland die Brailleschrift beherrschen (siehe z. B. [KL96]). Der Hauptgrund hierfür liegt darin, dass der Großteil der blinden Menschen über 60 Jahre alt ist und gerade sehr spät erblindete Personen den Lernaufwand scheuen oder einen unzureichenden Tastsinn besitzen. Gerade für junge Menschen ist Braille allerdings wichtig, um adäquate Lese- und Schreibfähigkeiten zu entwickeln – d. h. Braille ist vor allem hilfreich, um zu lernen, wie Wörter geschrieben werden [PD09, PAD⁺09, Kho11, D'A12]. Auch im Alltag ist es ein wichtiges Hilfsmittel für viele blinde Personen, beispielsweise um Gegenstände, wie Medikamentenverpackungen, CDs oder Ähnliches, zu markieren [Sim11].

Aufgrund meist komplexer und kaum vergleichbarer Bedingungen beim Durchführen von Untersuchungen zur *Braille-Leserate* variieren die Angaben zwar, betragen im Durchschnitt aber etwa 60 – 80 Wörter pro Minute (wpm), wobei erfahrene Braille-Leser zwischen 100 und 150 wpm erreichen [Hud85]. Denninghaus [Den96] hat festgestellt, dass das Lesen auf der Braillezeile gegenüber dem Lesen auf Braillepapier zu einer Reduktion der Leseleistung um durchschnittlich 30 % führt. Im Vergleich dazu erreichen sehende Leser 250 bis 300 wpm [Den96, Fou82]. Auch beim direkten Vergleich zwischen blinden und sehenden Lesern wurde ein signifikanter Unterschied der beiden Benutzergruppen festgestellt [WK00].

Visuelles Lesen ist charakterisiert durch die Anzahl und Dauer von Fixationen, also Pausen in der Augenbewegung, das taktile Lesen hingegen durch Bewegung, d. h. durch die Richtung und Ausdehnung von Handbewegungen [Kus74]. Gründe für die deutlich langsamere Leistung beim taktilen Lesen benennt Goldstein [Gol89] wie folgt. Die beim Lesen von Braille involvierten Handbewegungen sind entsprechend langsamer als Augenbewegungen. Weitere Gründe liegen im geringeren taktilen Auflösungsvermögen sowie der Art der Informationsaufnahme. Visuell werden Wörter als Ganzes wahrgenommen, wohingegen taktil jeder Buchstabe einzeln gelesen und dann erst zu einem Wort kombiniert wird [Fou82]. Andere Studien konnten jedoch zeigen, dass blinde Menschen durchaus auch größere Einheiten der geschriebenen Informationen zusammenfassen, wenn semantische Informationen bzw. Vorwissen in den Lesevorgang einbezogen werden können [SH98, Kru82].

Um die Lesegeschwindigkeit zu erhöhen, spielt allerdings nicht nur derartiges kontextabhängiges Wissen eine Rolle, sondern auch die angewendeten *Lesestrategien*. Dabei wurde häufig diskutiert, welche Hand die beste zum Lesen von Braille sei (vgl. [Mil03]), allerdings scheint dies eher abhängig von individuellen Präferenzen, Lesegewohnheiten und der konkreten Aufgabe zu sein [Mil84]. Was jedoch häufig beobachtet wurde ist, dass beidhändige Strategien die Lesegeschwindigkeit erhöhen [MB85, DAH92], wenn die beiden Hände zumindest teilweise unabhängig voneinander interagieren [Fou82, Hud85]. Zum Beispiel kann auf diese Weise besonders der Wechsel zwischen den Zeilen effizienter durchgeführt werden [Kus74]. Allerdings wird selbst bei zweihändigen Strategien eine Hand primär zum Lesen verwendet, während die andere Hand eine untergeordnete Rolle spielt [Kus74]. Aus diesem Grund konnte Kusajima in seinen Studien nur eine minimale Verschlechterung der Leseraten zweihändiger Leser feststellen, wenn diese nur ihre dominante Hand verwendeten. Eine umfassende Analyse der angewandten Lesestrategien und Handbewegungen bei Punktschrift-Lesern findet sich beispielsweise bei Millar [Mil03].

Ein externer Ansatz zur Erhöhung der Lesegeschwindigkeit stellt die Verkürzung der präsentierten Inhalte dar. Die deutsche Brailleschrift unterscheidet beispielsweise vier *Kürzungsgrade*. Neben der Basisschrift, bei der jedes Braillezeichen einem Buchstaben entspricht, gibt es auch die Vollschrift (Ersetzung von häufigen Lautgruppen), die Kurzschrift (umfangreiche Kürzungsregeln für Buchstabengruppen) sowie die Stenografie. Während das oben erwähnte Computerbraille auf der Basisschrift basiert, wird bei Schrifterzeugnissen normalerweise die Kurzschrift verwendet.

Im Gegensatz zu Schwarzschrifttexten, in denen zur Gestaltung visuelle Attribute wie Schriftart, -größe oder -farbe Verwendung finden, erlaubt die Brailleschrift keine derartige Zeichenformatierung. Die Semantik in Dokumenten muss somit allein durch Absatzformatierungen vermittelt werden. Für die *Seitengestaltung* in Braille-Printmedien wird häufig RTFC (Rich Text Format Compiler)³ verwendet. Das Konvertierungstool erlaubt die Erzeugung von Brailledarstellungen,

³ RTFC Homepage, URL: <http://www.rtfc.de/>

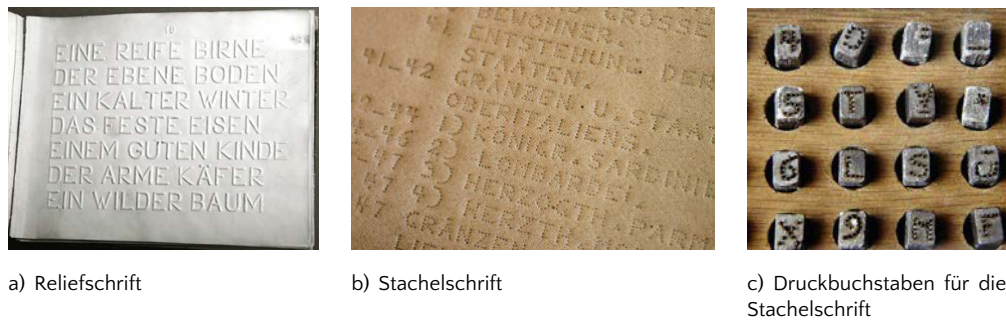


Abbildung 2.3: Taktile Schriften (Bildquelle: Blindenmuseum Berlin [Bli09])

bei denen visuelle Formatierungen geeignet überführt werden. Überschriften können beispielsweise verschiedene Unterstreichungen sowie Einrückungen erhalten und Fett- bzw. Kursivschrift sowie Tabellen sind mit Hilfe von An- und Abkündigungszeichen darstellbar.

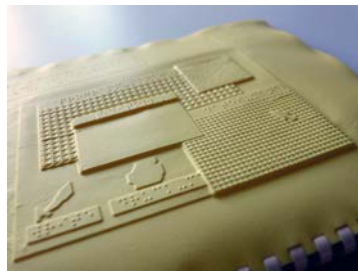
Insbesondere frühere Schwarzschrift-Leser und ältere Menschen haben häufig Probleme beim Erlernen von Brailleschrift [CGWO04]. Die taktile Erfahrbarkeit von herkömmlicher Schreibschrift kann hierfür eine Lösung darstellen. Neben dem Prägen von normalen Schwarzschriftbuchstaben (*Reliefschrift*, siehe Abbildung 2.3a) wurde Anfang des 19. Jahrhunderts von Wilhelm Klein auch die so genannte *Stachelschrift* entwickelt (siehe [Bau26]). Buchstaben werden dabei punktiert dargestellt und seitenverkehrt ins Papier geprägt (vgl. Abbildung 2.3b/c). Da bei derartigen Schriften jeder Buchstabe einzeln abgetastet werden muss, ist das Lesen jedoch sehr zeitaufwendig, sodass es zur Erfassung ganzer Texte nicht effizient anwendbar ist. Chepaitis und seine Kollegen [CGWO04] konnten in ihrer Studie allerdings zeigen, dass Senioren das tastbare lateinische Alphabet sowie eine daran angelehnte speziell für diese Zielgruppe entwickelte Schrift schneller und akkurater lesen konnten als Brailleschrift. Die Leserate lag dabei meist deutlich unter 10 Wörtern pro Minute und kommt dementsprechend bei Weitem nicht an die Leseleistung geübter Braille-Leser heran.

2.2.2 Taktile Grafiken

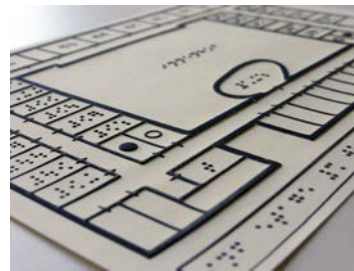
Um blinden Menschen grafische Inhalte zugänglich zu machen, werden häufig Bildbeschreibungen angefertigt. Der Inhalt ist dabei nicht nur stark vom Ersteller abhängig, sondern liefert dem blinden Leser meist auch nur eine Interpretation des Dargestellten. Abhilfe können taktile Grafiken schaffen. Die Verwendung tastbarer Abbildungen an Schulen ist jedoch immer noch nicht selbstverständlich. Lehrer scheuen häufig den Aufwand und zudem haben ihre blinden Schüler oft Schwierigkeiten bei der Interpretation [SA01]. Darüber hinaus liegen weitere Gründe auch am fehlenden systematischen Training blinder Menschen sowie an der hohen Komplexität von Grafiken bzw. der schwierigen Unterscheidbarkeit taktiler Symbole [Ben82]. Obwohl es durchaus Gründe dafür gibt, eine Grafik möglichst ähnlich zur visuellen Vorlage umzusetzen (z. B. wenn visuelle Prinzipien gelehrt werden sollen oder die Kommunikation mit sehenden Mitschülern bzw. Kollegen wichtig ist [Kre64]), ist eine 1-zu-1 Umsetzung aufgrund der Besonderheiten des Tastsinns meist nicht zielführend.

2.2.2.1 Umsetzungsmethoden

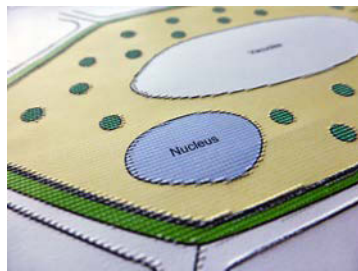
Es existieren zahlreiche Möglichkeiten, um taktile Grafiken zu erstellen (siehe auch [Edm92]). Generell ist die Produktion taktiler Grafiken sehr zeitaufwendig [MBO9, PDO9]. Bei manuellen Verfahren muss normalerweise jede Grafik einzeln angefertigt werden, beispielsweise als *Collage* aus verschiedenartig texturierten Materialien. Werden besonders robuste Materialien verwendet, ist es aber auch möglich, die gebaute Vorlage anschließend im *Tiefziehverfahren* zu vervielfältigen. Dabei wird eine spezielle Folie erhitzt und per Vakuum auf die erstellte Vorlage



a) Tiefziehfolien-Grafik



b) Schwellpapier-Grafik



c) Kombination aus Braille- und Farbdruck



d) mittels 3D-Druck erstellte taktile Karte

Abbildung 2.4: Beispiele zu den verschiedenen Herstellungsverfahren für taktile Grafiken

gezogen. Auf diese Weise können mehrere Abdrucke hergestellt werden. In Abbildung 2.4a ist ein Beispiel für eine auf diese Weise erstellte taktile Grafik zu sehen.

Die Erstellung digitaler Vorlagen ermöglicht eine einfachere und schnellere Verbreitung bzw. Vervielfältigung taktiler Grafiken. Eine gängige Technik basiert beispielsweise auf *Schwellpapier*. Hierbei handelt es sich um ein spezielles Papier, bei dem dunkel bedruckte Stellen anschwellen, wenn sie durch die Lampe eines so genannten Fusers (Schwellkopierer) erhitzt werden (vgl. Abbildung 2.4b). Eine weitere Möglichkeit, aus digitalen Vorlagen taktile Grafiken zu erzeugen, ist die Verwendung von *Brilledruckern*, welche fühlbare Punkte in das Papier stanzen. Speziell für die Ausgabe grafischer Inhalte gibt es neben einfachen Punktschrift-Druckern auch Geräte, die eine höhere Auflösung sowie die Prägung in unterschiedlichen Höhenstufen ermöglichen (z. B. Tiger Embosser bzw. entsprechende Nachfolger der Firma ViewPlus⁴). Einige Geräte, wie der Emprint SpotDot von ViewPlus, erlauben zudem die Kombination von Braille und farbigem Schwarzschriftdruck (siehe Abbildung 2.4c), sodass eine effektivere Kommunikation von sehenden und blinden Menschen möglich wird.

Die Verbreitung kostengünstiger *3D-Drucker* erlaubt neuerdings auch eine einfache Produktion tastbarer dreidimensionaler Modelle (z. B. Bilderbücher [SKY14], taktile Symbole [GPL14], Karten [GP14] und astronomische Grafiken [GCNG15]). Ein Beispiel einer mittels 3D-Druck erzeugten Landkarte ist in Abbildung 2.4d dargestellt (siehe auch [Eic15]). Zudem gibt es mehrere Ansätze, die Produktion taktiler Grafiken zu *automatisieren* [WB97b, CLM104, LIR⁺05, Mie07, GMM14], um den Aufwand zu reduzieren und somit die Verfügbarkeit entsprechender Materialien für betroffene Benutzer zu verbessern.

2.2.2.2 Verbreitung und Anwendungsmöglichkeiten

Es existieren bereits Studien, die sich mit der Arbeitsweise sowie der Schulung von Text- und Grafikumsetzern in den USA beschäftigen [CWO2, LIR⁺05, SIML05]. Um einen Überblick über die Verbreitung taktiler Grafiken im deutschsprachigen Raum sowie über Bedürfnisse

⁴ ViewPlus Produktseite zu Brilledruckern, URL: <https://viewplus.com/braille-printers>

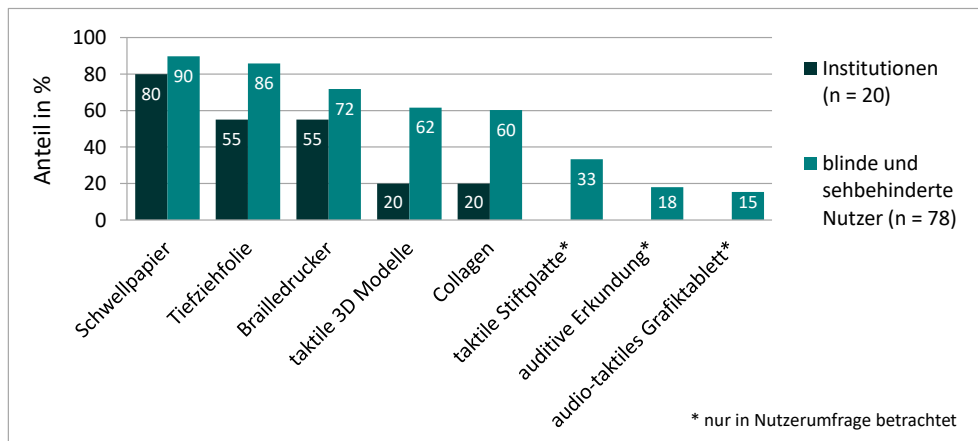


Abbildung 2.5: Verbreitung der verschiedenen Umsetzungsmethoden für taktile Grafiken bei den Institutionen sowie unter Personen der Zielgruppe

der beteiligten Zielgruppen, d.h. sehende Ersteller und blinde Konsumenten, zu erhalten, wurde im Rahmen des Tangram Projekts⁵ eine Onlineumfrage durch die Autorin dieser Arbeit durchgeführt. An der Umfrage haben insgesamt 27 Institutionen, die sich mit der Erstellung taktiler Materialien beschäftigen, sowie 102 blinde und sehbehinderte Einzelpersonen teilgenommen. Die Umfrage und deren Ergebnisse wurden in [PBW14] publiziert. An dieser Stelle sollen lediglich die wichtigsten Erkenntnisse zu Verbreitung und Anwendungsgebieten taktiler Materialien zusammengefasst werden.

Die meisten Einrichtungen (17 von 27) produzieren sowohl taktile Grafiken als auch Bildbeschreibungen. Für die Umsetzung taktiler Materialien sind dabei in 13 von 19 Fällen keine Experten verantwortlich. Zudem ist der Zeitaufwand mit durchschnittlich 1 bis 2 Stunden pro Grafik sehr hoch. Schematische Darstellungen, Diagramme, Geometriezeichnungen und Landkarten werden am häufigsten umgesetzt. In Abbildung 2.5 sind die Ergebnisse der Umfrage bzgl. der Verbreitung der verschiedenen Umsetzungsmethoden dargestellt. Vor allem Schweltpapier ist aufgrund seiner relativ einfachen Anwendbarkeit sehr verbreitet, aber auch Tiefziehfolien und Brailledrucke werden von den meisten Institutionen verwendet.

Auf Seite der blinden und sehbehinderten Konsumenten zeigt sich, dass mehr als dreiviertel der Befragten Erfahrungen mit der Erkundung taktiler Grafiken besitzen. Fast alle der übrigen Personen würden gerne mit taktilen Grafiken in Berührung kommen. Dies zeigt die Wichtigkeit taktiler Materialien. Wie zu erwarten, sind auch bei den Benutzern vor allem Schweltpapier, Tiefziehfolien und Brailledrucke sehr verbreitet (vgl. Abbildung 2.5). Berührungspunkte mit taktilen Grafiken haben die Befragten vor allem in ihrer Freizeit, aber auch in der frühkindlichen Bildung sowie im Berufsleben. Entsprechend der am meisten umgesetzten Grafikarten bei den Institutionen liegen auch bei den blinden Konsumenten die Einsatzgebiete insbesondere im Bereich von Landkarten/Stadtplänen, geometrischen Zeichnungen, Diagrammen und schematischen Abbildungen.

Mehr als die Hälfte der Teilnehmer bevorzugt eine Bildbeschreibung zusätzlich zur taktilen Grafik. Auch die Literatur bestätigt immer wieder den Nutzen der ergänzenden Bereitstellung einer textuellen Beschreibung [Ber72, WPKM94]. Da diese einen ersten Überblick über das Dargestellte liefern kann, ist es möglich das Verständnis zu erhöhen und insbesondere auch Personen mit schlechten taktilen Fähigkeiten beim Erkunden zu unterstützen [LA82]. Zudem können auf diese Weise zusätzliche Informationen angeboten werden, die den Leser durch die Grafik führen und somit beim Interpretieren helfen können [Ben82].

⁵ Das Forschungsprojekt „Tangram“ wurde von Juli 2012 bis Oktober 2015 durch das Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) gefördert. Das Projekt beschäftigte sich mit multimedialen Aufbereitungsmethoden zur Unterstützung der Erstellung von taktilen Fachbuchgrafiken.

Auch die Kombination von taktilem Grafik und Touchtablet ermöglicht die Anreicherung der Grafik mit weiterführenden textuellen Beschreibungen. Das *IVEO System* von ViewPlus [GB06] ist ein Beispiel hierfür und wird vor allem in Unterrichtsszenarien verwendet. Per Fingerdruck auf einzelne Grafikelemente können zusätzliche Informationen oder auch Anweisungen an den Schüler per Sprache ausgegeben werden. Technisch ist die Verknüpfung von taktilem Grafik und Touchposition mittels einer Scalable Vector Graphics (SVG) Datei gelöst, in welcher Titel und Beschreibungen der Objekte gespeichert und entsprechend abrufbar sind [GB06]. Auf diese Weise können in einem Bild Beschriftungstexte in Braille weitestgehend vermieden werden.

2.2.2.3 Richtlinien zur Umsetzung taktiler Grafiken

Beim Erstellen taktiler Darstellungen ist es wichtig, die Besonderheiten der taktilen Wahrnehmung zu berücksichtigen. Insbesondere die geringe Auflösung des Tastsinns führt dazu, dass die visuelle Vorlage meist vereinfacht werden muss. Neben offiziellen Richtlinien, wie beispielsweise denen der Braille Authority of North America (BANA [CBA10]), existieren vor allem proprietäre Empfehlungen einzelner Institutionen (z. B. [Hel01], [JK01], [Sch02] und [Leu08]), mit deren Hilfe die Qualität taktiler Grafiken verbessert werden soll. Allerdings sind die vorhandenen Richtlinien häufig sehr komplex oder zu allgemein gehalten. Besonders für unerfahrene Ersteller ist die praktische Anwendung der Richtlinien meist kompliziert. Die oben vorgestellte Umfrage [PBW14] hat jedoch gezeigt, dass taktile Materialien häufig genau von solchen sehenden Laien, wie Freunden, Kollegen oder Familienangehörigen, produziert werden.

Im Folgenden werden die wichtigsten Grundsätze zusammengefasst, die man bei der Umsetzung von Grafiken für die Nutzung durch blinde Menschen beachten sollte. Eine umfassende Anleitung mit Beispielen wurde von der Autorin der vorliegenden Arbeit in [PB16] veröffentlicht. Die dort zusammengefassten Richtlinien basieren dabei insbesondere auf den oben genannten Quellen sowie eigenen Erfahrungen.

Aufgrund der zeitaufwendigen Erstellung taktiler Grafiken kann es für viele Abbildungen auch ausreichend sein, diese lediglich verbal zu beschreiben. Insbesondere in digitalen Inhalten, wie HTML Seiten oder PDF Dokumenten, ist die Angabe eines Alternativtextes wichtig. Existierende Richtlinien zur Zugänglichkeit von Webinhalten (vgl. Abschnitt 2.3.1) sehen in HTML Dokumenten dazu die Verwendung des `alt`-Attributs vor, da dies derzeit die einzige Möglichkeit für herkömmliche Screenreader darstellt, grafische Inhalte zu interpretieren (vgl. dazu auch [PHD05]). Beim Erstellen von *Bildbeschreibungen* sollte dabei vor allem auf Objektivität, Verständlichkeit, Sinnhaftigkeit und Eindeutigkeit der Aussagen geachtet werden, um eine gute Qualität zu gewährleisten. Zudem sollten die Informationen zwar vollständig, aber dennoch möglichst kurz und prägnant formuliert werden. Entsprechend des Grafiktyps sollten Bildbeschreibungen konsistent und sinnvoll strukturiert werden. Beispielsweise eignet sich ein deduktiver Ansatz, bei dem zunächst der allgemeine Aufbau erklärt wird und anschließend Details und konkrete Daten der Abbildung angegeben werden.

Insbesondere Inhalte, die nur schwer verbalisierbar sind (wie z. B. Landkarten) oder auf Erfahrungen beim eigenständigen Erkunden abzielen, sollten taktil präsentiert werden [Ben82]. Wie bereits erwähnt, ist bei der Umsetzung taktiler Grafiken vor allem auf *Einfachheit* zu achten, ohne dabei dem Leser wichtige Informationen vorzuenthalten oder die Aussage zu verfälschen. Ein *konsistenter Bildaufbau* sowie eine zusätzliche Beschreibung kann dabei den Einstieg in die Erkundung der Abbildung erleichtern. Perspektivische Darstellungen sind im Visuellen üblich, sollten für die taktile Umsetzung jedoch in eine äquivalente zweidimensionale Ansicht überführt werden (siehe auch [WB97a]), wenn es nicht um die Vermittlung perspektivischer Konzepte geht.

Einzelne Bildelemente sollten gut taktil voneinander *unterscheidbar* sein, einen gewissen *Mindestabstand* zueinander aufweisen und nicht zu klein dargestellt werden⁶. Um die *Verfolgbarkeit*

⁶ Im Allgemeinen ist die Wahl geeigneter Abstände und Größen vom Produktionsmedium abhängig. Während beispielsweise für Schwellpapier ein Mindestabstand von 3 mm anzusetzen ist, sollten Elemente bei niedriger auflösenden Medien etwas mehr Abstand zueinander erhalten (z. B. 6 mm bei 20 dpi Brailleausdrucken).

von *Linien* zu ermöglichen, sollten diese einerseits nicht durch andere Elemente unterbrochen werden, andererseits sollten Überschneidungen von Flächen und Linien vermieden werden. Generell sollten bedeutsame Elemente erhaben dargestellt werden, da insbesondere kleine Versenkungen nur schwer wahrnehmbar sind. Zum Verstehen einer Form ist dabei auf der einen Seite deren Umriss hilfreich, auf der anderen Seite kann aber auch eine ausgefüllte Fläche die Form hervorheben [SK84].

In visuellen Darstellungen spielt die Verwendung von Farbe eine große Rolle zur Informationsvermittlung. Auch für blinde Menschen kann beim Erkennen taktiler Grafiken ein Farbwissen sehr hilfreich sein, beispielsweise um Informationen in Diagrammen oder Landkarten zu vermitteln [SK84]. Eine vergleichbare Dimension ist bei der taktilen Wahrnehmung die Oberflächenstruktur, welche in Form taktiler *Texturen* als Alternative zur Farbe verwendet werden kann. Vor allem größere Objekte sollten mit geeigneten, gut unterscheidbaren Texturen gefüllt werden, um eine Differenzierung zwischen Innerem und Äußerem zu gewährleisten. Welche Füllmuster sich konkret zur Verwendung auf der Stiftplatte eignen wird in Kapitel 7.3.2 untersucht.

Abgesehen von audio-taktilen Grafiken, in denen auf die Verwendung von Schrift verzichtet werden kann, sind textuelle Inhalte in einer Abbildung in Braille zu präsentieren. Da Blindenschrift generell sehr viel Platz einnimmt, sollten *Beschriftungen* möglichst kurz gehalten werden. Unnötige Texte sollten somit entfernt oder in eine separate Legende ausgelagert werden. Für die eindeutige Zuordnung zu den entsprechenden Grafikelementen empfiehlt es sich, Beschriftungen möglichst nah zu diesen zu platzieren. Falls dabei auf Führungslinien zurückgegriffen werden muss, sollten diese geradlinig, so unscheinbar wie möglich, aber dennoch gut taktil verfolgbar sein und sich deutlich von den Inhaltslinien abheben. Abkürzungen und taktile Symbole sollten in einer *Legende* erläutert werden. Dabei ist insbesondere die Einhaltung der Skalierung sowie eine Mindestgröße für Bereichs-, Linien- und Punktsymbole wichtig, um die Erkennbarkeit der Symbole zu gewährleisten.

2.2.3 Strategien zum Lesen von Braille und zur Erkundung taktiler Grafiken

Wie bereits erwähnt, nutzen blinde Menschen beim Lesen von Braille-Inhalten ihre Hände in unterschiedlicher Weise und wenden entsprechend verschiedene Strategien an. Obwohl prinzipiell alle Finger für das taktile Lesen geeignet sind, werden meist nur die Zeigefinger verwendet [Fou82]. Wormsley [Wor96] hat in ihrer Arbeit mit Kindern einer Blindenschule folgende *Handbewegungsmuster beim Lesen von Text* identifiziert:

1. rechtshändiges Lesen
2. linkshändiges Lesen
3. rechtshändiges Lesen mit der linken Hand als Marker
4. beidhändiges paralleles Lesen und Zurückkehren beim Zeilenwechsel (synchrones Lesen)
5. beidhändiges Lesen, wobei die linke Hand bereits den nächsten Zeilenanfang sucht, während die rechte Hand die letzte Zeile beendet (teilweise asynchrones Lesen)
6. beidhändiges Lesen, wobei die linke Hand den Zeilenanfang und die rechte Hand das vorherige Zeilenende liest, sodass sich beide in der Mitte einer Zeile treffen (asynchrones Lesen)

In der Studie von Wormsley hat sich gezeigt, dass sich die Strategien der Kinder mit der Zeit von Kategorie 4 zu Kategorie 5 und teilweise auch bis hin zu Kategorie 6 entwickeln. Ob ein blinder Braille-Leser letztendlich ein- oder beidhändig liest und welche Strategie er dabei anwendet, hängt nicht nur vom Lesezweck, sondern insbesondere auch vom pädagogischen Einfluss ab [Hud85].

Für die Erkundung grafischer Darstellungen, wie beispielsweise Diagramme, wurden darüber hinaus weitere Strategien beobachtet. Im Gegensatz zum Lesen von Brailletexten sind dabei lineare Strategien meist unzureichend für eine effektive Erkundung und Orientierung. Laut Helios lässt sich der *Tastvorgang beim Erkunden taktiler Grafiken* in zwei grundlegende Phasen unterteilen [Hel01]: Zuerst wird ein „orientierendes Tasten“ durchgeführt, um einen ersten Überblick über das Gesamtbild zu erhalten. Beim anschließenden „erkennenden Tasten“ wird die Grafik in ihren Einzelheiten erkundet.

Für ein erfolgreiches Erkunden taktiler Grafiken sind nach Berlá und Butterfield [BB77] die folgenden Aspekte wichtig: 1) die Anwendung von systematischen Methoden, 2) gute Fähigkeiten beim Verfolgen von Linien und 3) die Anwendung analytischer Strategien (z. B. Analyse der Unterscheidungsmerkmale von Grafikobjekten = „distinctive features analysis“). In ihrer Studie konnten Berlá und Butterfield zeigen, dass sich die Fähigkeiten beim Arbeiten mit taktilen Grafiken durch entsprechende Anleitung und Übung deutlich verbessern lassen. Allerdings ist das taktile Wahrnehmungssystem auch das einzige, bei dem die Reihenfolge der einzelnen Merkmale des Stimulus durch den Benutzer selber festgelegt wird [BB77]. Die subjektive Wahrnehmung ist demzufolge stark abhängig von der Art der Erkundung.

In diesem Zusammenhang haben zwei *Wissensebenen* Einfluss auf das Verständnis von grafischen Informationen: das konzeptionelle und das praktische Wissen [CG08]. Konzeptionelles Wissen beinhaltet insbesondere Kenntnisse darüber, wie Grafiken aufgebaut sind, also z. B. Wissen über räumliche Beziehungen, geometrische Konzepte oder den Bezug der Grafik zur Realität [BB75]. Unter praktischem Wissen versteht man hingegen die Anwendung möglichst effektiver Strategien beim Erkunden von Grafiken.

Wann der Umgang mit taktilen Grafiken eingeführt werden sollte, ist umstritten (vgl. [Ben82]). Obwohl die möglichst frühe Einführung taktiler Materialien befürwortet wird [Ber81, LA82], scheint auf der anderen Seite ein ausreichend entwickeltes Verständnis von Objekt- und Umgebungskonzepten der Realität eine wichtige Voraussetzung für ein erfolgreiches Verwenden taktiler Grafiken zu sein [Ber72]. Unabhängig davon wurde mehrfach gezeigt, dass das Training geeigneter Strategien wichtig ist und die Fähigkeiten beim Lesen taktiler Grafiken verbessern kann [BB77, UBS95]. Welche konkreten Strategien dabei effektiv sind, ist stark abhängig von der zu lösenden Aufgabe [UBS97]. Generell hat allerdings die Nutzung beider Hände sowie mehrerer Finger, wie auch beim Lesen, einen positiven Einfluss auf die Performanz beim Erkennen von Grafiken [WLVK08, MPTM14]. Darüber hinaus kann das Führen der Hände dabei helfen, taktile Darstellungen besser zu verstehen, da kinästhetische Informationen dabei gezielter vermittelt werden können [MK80].

Lederman und Klatzky [LK87] haben eine Einteilung von allgemeinen Strategien vorgenommen, die sich beim haptischen Erkunden von Objekten unterscheiden lassen. Die Einteilung basiert dabei nicht auf der Gleichartigkeit bzgl. des Aussehens von Handbewegungen, sondern auf der funktionellen Ebene. Da sich die angegebenen Strategien auf die Exploration dreidimensionaler Objekte beziehen, lassen sich nicht alle 1-zu-1 auf die taktile Erkundung flächiger Darstellungen anwenden. In Tabelle 2.1 findet sich eine Zusammenfassung der *Erkundungsprozeduren* sowie deren mögliche Anwendung auf 2,5-dimensionalen Oberflächen. Dabei wird deutlich, dass bei taktilen Grafiken vor allem die Oberflächenbeschaffenheit (Textur) sowie die Form von Objekten eine Rolle spielen. Die relevanten haptischen Erkundungsstrategien nach Lederman und Klatzky sind somit insbesondere die seitliche Bewegung sowie das Verfolgen von Konturen.

In Bezug auf tastbare Grafiken haben Cryer und Gunn [CG08] die folgenden effektiven Erkundungsstrategien zusammengetragen:

- Initiales Abscannen mit beiden Händen, um einen ersten Überblick über die gesamte Grafik zu erhalten (vgl. auch [Ber72])
- Systematischer Ansatz, bei dem auf das initiale Abscannen eine systematische Erkundung folgt (entweder beide Hände oder eine Hand als Referenz)

Tabelle 2.1: Haptische Erkundungsprozeduren (EP) und deren Entsprechungen für die flächige Erkundung taktiler Ausgabemedien*

EP nach [LK87]	Beschreibung bzw. Beispielbewegung	Wahrnehmungseigenschaft	EP bei flächiger Ausgabe
seitliche Bewegung (<i>lateral motion</i>)	schnelles Reiben auf der Oberfläche	Oberflächenbeschaffenheit, Textur	seitliche Bewegung
Ausüben von Druck (<i>pressure</i>)	Eindrücken eines Objektteils	Härte, Nachgiebigkeit	<i>nur relevant für ergonomische Aspekte</i>
statischer Kontakt (<i>static contact</i>)	passives Handauflegen	Temperatur	<i>nicht relevant</i>
nicht-gestütztes Halten (<i>unsupported holding</i>)	Aufheben eines Objektes	Gewicht	<i>nicht relevant</i>
Umfassen (<i>enclosure</i>)	Hand formt sich um die Kontur des Objektes, Wechsel zwischen statischen Umschließen und Bewegen des Objektes in der Hand	globale Form, Volumen	Abtasten der Dichteverteilung nach [Ber72] (Auflegen der ganzen Hand), taktiler Display als Referenzsystem
Verfolgen der Kontur (<i>contour following</i>)	Hand behält Kontakt zur Objektkontur, meist einmalige und gleichmäßige Bewegung mit Anhalten bzw. Richtungswechsel am Ende eines Teilabschnittes	exakte Form, Volumen	Verfolgen der Kontur
Prüfen der Beweglichkeit von Teilen (<i>part motion test</i>)	Ausübung von Kraft auf einen Objektteil während der Rest des Objektes stabilisiert bzw. entgegenbewegt wird	bewegliche Teile	<i>nicht relevant</i>
Prüfen der Funktionalität (<i>function test</i>)	Bewegungen, die bestimmte Funktionen ausüben (z. B. Geräusche machen, Enden zusammen klemmen usw.)	spezielle Funktion	Prüfen auf Gesteninteraktion (z. B. Klicken)

* Collagen und andere Medien, bei denen unterschiedliche und unter Umständen bewegbare Materialien Verwendung finden, werden bei der Betrachtung der Erkundungsprozeduren für flächige Ausgaben ausgeschlossen, da diese im Gegensatz zu „statischen“ Ausgabemedien teilweise erweiterte Möglichkeiten zulassen.

- Verfolgen des Umrisses und Verwendung von Unterscheidungsmerkmalen als Erkennungshilfe (vgl. [BB77])
- Vorrangige Erkundung räumlicher Beziehungen [UBS95] zur Schaffung eines Bezugssystems

Ein *Bezugssystem* ist hilfreich, um die Orientierung und Lokalisierung zu unterstützen. Es kann entweder körperzentriert (Referenzhand) oder extern sein (Lokalisierungspunkte in der Grafik). Für blinde Menschen ist die körperzentrierte Referenz meist besonders hilfreich, um konsistente und zuverlässige Informationen über räumliche Zusammenhänge zu extrahieren [Mil95]. Ein Nachteil der Einteilung von Cryer und Gunn liegt darin, dass keine genauere Betrachtung der systematischen Ansätze vorgenommen wird. Spezielle *Strategien zur Erkundung von Karten*, die bei sehr erfahrenen Benutzern beobachtet werden konnten, finden sich bei Berlá [Ber72]:

- eine Hand als Referenz (linke Hand bleibt am linken Rand der Grafik, um der Lesehand als Referenzpunkt zu dienen)
- horizontal-unidirektional (zeilenweises Erkunden, Start jeweils am linken Rand)
- horizontal-bidirektional (zeilenweises Erkunden, von links nach rechts und wieder zurück von rechts nach links)
- symmetrisch horizontal (linke und rechte Hand erkunden jeweils die linke bzw. rechte Seite der Grafik)
- vertikal-unidirektional (spaltenweises Erkunden, Start jeweils am oberen Rand)
- vertikal-bidirektional (spaltenweises Erkunden, von oben nach unten und wieder zurück von unten nach oben)
- Perimeter bzw. Scannen im Uhrzeigersinn (spiralförmiges Erkunden von außen nach innen)
- gebundene Suche (Einteilung der Grafik in rechteckige Bereiche, um diese einzeln nach Elementen zu durchsuchen)
- Abtasten nach Dichteverteilung (zuerst Überblick über Verteilung von Elementen, danach wird die Erkundung bei den Bereichen mit wenigen Elementen begonnen)
- Speichenrad (eine Hand referenziert das Zentrum der Grafik, die andere Hand erkundet sukzessive vom Zentrum zum Rand)

Laut Millar sind blinde Kinder besser im Erstellen als im Erkennen taktiler Abbildungen menschlicher Figuren [Mil91]. Gründe hierfür liegen laut ihr darin, dass 1) die Erkennung von systematischen Bewegungen abhängt, 2) das Gedächtnis für Bewegungen besser ist, wenn diese selbst erzeugt werden, und 3) Erkennung und Reproduktion von Auffindungshinweisen gesteuert werden, wobei ohne vorherige Hinweise die Produktion einfacher ist als die Erkennung. Daraus ergibt sich auch Millars These, dass die haptische Erkennung indirekt ist und ihre Basis in Bewegungs- oder Ausgabemodellen liegt.

2.3 Screenreader und Braillezeile

Durch die Verfügbarkeit elektronischer Informationen bieten sich für blinde und sehbehinderte Menschen heute deutlich mehr Möglichkeiten, an Informationen zu gelangen, als dies mit rein analogen Medien möglich wäre [PD09]. Für den Zugang zu Computeranwendungen verwenden blinde Menschen so genannte Screenreader. Dabei handelt es sich um spezielle Softwareprogramme, die ihnen eine alternative Benutzungsoberfläche bereitstellen. Der Bildschirminhalt wird dabei einerseits neu aufbereitet und andererseits an entsprechende Ausgabegeräte, wie

Sprachausgabe oder Braillezeile, übergeben. Bekannte Screenreader für den Zugang zu Windows sind unter anderem Jaws⁷ sowie NVDA⁸. Für den Zugang zu Apple Betriebssystemen wurde VoiceOver⁹ entwickelt. Insbesondere sehr erfahrene blinde Benutzer verwenden auch häufig Linux und den dort integrierten Screenreader Orca¹⁰. Aktuelle Studien zur Screenreader Nutzung werden regelmäßig von WebAIM¹¹ durchgeführt.

Der Zugang zu elektronischen Dokumenten kann auch unabhängig von einem PC-Arbeitsplatz erfolgen. Portable Notizgeräte, wie der VarioUltra (siehe auch Abbildung 2.6a) oder der Pronto der Firma Baum¹², verfügen über eine Brailleausgabe mit üblicherweise 12 bis 40 Zeichen sowie einer Braille- oder Standardtastatur zur Eingabe und erlauben nicht nur das Schreiben von Notizen, sondern teilweise auch das Senden und Empfangen von E-Mails sowie das Surfen im Internet. Zur Synchronisation von Daten ist die Verbindung zum PC möglich.

2.3.1 Barrieren beim Zugang zu grafischen Benutzungsoberflächen

Da zu MS-DOS Zeiten das komplette Betriebssystem textbasiert war, konnte der Screenreader die Texte direkt vorlesen. Mit dem Aufkommen der grafischen Benutzungsoberfläche traten für blinde Benutzer allerdings neue Barrieren auf. Insbesondere die für sehende Menschen intuitiven Icons und anderen grafischen Präsentationsformen erschweren den nicht-visuellen Zugang zum Computer.

Boyd et al. [BBV91] haben als Ursache die folgenden drei Barrieren identifiziert. Die *Pixel-Barriere* beschreibt den Umstand, dass Bildschirmausgaben im Pixelformat abgespeichert werden, d. h. als einzelne Bildpunkte, auf die ein Screenreader per se nicht zugreifen kann. Eine weitere Schwierigkeit für blinde Benutzer beim Umgang mit GUIs entsteht durch die häufige Verwendung von Grafiken. Damit blinde Menschen diese wahrnehmen können, müssen textuelle Alternativen bereitgestellt werden. Dies bedeutet allerdings immer einen gewissen Informationsverlust, da insbesondere räumliche Anordnungen nur schwer wiedergegeben werden können. Die übermäßige Bedeutung von Grafiken bei der Vermittlung des Inhalts kann somit schnell in der *Grafik-Barriere* resultieren. Weiterhin führt die fehlende Hand-Auge-Koordination blinder Menschen zur so genannten *Maus-Barriere*. Das in der Arbeit mit GUIs typische und für sehende Benutzer intuitive Eingabegerät kann somit nicht effektiv in der nicht-visuellen Bedienung verwendet werden.

In modernen multimedialen Benutzungsoberflächen kann darüber hinaus die *Multimedia-Barriere* zu Problemen in der Bedienung führen (siehe [PWV09]). Diese tritt insbesondere dann auf, wenn zeitliche Medien nicht durch den Anwender gesteuert werden können, d. h. Funktionalitäten wie Start, Pause und Stopp durch die assistive Technologie nicht oder nur unzureichend bedienbar sind.

Um den Zugang für assistive Technologien zu erleichtern, wurden verschiedene Verordnungen erlassen (u. a. die deutsche Barrierefreie-Informationstechnik-Verordnung, kurz BITV [BIT11], oder die amerikanische Section 508 [Gen98]) sowie Richtlinien definiert, die beim Erstellen von barrierefreien Anwendungen und Webinhalten beachtet werden sollten. Richtlinien zur Zugänglichkeit interaktiver Anwendungen existieren für die verschiedensten Bereiche, z. B. die IBM Accessibility Guidelines für Softwareanwendungen [IBM16], das Matterhorn Protokoll für PDF Dokumente [The14] oder die IMS Guidelines für Lernanwendungen [IMS02]. Als Standard für zugängliche Webinhalte wurden vom W3C die Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.0 [Web08] definiert, welche meist als Basis für nationale und internationale Verordnungen und Checklisten dienen.

⁷ Jaws Produktwebseite der Firma Freedom Scientific, URL: <http://www.freedomscientific.com/Products/Blindness/JAWS>

⁸ Homepage des freien NVDA (NonVisual Desktop Access) Screenreaders, URL: <http://www.nvaccess.org/>

⁹ Webseite von Apple zur Bedienungshilfe VoiceOver, URL: <http://www.apple.com/de/accessibility/osx/voiceover/>

¹⁰ Webseite des Orca Projekts, URL: <https://wiki.gnome.org/Projects/Orca>

¹¹ Webseite zu den Resultaten der aktuellen Screenreader Umfrage von WebAIM (Web Accessibility In Mind), URL: <http://webaim.org/projects/screenreadersurvey6/>

¹² Pronto Produktseite, URL: <http://www.baum.de/cms/de-de/pronto18/>

2.3.2 Datenquellen für Screenreader

Screenreader arbeiten typischerweise in zwei verschiedenen Modi (vgl. [GB94]). In der *Trackingphase* werden Rückmeldungen über die Sprachausgabe in Echtzeit erzeugt, was es dem Benutzer erlaubt, Tastatur- oder Mausektionen sowie daraus resultierende Fokusänderungen zu verfolgen. In der *Reviewphase* hingegen stehen zahlreiche Kommandos zur Verfügung, um die Anwendung in ihrer logischen Struktur unabhängig von laufenden Programmen zu erkunden. Die Anwendungsstruktur wird dabei als so genanntes *Off-Screen-Model* (OSM, siehe auch [Koc94]) in Form eines hierarchischen Baumes abgelegt. Das Konzept des OSM basiert ursprünglich auf dem Abgreifen von Daten an der Grafikkarte (*middle-out Ansatz*, vgl. auch [GW94]) bzw. auf Texterkennung (Optical Character Recognition, OCR) von bereits gerenderten Inhalten (*bottom-up Ansatz*) und wurde als Lösung für die Pixelbarriere entwickelt [BBV90].

Entsprechende Informationsquellen zum Aufbau des OSM sind neben den Informationen zu den auf dem Bildschirm dargestellten Inhalten (*Display Hook*) auch die Eingaben des Benutzers (*Keyboard und Mouse Hook*) sowie interne Anwendungs- bzw. Betriebssystemdaten [BE01]. Da diese Informationen nicht immer ausreichend sind für eine zuverlässige Interaktion mit grafischen Oberflächen, werden häufig auch weitere Quellen verwendet [BE00]. Hierzu zählen insbesondere Zugänglichkeitsschnittstellen, wie Microsoft Active Accessibility (MSAA¹³) und dessen Nachfolger UI Automation (UIA¹⁴), sowie Dokumentenschnittstellen, wie das Document Object Model (DOM¹⁵), für den direkten Zugang zum Inhalt (*top-down Ansatz*). Da auch diese Schnittstellen nicht immer ausreichend bedient werden, bieten viele Screenreader zudem die Möglichkeit an, eigene Anpassungen für konkrete Anwendungen vorzunehmen. Dieses Screenreader-spezifische Scripting kann beispielsweise dazu genutzt werden, die Zugänglichkeit von Anwendungen zu verbessern oder auch Navigationsaufgaben zu automatisieren. Allerdings ist vielen Benutzern das Vorhandensein dieser Funktionalität ihres Screenreaders entweder nicht bewusst oder es fehlt ihnen an programmatischen Fähigkeiten, um ein Script an ihre Bedürfnisse anzupassen [HS04].

2.3.3 Screenreader-Funktionalitäten und deren Bedienung

Zu den Grundfunktionalitäten eines Screenreaders zählt nicht nur das Vorlesen von Inhalten sowie das automatische Ansagen von dynamischen Änderungen (z. B. beim Öffnen eines Dialoges), sondern auch die Bereitstellung von Shortcuts, um ein adäquates Navigieren zu ermöglichen. Die Eingabe erfolgt dabei im Normalfall über eine herkömmliche PC Tastatur. Neben der Bedienung von Desktopanwendungen und Dialogfenstern stellt insbesondere der Zugang zum Internet ein wichtiges Anwendungsgebiet für moderne Screenreader dar. Das vollständige sequentielle Erarbeiten von Informationen ist dabei meist zeitaufwendig. Zudem sind Inhalte trotz der oben genannten Richtlinien häufig schwer zugänglich. Um diese Defizite zu überwinden, wenden Screenreader-Benutzer oft besondere *Bedienstrategien* an. Die folgenden Strategien basieren auf [BBDR10], wobei deren individuelle Anwendung nicht nur abhängig vom Benutzer, sondern auch von der jeweiligen Aufgabe ist:

- Erhöhung der Sprechgeschwindigkeit zur Effizienzsteigerung der ansonsten langsamen seriellen Aufnahme von auditiven Informationen
- Navigation durch die Überschriften eines Dokumentes zum Erlangen einer Übersicht über die Inhalte
- Gezieltes Anspringen von Interaktionsobjekten (z. B. Formularelemente, Sprungmarken wie „direkt zum Inhalt“-Link usw.)

¹³ Microsoft Active Accessibility, URL: [https://msdn.microsoft.com/de-de/library/windows/desktop/dd373592\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/de-de/library/windows/desktop/dd373592(v=vs.85).aspx)

¹⁴ UI Automation Overview, URL: [https://msdn.microsoft.com/de-de/library/ms747327\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/de-de/library/ms747327(v=vs.110).aspx)

¹⁵ Definition des Document Object Models nach dem W3C, URL: <https://www.w3.org/DOM/>

- Stichwortsuche
- Merken und Anspringen von Referenzpunkten (z. B. befindet sich der Produktpreis oft unmittelbar vor oder hinter dem „in den Warenkorb“-Button, sodass man schnell zum Preis kommt, indem man den Button anspringt und von dort aus weiter erkundet)
- Überspringen irrelevanter Informationen (z. B. Sprung zum ersten Textparagrafen, um vorherige Links bzw. Menüs zu überspringen)
- Nutzen von Vorerfahrungen (z. B. zur Zuordnung von unbeschrifteten Formularelementen)

Darüber hinaus wenden viele blinde Benutzer auch Notlösungen an, um Zugang zu unzugänglichen Objekten zu erhalten. Hierzu zählen beispielsweise das sich Merken von Positionen und Funktionalitäten sowie die Emulation von Mauseingaben.

2.3.4 Taktile Ausgabe auf der Braillezeile

Wie bereits erwähnt, können die vom Screenreader aufbereiteten Informationen einerseits auditiv über die Sprachausgabe, andererseits taktil über eine so genannte Braillezeile ausgegeben werden. Braillezeilen ermöglichen die Darstellung eines ausgewählten Bildschirmbereichs in Computerbraille. Die Ansteuerung der einzelnen Punkte (auch Stifte genannt) basiert dabei üblicherweise auf piezokeramischen Biegeelementen (Piezobieger), die beim Anlegen von elektrischer Spannung deformiert werden. Dies führt zum Anheben oder Absenken des entsprechenden Stiftes. Daneben gibt es auch Ansätze zur Vermittlung der Braillepunkte über elektrische Reize; diese wurden allerdings von den Benutzern eher abgelehnt [KKMT01].

Für die Arbeit mit Desktop-PCs oder Laptops sind einzeilige Braillezeilen mit einer Länge von 40 oder 80 Zeichen üblich. Moderne Zeilen sind zudem mit verschiedenen Eingabemöglichkeiten ausgestattet, die ein effizientes Navigieren unabhängig von der Tastatur und auch unabhängig vom Anwendungsfokus ermöglichen. Üblich sind dabei vor allem *Routingtasten*, die es dem Benutzer erlauben, den Cursor auf ein bestimmtes Zeichen zu setzen und somit einen Mausklick zu simulieren. Zudem verfügen vor allem Geräte, welche auch unabhängig von einem Computer betrieben werden können, oft über eine *Brailletastatur* (vgl. Abbildung 2.6a). Im Gegensatz zu einer herkömmlichen PC Tastatur verfügt diese üblicherweise über lediglich neun bzw. zehn Tasten, wobei jede Taste einem bestimmten Braillepunkt entspricht¹⁶. Um einen Buchstaben zu erzeugen, muss der Benutzer alle Tasten, die zu einem Braillezeichen gehören, gleichzeitig drücken.

Einige Braillezeilen bieten daneben auch weitere Eingabemöglichkeiten. Beispielsweise ist in den Braillex Geräten der Firma Papenmeier¹⁷ eine *Navigationsleiste* eingebaut (vgl. Abbildung 2.6b), die sich ähnlich wie ein Joystick verhält. Da sie sich fast über die gesamte Länge der Braillemodule erstreckt, ermöglicht sie dem Benutzer unabhängig von seiner Leseposition ein schnelles und intuitives Verschieben des aktuellen Ausschnitts. Ein besonderer Ansatz bei Braillezeilen der Firma Handytech ist die *ATC Technologie* (active tactile control), welche die Leseposition der Finger erkennen kann [Kip08]. Auf diese Weise kann nicht nur ein automatisches Weiterschalten realisiert werden, sobald der Benutzer das Ende der Zeile erreicht, sondern es ist auch möglich, das Leseverhalten zu analysieren. Dies wird beispielsweise dazu verwendet, den Fortschritt beim Lernen von Braille zu überprüfen und bei Bedarf zusätzliche Hilfestellungen anzubieten. Aufgrund konfigurierbarer Erweiterungen mit spezialisierten Funktionsmodulen lässt sich die VarioPro Braillezeile von Baum¹⁸ stark individualisieren. Unter anderem kann sie durch eine so genannte *taktil-akustische Seitenorientierung* (TASO) ergänzt werden (siehe Abbildung 2.6c). Diese speziellen Module bestehen aus vertikalen und horizontalen Schiebern, deren Position der Position auf dem Monitor entspricht und damit dem Benutzer eine zweidimensionale Orientierung ermöglicht.

¹⁶ Bei der neunten und zehnten Taste handelt es sich um Leertasten.

¹⁷ F.H. Papenmeier GmbH & Co. KG - Braillezeilen, URL: <http://papenmeier.de/produkte.html#braillezeilen-anker>

¹⁸ Baum Retec AG - VarioPro, URL: <http://www.baum.de/cms/de-de/variopro/>



a) VarioUltra Braillezeile mit Notizgerätefunktion und Brailletastatur¹⁹



b) Papenmeier Braillezeile mit Navigationsleiste und Routingtasten



c) TASO Module²⁰

Abbildung 2.6: Braillezeilen

Insgesamt eignen sich Braillezeilen gut zur taktilen Ausgabe von textuellen Informationen, können jedoch nur wenige Hinweise über den grafischen Aufbau von GUIs vermitteln. Vor allem Bilder lassen sich mit Hilfe von Screenreader und Braillezeile lediglich textuell darstellen. Im Normalfall bedeutet dies die Ausgabe von entsprechenden Beschreibungen. Es gibt allerdings auch Ansätze, die ähnlich der *ASCII-Art* (siehe z. B. [XZW10]) normale Buchstaben und Sonderzeichen zur Darstellung von bildlichen Inhalten auf der Braillezeile verwenden [TE09, MC10]. Aufgrund der zeilenweisen Ausgabe sowie den ungleichmäßigen Abständen zwischen den einzelnen Braillezeichen ist für die Integration der Informationen eine hohe mentale Leistung des Benutzers notwendig. Das Erkennen ist damit deutlich schwieriger als bei gedruckten taktilen Grafiken [MC10].

2.4 Explore by Touch auf Smartphones und Tablets

Frühere Mobiltelefone basierten vorwiegend auf Eingaben mittels Hardwaretasten, die in Kombination mit einer integrierten Sprachausgabe auch durch blinde Benutzer effektiv verwendbar waren. Moderne Smartphones besitzen allerdings meist keine physischen Tasten mehr zur Texteingabe und Inhaltserkundung, sondern realisieren derartige Eingaben über berührungsempfindliche Displays (Touchscreens). Für blinde Menschen stellt sich dabei das Problem, dass die Ausgabe mit den Händen erkundet wird und auch die Eingabe auf der gleichen Oberfläche stattfindet. Dies führt zum so genannten *Midas-Touch Effekt* [Jac91]. Das heißt, alle Tastbewegungen auf dem Display könnten potentielle Eingabehandlungen darstellen, was wiederum die unbeabsichtigte Aktivierung von Eingaben zur Folge hätte. Für die nicht-visuelle Nutzung von Touchscreens ist somit eine klare Unterscheidung zwischen dem Erkunden und der Absicht zur Eingabe bzw. der Interaktion mit einem Objekt notwendig.

Eine adäquate Lösung für dieses Problem stellt das *Explore by Touch* Konzept dar. Bei Aktivierung dieses speziellen Interaktionsmodus führt ein einmaliger Berührungskontakt nicht zum Auslösen von Kommandos, sondern macht stattdessen die visuelle Oberfläche auditiv erfahrbar. Auf diese Weise können Informationen von Elementen, wie Inhalt, Art und Status, abgerufen und somit die gesamte Bedienoberfläche erkundet werden. Alternativ zur räumlichen Erkundung des Displays können auch Wischgesten angewendet werden, die das Setzen des Fokus zum nächsten oder vorherigen Element ermöglichen. Dieses lineare bzw. deterministische Erkunden der gesamten Anwendung hat den Vorteil, dass kein Objekt übersehen werden kann. Zur bewussten Interaktion mit Objekten ist eine weitere Berührung nötig, da der Screenreader erst dann die Eingaben an die Anwendung weiterreicht. Dies kann beispielsweise durch die Anwendung eines Doppelklicks gelöst werden oder auch durch die Hinzunahme eines zweiten Fingers. Umgesetzt wird das *Explore by Touch* Konzept unter anderem in den Screenreadern

¹⁹ Bildquelle: <http://www.baum.at/de/produkte/varioultra.htm>

²⁰ Bildquelle: <http://www.baum.de/cms/de-de/taso-modul/>

von iOS (*VoiceOver*²¹) und Android (*TalkBack*²²) Mobilsystemen. Eine ausführlichere Diskussion zur Bedienung von Touchscreens durch blinde Benutzer wurde in [BPSW13] veröffentlicht.

Zur Unterstützung der Interaktion bieten die Screenreader auf mobilen Geräten häufig ähnliche Funktionalitäten an wie die Desktopvarianten. Hierzu zählt beispielsweise das seiten-, zeilen- oder elementweise Durchblättern, was dabei helfen kann, die Orientierung beim kontinuierlichen Verfolgen des Inhalts zu bewahren. Der so genannte „Rotor“ bei VoiceOver erlaubt darüber hinaus auch das gezielte Anspringen von speziellen Interaktionselementen, wie Überschriften oder Links.

Die Verwendung von Gesten stellt eine effiziente Möglichkeit dar, um häufig verwendete Kommandos auf einem Touchscreen auszulösen. In *Slide Rule* werden beispielsweise lediglich vier Grundgesten verwendet, mit deren Hilfe die wichtigsten Funktionalitäten eines Smartphones ohne zusätzliche Hardwaretasten abbildbar sind [KBW08]. Kane et al. [KWL11] geben basierend auf ihren Untersuchungen Empfehlungen zum Entwurf von Gesten für die nicht-visuelle Nutzung. So bevorzugen blinde Anwender beispielsweise vor allem Gesten, die Gerätekanten und -ecken mit einbeziehen, da ihnen diese eine physische Referenz bieten. Auch die Verwendung mehrerer Finger (Multitouch) sowie die Nachbildung von bekannten räumlichen Anordnungen, wie das Layout einer QWERTY bzw. QWERTZ Tastatur, kann blinden Menschen beim Erlernen von Gestensets helfen. Die Ausführung von symbolhaften Gesten, wie Schwarzschriftbuchstaben, bereitet blinden Benutzern hingegen häufig Schwierigkeiten.

Neben der Nutzung integrierter Software-Tastaturen, die auf dem herkömmlichen Tastaturlayout basieren und die Buchstaben entsprechend dem Explore by Touch Konzept ansagen, gibt es zur Eingabe von Text auch Ansätze, die das Konzept der klassischen Brailleeingabe aufgreifen. Während bei *TypeInBraille* die drei Zeilen eines Braillezeichens nacheinander eingegeben werden müssen [MBB11], erlaubt die App *BrailleTouch* die gleichzeitige Nutzung von sechs Fingern zur Eingabe von Braillezeichen auf einem Smartphone. In einer Studie mit blinden Benutzern konnte gezeigt werden, dass bereits nach kurzer Übung eine Übertragung der vorhandenen Brailleschreibfähigkeiten auf die Touchscreen-Eingabe möglich ist [SCF⁺12].

Eine umfassende Untersuchung der Interaktion auf Smartphones findet sich am Beispiel von VoiceOver bei Leporini et al. [LBB12]. Dabei wurde deutlich, dass Probleme in der Nutzung von Touchscreens häufig in der Gebrauchstauglichkeit zu finden sind. Dies beinhaltet vor allem das Fehlen von Informationen zu interaktiven Objekten, Unklarheiten bzw. Inkonsistenzen bei der logischen Navigationsreihenfolge sowie die unzureichende Fokusbehandlung beim Ausfüllen von Formularelementen.

Aufgrund der glatten Oberfläche von Touchscreens sind für die nicht-visuelle Bedienung zudem andere Ansätze zur Vermittlung der Informationen notwendig als dies bei Braillezeilen oder taktilen Grafiken der Fall ist (vgl. [KGBL14]). Bei einem Touchscreen fehlen insbesondere wichtige taktile Hinweise über die Fortführung von Linien, sodass es häufiger zum Kontaktverlust kommt. Laut Klatzky et al. führt dies nicht nur zu einem vorübergehenden Informationsverlust sowie einer erhöhten mentalen Beanspruchung, sondern kann aufgrund zusätzlicher Suchbewegungen auch die bisherige kognitive Vorstellung, welche sich der Benutzer basierend auf den kinästhetischen Informationen aufgebaut hat, – sein so genanntes mentales Modell (vgl. auch Abschnitt 5.1.2) – verzerren.

Dies betrifft auch das Wissen über den Aufbau einer Anwendung, welches nicht nur für die Orientierung [Kal96], sondern auch für die Umsetzung effektiver Interaktionsstrategien wichtig sein kann [KS02]. Ohne haptische Rückmeldung ist dies für blinde Menschen häufig schwierig. Jay et al. [JSHG08] konnten beispielsweise zeigen, dass eine rein auditive Vermittlung von Informationen unzureichend für die Erkennung von Strukturen ist. Eine von der Autorin betreute Arbeit [Sie13] konnte dies bestätigen, da sowohl die Effizienz als auch die Zufriedenheit beim Erkunden taktiler Grafiken durch die Hinzunahme von taktilen Feedback deutlich gesteigert

²¹ VoiceOver for iOS, URL: <http://www.apple.com/accessibility/ios/voiceover/>

²² Android Developers - Accessibility, URL: <http://developer.android.com/design/patterns/accessibility.html>

werden konnte. Auch aus der persönlichen Erfahrung zeigt sich, dass vor allem geburtsblinde Menschen gerne „etwas unter den Fingern haben“.

Die Anbindung einer Braillezeile an ein Smartphone oder Tablet ist bei neueren Geräten zwar möglich, jedoch kann damit nicht das Problem des fehlenden taktilen Feedbacks zur räumlichen Erkundung gelöst werden. Auch die beim Lesen von taktilen Materialien beliebte körperzentrierte Referenz (vgl. Kapitel 2.2.3) ist aufgrund der häufigen Bewegung mobiler Geräte kaum nutzbar [KGBL14]. Zur Orientierung auf Touchscreens können deshalb taktile Marker als *Referenzpunkte* wie bei [BBD⁺13] hilfreich sein, um relevante Elemente bzw. Hauptbereiche einer Oberfläche schneller zu finden. Auch *taktile Overlays* wurden mehrfach verwendet, um nicht zugängliche Touchscreenanwendungen für blinde Menschen bedienbar zu machen (z. B. zur Vermittlung einer Musiknotation [CE01], zur Bedienung einer MP3-Player Anwendung [MBJ08] oder zur Erkundung verschiedener Interaktionselemente auf TableTop Systemen [KMW13]). Allerdings reduzieren fixe Overlays die Flexibilität einer Oberfläche und sind deshalb eher für statische Benutzungsoberflächen sinnvoll (z. B. öffentliche Informationssysteme, Bank- oder Fahrkartenautomaten [CVVH15]).

Auch bezüglich der Eingabe können Probleme beim nicht-visuellen Bedienen von Smartphones auftreten. Fehlende physische Buttons erschweren beispielsweise die Wahrnehmung, ob die Eingabe erfolgreich war, was wiederum zu vermehrten Eingabebefehlen sowie einer reduzierten Eingabegeschwindigkeit führt [BP13]. Technische Umsetzungen, um flache uniforme Touchscreens mit taktilen Feedback zu bereichern und somit diesen Problemen entgegenzuwirken, werden in Abschnitt 2.5.2 vorgestellt.

2.5 Grafisch-taktile und haptische Displays

Ein interaktiver Zugang zu taktilen Grafiken ist über herkömmliche Braillezeilen nur rudimentär und zeilenweise oder ausschließlich auf textueller Ebene, d. h. in Form von Bildbeschreibungen, möglich. Bei Touchscreens ohne taktile Rückmeldung können grafische Oberflächen zwar flächig erkundet werden, allerdings ist die haptische Wahrnehmung dabei nur eingeschränkt in Form von kinästhetischen Informationen zur Lage der Hände und Finger beteiligt. Im Folgenden werden deshalb weitere Möglichkeiten zur Vermittlung von Informationen über die haptische Wahrnehmung vorgestellt. Diese Arbeit beschränkt sich dabei auf Geräte, bei denen die Informationsaufnahme über die Hände erfolgt. Daneben gibt es auch zahlreiche Ansätze, die andere Körperregionen, wie den Unterarm [CC03] oder den Bauch [CBS04, ZWF15], einbeziehen. Diese werden hier allerdings nicht mit betrachtet.

Haptische Displays lassen sich grundlegend basierend auf der Art der Wahrnehmung, die sie ansprechen, in kutane (die Haut betreffende) und kinästhetische Geräte einteilen [VWB06b]. Die Entwicklung haptischer Geräte konzentriert sich nicht nur auf Hilfsmittel für blinde Menschen, also auf so genannte *vision substitution systems*, sondern kehrt auch immer mehr in Geräte des Alltags bei sehenden Menschen ein. Vor allem für Situationen, in denen man seine Augen auf etwas anderes richten sollte, wie zum Beispiel beim Autofahren, wird an entsprechenden Lösungen gearbeitet [EV01, PST⁺10, Con15]. Insbesondere die Erweiterung herkömmlicher Touchscreens mit taktiler Rückmeldung ist ein aktuelles Forschungsfeld [PM03, BPIH10, JKB10]. Aber auch die Anwendung haptischer Systeme im medizinischen, militärischen oder pädagogischen Bereich ist verbreitet (siehe z. B. [CMH05, ESOEC11]).

Der Fokus der folgenden Abschnitte liegt auf Geräten und Hilfsmitteln, die speziell für blinde Menschen entwickelt wurden, um ihnen die Interaktion mit grafischen Benutzungsoberflächen zu erleichtern bzw. zu ermöglichen. Ein umfangreicher Überblick über grafisch-taktile Displays findet sich bei Vidal-Verdú und Hafez [VVH07]. Die Unterteilung erfolgt dort in großflächig-statische und virtuell-dynamische Displays. Abhängig von der jeweiligen Displayart besitzt das ideale Gerät dabei andere Eigenschaften (vgl. Abbildung 2.7). Während beispielsweise die Größe bei virtuell-dynamischen Displays auf die eines Fingers begrenzt sein kann, sollten statische Displays die Erkundung mit beiden Händen unterstützen und dem Benutzer somit eine

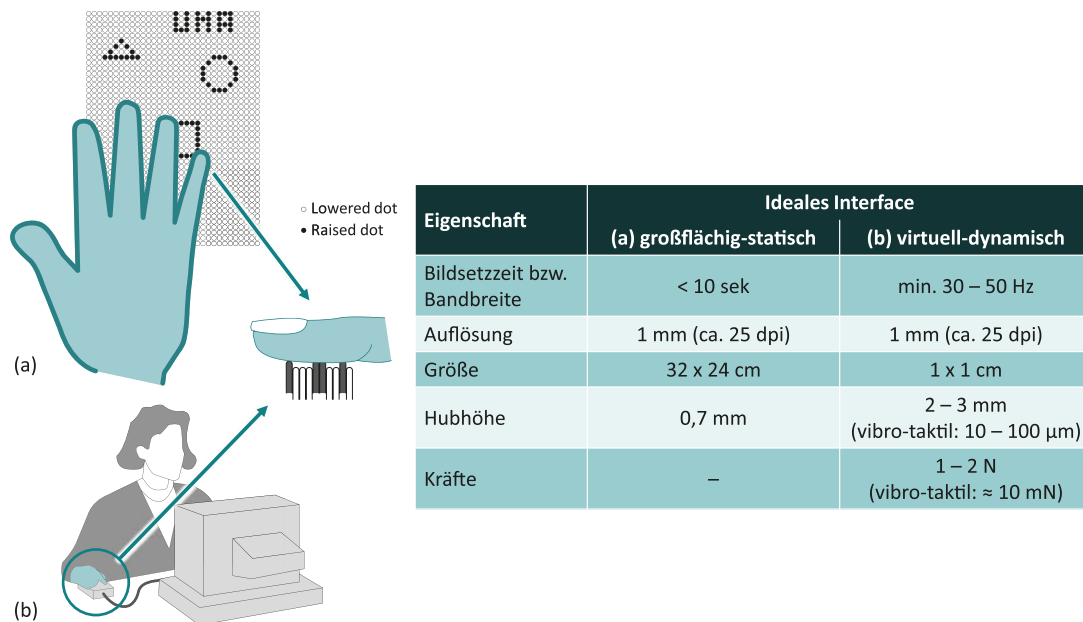


Abbildung 2.7: Einteilung taktiler Displays nach Vidal-Verdú und Hafez [VVH07]

entsprechend großflächige taktile Ausgabe zur Verfügung stellen. Die Bildwiederholffrequenz wiederum muss vor allem bei dynamischen Geräten mindestens 30 bis 50 Hz betragen, ist für statische Displays hingegen weniger wichtig.

Die Einteilung nach Vidal-Verdú und Hafez eignet sich gut für Geräte, die den taktilen Sinn ansprechen, lassen allerdings kinästhetische Geräte außen vor. Im Folgenden erfolgt die Kategorisierung haptischer Displays deshalb, wie in Abbildung 2.8 dargestellt, nach der Anzahl der zur Verfügung gestellten Reizpunkte sowie der Frequenz der taktilen Stimuli.

Geräte mit Krafrückmeldung sprechen dabei vorrangig die kinästhetische Wahrnehmung an und ermöglichen durch die sehr hohen Frequenzen die Illusion einer kontinuierlichen Rückmeldung. Virtuelltaktile Geräte erzeugen häufig vibro-taktile Stimulationen (Vibrationsfeedback) und bieten dabei nur wenige taktile Reizpunkte. Die Rückmeldung wird deshalb meist durch die Bewegung der Hand bzw. Finger über eine virtuelle Oberfläche erzeugt. Grafisch-taktile Displays generieren hingegen vergleichsweise niedrig-frequente Ausgaben, dafür allerdings verteilt auf sehr viele Reizpunkte. Durch die Darstellung als ortskodierte Höhenunterschiede wird dabei insbesondere die Wahrnehmung statischer taktiler Stimuli adressiert.

Bezogen auf den Zugang zu modernen grafischen Benutzungsoberflächen lassen sich zwei hauptsächliche *Aufgabenbereiche* für haptische Displays definieren²³: 1) das Lesen von textuellen Inhalten und 2) das Vermitteln grafischer Informationen. Ein ideales haptisches Display sollte beide Bereiche abdecken, um auf die Verwendung zusätzlicher Geräte, wie beispielsweise einer herkömmlichen Braillezeile, verzichten zu können. Für die Darstellung von Grafiken sind nach O'Modhrain et al. [OGGL15] vor allem Texturen, Konturen sowie globale Formen die wichtigsten Eigenschaften. Zur Vermittlung textueller Informationen über den Tastsinn, stellt Brailleschrift für blinde Menschen die effektivste Möglichkeit dar (vgl. auch Abschnitt 2.2.1). Multimodale Lösungen, bei denen sich haptische und auditive Ausgaben ergänzen, haben sich zwar als effektiv für das nicht-visuelle Erkunden von Grafiken herausgestellt [YBO2, PMPRG11], allerdings sollten Benutzungsoberflächen dem Anwender eine flexible Auswahl der Modalitäten ermöglichen [Ovi07]. Beispielsweise können auditive Ausgaben in manchen Situationen ungeeignet oder unzureichend sein (z. B. wenn der auditive Kanal auf andere Weise belegt ist oder der Benutzer die Schreibweise von Wörtern überprüfen möchte). Aus diesem Grund wird der Fokus im

²³ Diese Aufgabenbereiche werden auch beim Betrachten der konkreten Anwendungsbeispiele der einzelnen Geräte deutlich.

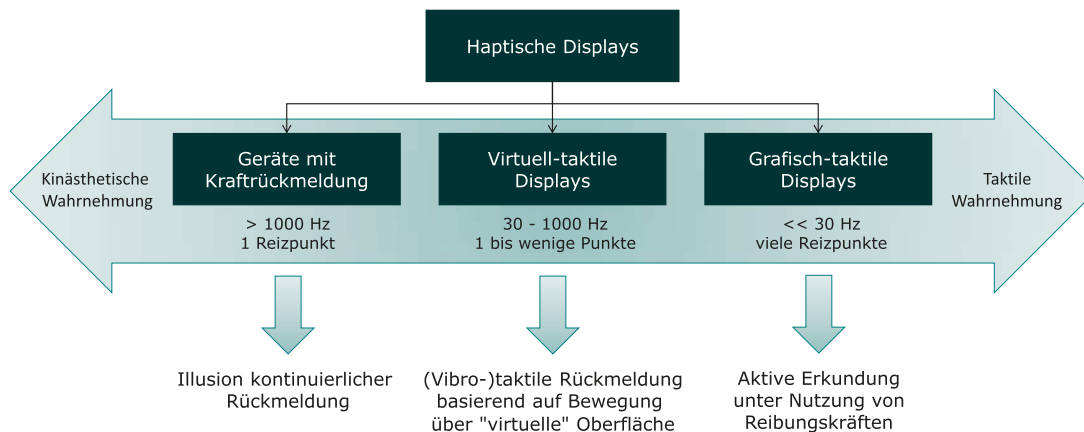


Abbildung 2.8: Einteilung haptischer Displays basierend auf der Anzahl an Reizpunkten sowie der Ausgabefrequenz

Rahmen dieser Arbeit auf die haptischen Eigenschaften der Geräte gelegt. Unter Beachtung der oben genannten Aufgabenbereiche lassen sich zur Bewertung dabei folgende *Kriterien* heranziehen: 1) Darstellbarkeit von Braille und 2) Darstellbarkeit von Texturen, Konturen und globalen Formen.

2.5.1 Geräte mit Krafrückmeldung

Unter dem Begriff Force Feedback bzw. Krafrückkopplung versteht man haptische Rückmeldungen während der Interaktion, die in Form von Kraft an den Benutzer übertragen werden. Die Anzahl möglicher Bewegungsdimensionen für die Krafrückmeldung wird als Freiheitsgrade (degree of freedom, DOF) angegeben.

Force Feedback Mäuse, wie *the Moose* [OG97], ermöglichen blinden Menschen die Erkundung des Bildschirms durch die haptische Vermittlung von GUI-Elementen in Form von Krafrückmeldungen. Die ursprünglich für Computerspiele entwickelte *Wingman Force Feedback Mouse* von Logitech (siehe Abbildung 2.9a) ermöglicht einerseits die Nachahmung von Texturen, andererseits Anziehungskräfte in Richtung eines Zentrums. In Kombination mit einem Screenreader und der Sprachausgabe wird dies beispielsweise zur Erkundung von Landkarten sowie einer Musikanwendung [BJTE04] genutzt. Über Erkundungsfunktionalitäten hinaus wurde die *Wingman Maus* bereits zur Erstellung von Diagrammen verwendet [YKBO3]. Krafrückmeldungen innerhalb eines virtuellen Koordinatensystems erlauben blinden Benutzern dabei das Zählen von Reihen und Spalten, um eigenständig Linien-, Säulen- oder Kreisdiagramme zu erzeugen.

Der *Pantograph* ist ein haptisches Zeigergerät, welches blinden Menschen die zweidimensionale Erkundung grafischer Benutzungsoberflächen ermöglicht [RH94]. Zur Simulation dreidimensionaler Szenen und Objekte eignen sich eher Apparate wie der *Phantom*. Die Geräte der Firma SensAble bestehen aus einem zweigelenkigem Arm, an dem ein drehbarer Stift angebracht ist (vgl. Abbildung 2.9b). Über diesen erfährt der Benutzer die Krafrückmeldungen (3 DOF bei Einstiegsmodellen, 6 DOF beim den neusten Premiummodellen). Zur Positionserkennung verfügen die Geräte über 6 Freiheitsgrade (jeweils drei Translationen und Rotationen über die x-, y- und z-Achse), sodass im Gegensatz zum zweidimensionalen Pantograph eine freie Positionierung im Raum möglich ist. Für den Phantom existieren bereits zahlreiche Anwendungen für blinde Menschen, unter anderem für die Erkundung von Graphen [YRBO1], Umrissgrafiken [SDMRG03] oder Landkarten [KVMT11]. Darüber hinaus wurde der Phantom auch zum selbstständigen Zeichnen von Grafiken durch blinde Menschen benutzt [RGME07].

Ein ähnliches Gerät ist der *Falcon* von Novint, welcher wie auch die *Wingman Maus* ursprünglich zur Erweiterung von Videospielen um immersive haptische Erfahrungen entwickelt wurde. Der



Abbildung 2.9: Force Feedback Geräte

Falcon ermöglicht haptische Interaktionen in drei Freiheitsgraden und verfügt zusätzlich über vier konfigurierbare Tasten, welche Funktionalitäten wie Zoomen oder das Wechseln zwischen verschiedenen Modi ermöglichen. Konkrete Einsatzgebiete liegen unter anderem in Systemen zur Verbesserung der Orientierungsfähigkeiten blinder Menschen in virtuellen Umgebungen [SBCEM14], zur multimodalen Navigation in Diagrammen [ADPS⁺09] sowie zur Unterstützung des naturwissenschaftlichen Unterrichts [NLYS]12].

Ein wesentlicher Nachteil von Force Feedback Geräten besteht darin, dass die taktile Wahrnehmung nicht mit einbezogen wird. Es gibt zwar erfolgreiche Ansätze zur haptischen Vermittlung von Texturen und Oberflächeneigenschaften, zum Beispiel mit Hilfe eines 2 DOF Force Feedback Joysticks [Min95] oder dem Pantograph [SP96], allerdings ist die Darstellung von Braille auch damit nicht möglich. Die Kombination von Geräten mit Krafrückmeldung und zusätzlichen taktilen Stimulatoren kann hierfür eine Lösung darstellen. Beispielsweise konnte gezeigt werden, dass die Unterscheidung von Texturen mit einem zusätzlichen Vibrations Pin-Array (vibro-taktile Stimulator) fehlerfreier und schneller möglich war als mit bloßem Force Feedback [ISO2]. *Pantobraille* bietet hingegen eine Kombination aus einem Pantograph und einer einzelnen Braillezelle [Ram96]. Auf diese Weise ist zwar das Lesen von Braille möglich, allerdings wird im Vergleich zu herkömmlichen Brailledisplays eine deutlich geringere Lesegeschwindigkeit erreicht (unter 20 wpm).

Auch bei Force Feedback Mäusen gibt es Ansätze, diese mit zusätzlicher taktiler Rückmeldung zu versehen. Akamatsu und Sati [AS94] haben beispielsweise einen einzelnen Stift in die linke Maustaste eingelassen, welcher nach oben gegen den Finger gedrückt wird, sobald man etwas am Bildschirm berührt. Evaluiert wurde dieser Ansatz als Unterstützung der visuellen Ausgabe mit sehenden Benutzern. Im Rahmen einer Zielerfassungsaufgabe konnte gezeigt werden, dass das zusätzliche taktile Feedback die Reaktionszeiten zum Klicken eines Schalters verringern kann.

Da die Anzahl an gleichzeitig darstellbaren haptischen Informationen begrenzt ist, ist vor allem im Kontext nicht-visueller Benutzungsoberflächen die Bereitstellung zusätzlicher auditiver Rückmeldungen üblich. Diese *Multimodalität* ist für die erfolgreiche Verwendung von Force Feedback Geräten nicht nur wichtig, sondern kann auch die allgemeine Beanspruchung im Vergleich zur reinen haptischen Ausgabe reduzieren [YBO2]. Zudem können auditive Informationen auch die räumliche Orientierung sowie die Unterscheidbarkeit von Objekten unterstützen [GB98]. Ein großer Vorteil der Verwendung von Force Feedback Geräten, insbesondere in Lehr-Lern-Szenarien, ist, dass sie eingesetzt als Zeigergeräte das physikalische *Führen der Hand* eines Benutzers erlauben. Dies wird beispielsweise zum Trainieren der eigenen Unterschrift [PRB⁺11] oder zum Vermitteln von Prinzipien der direkten Manipulation auf grafischen Benutzungsoberflächen [RAD96] angewendet.

²⁴ Bildquelle: <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/bibuxton/buxtoncollection/detail.aspx?id=130>

²⁵ Bildquelle: http://www.dentsable.com/documents/images/Premium_1.0_Large.jpg

²⁶ Bildquelle: <http://www.dentsable.com/documents/images/LargePHANTOMOmniImage.jpg>

2.5.2 Virtuell-taktile Displays

Zur Einbeziehung der kutanen Wahrnehmung bei der Informationsaufnahme ist das punktuelle haptische Feedback der Krafterückmeldung nicht ausreichend. Auf der anderen Seite können großflächige taktile Displays (siehe Abschnitt 2.5.3) technisch aufwendig und teuer sein. Einen geeigneten Kompromiss können virtuell-taktile Displays bieten, da diese trotz ihres begrenzten Ausgabebereichs die Erkundung großer Informationsräume ermöglichen. Dies kann entweder durch die taktile Stimulation der passiv auf der Ausgabe ruhenden Finger erreicht werden oder durch Berührung hervorgerufene Simulation taktiler Stimuli auf von sich aus glatten Oberflächen.

Ein prominentes Beispiel der ersten Art stellt das *Optacon* (optical-to-tactile converter [BKRS70]) dar. Es konvertiert gedruckte Buchstaben sowie Abbildungen in vibro-taktile Stimulationen an der Fingerbeere. Das Gerät besteht dazu aus einer 24 x 6 Pin großen Matrix taktile Stimulatoren sowie einer Kamera mit der gleichen Anzahl an Fototransistoren. Während der Benutzer mit der einen Hand die Kamera über den zu lesenden Text bewegt, liegen die Finger der anderen Hand auf der vibro-taktile Ausgabe (vgl. Abbildung 2.10a). Die Leserate liegt mit 28 wpm [HZT83] allerdings deutlich unter der von Braille. Zudem ist aufgrund der dynamischen Ausgabe einzelner Schwarzschriftbuchstaben ein umfangreiches Training erforderlich [TA79], um annähernd ausreichende Lesefähigkeiten zu erreichen.

Der *VideoTIM*²⁷ (Taktile Interaktions-Monitor, vgl. Abbildung 2.10b) arbeitet ähnlich wie das Optacon. Die Ausgabe der mit einer Handkamera aufgenommenen visuellen Vorlage erfolgt allerdings nicht vibro-taktile, sondern in Form einer 4 x 4 cm großen taktile Anzeigefläche bestehend aus 256 Tastpunkten. Der Abstand zwischen den einzelnen Punkten beträgt 2,5 mm und entspricht damit dem der Brailleschrift. Die Besonderheit von VideoTIM liegt darin, dass der Anwender die Möglichkeit hat, zwischen aktiver und passiver Tastwahrnehmung zu wählen. Bei der passiven Wahrnehmung erscheint dabei eine taktile Laufschrift. Mit Hilfe verschiedener Eingabetasten ermöglicht das Gerät unter anderem auch die Einstellung von Zoom- und Kontraststufen. Anwendung findet der VideoTIM vor allem bei alltäglichen Aufgaben, wie dem Lesen gedruckter Schwarzschrift Dokumente (z. B. Tageszeitungen), Texten auf Medikamentenverpackungen oder handschriftlichen Notizen, aber auch die Anzeige von einfachen Grafiken ist möglich.

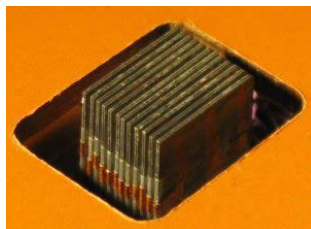
Im Gegensatz zum Optacon besteht das *STReSS Display* (siehe Abbildung 2.10c) nicht aus einzelnen Punkten, sondern aus vertikalen Lamellen, welche laterale Hautstimulationen mit 700 Hz erzeugen [PH03]. Speziell zum Lesen von virtuellem Braille wurde ein darauf basierendes System entwickelt, welches die entsprechende Hautdeformation beim Bewegen über Braillepunkte simuliert [LPHL05]. Das so genannte *Virtual Braille Display* (VBD) ist auf einem seitlich bewegbaren Schlitten angebracht, welchen der Benutzer von links nach rechts bewegt und somit eine fortschreitende Welle lateraler Hautdehnung erfährt. Auf diese Weise erhält der Anwender die Illusion, als würde er seinen Finger über statische Braillebuchstaben bewegen (vgl. passives Lesen bei Weber [Web89b]). Erfahrene Braille-Leser konnten zwar mit Hilfe des VBD Buchstaben erkennen, allerdings ist das Lesen relativ ineffizient und taktile ermüdend [LPHL05].

Wie beim Ansatz der oben erwähnten Force Feedback Maus mit taktile Rückmeldung haben Brayda et al. [BCC⁺11] eine Maus mit einem einzelnen Stift entwickelt. Der in diesem Gerät verwendete Schrittmotor erlaubt dabei die Ausgabe des Stiftes in verschiedenen Höhenstufen. Somit ist eine taktile Rückmeldung zu dreidimensionalen virtuellen Objekten möglich. Andere taktile Mäuse stellen dem Benutzer teilweise mehrere kleine taktile Stiftplatten zur Verfügung. Auf diesen können die Finger das fühlen, was beim Überfahren virtueller Grafiken ausgegeben wird. Ein Beispiel hierfür ist die *VT Player Maus* von virTouch (siehe Abbildung 2.10d), welche an der Position der beiden Maustasten zwei Module mit je 4 x 4 Stiften besitzt. Verwendet wurde die VT Player Maus beispielsweise zur Erkundung von Karten [JP05] und Säulendiagrammen [WB06a]. Dabei hat sich allerdings gezeigt, dass zum einen das Navigieren mit einer Maus ohne visuelle Rückmeldung schwierig ist (Problem der relativen Positionierung, vgl. auch [RPK10]) und

²⁷ ABTIM Produktseite zum VideoTIM3, URL: http://www.abtim.de/home__d_/videotim/videotim.html



a) Optacon

b) VideoTim3²⁸

c) STRess Display (Bildquelle: [LPHLO5])



d) VT Player Maus (Bildquelle: [JP05])

Abbildung 2.10: Virtuell-taktile Displays

zum anderen die erhaltene taktile Information aufgrund der kleinen Ausgabefläche sehr begrenzt ist, was wiederum die Interpretation des Dargestellten erschwert. Im Gegensatz zum einfachen Übertragen von dunklen Pixeln zu erhabenen Stiften verfolgen Pietrzak und seine Kollegen [PCB⁺09] deshalb den Ansatz taktile Icons (Tactons). Diese repräsentieren dabei bestimmte Richtungsangaben, welche zur Führung in Karten oder durch andere Grafiken genutzt werden können. Beispielsweise konnten die richtungsweisenden Icons erfolgreich beim Erkennen von geometrischen Formen verwendet werden [NMO6]. In Experimenten mit sehenden Benutzern (verbundene Augen) hat sich gezeigt, dass statische Icons gegenüber animierten Ausgaben präferiert wurden, da diese aktiv ertastbar sind, ohne dass sich die Darstellung ändert [PPMO6].

Neben den bereits genannten Speziallösungen für blinde Menschen existieren auch zahlreiche Ansätze, um *Touchscreens mit haptischen Feedback* zu bereichern und so die Interaktion intuitiver und effektiver zu gestalten. Entsprechende Techniken reichen dabei von einfachen Vibrationen, die Rückmeldung über getätigte Klicks geben [FS01], bis hin zur Unterstützung von Multitouch Anwendungen und zur Vermittlung von Texturen [JKB10]. Einige Ansätze erlauben auch die dynamische Erzeugung physischer Buttons [HH09, Tac12, BP13], wobei allerdings die möglichen Positionierungen und Formen vorgegeben sind. Nutzbar sind diese Techniken somit vor allem zum Generieren von vordefinierten Tastaturen, die beispielsweise die Texteingabe auf Touchscreens erleichtern können.

Übliche Methoden zur Erzeugung haptischer Effekte auf Touchscreens basieren unter anderem auf den Prinzipien der Massenträgheit (inertial actuation), lateraler Oberflächenbewegung (lateral actuation) oder elektrischer Reizung (capacitive electrosensory interface). Ein Überblick über die einzelnen Technologien findet sich bei Banter [Ban10]. Eine Aktivierung der haptischen Effekte durch laterale Bewegung der Oberfläche wird zum Beispiel bei der *TouchSense Haptic (Tactile) Feedback* Technologie [Imm11, Imm12] verwendet. Dabei handelt es sich jedoch nicht um ein spezielles Gerät, sondern um ein Gesamtkonzept, welches aus API mit standardisierten taktilen

²⁸ Bildquelle: http://www.abtim.com/home__d_/videotim/videotim.html

Mustern sowie entsprechenden Microchips, die bis zu 16 Aktuatoren ansprechen können, besteht. Somit kann diese Technologie prinzipiell in jedem Gerät verbaut werden (z. B. Smartphones und Tablets). Als Grundlage können dabei verschiedenartige Aktuatoren (u. a. ERM Aktuatoren und Piezomodule) verwendet werden.

Sowohl *Senseg* [Art12, WCHL12] als auch *TelsaTouch* [BPIH10] erzeugen hingegen elektrostatische Kräfte, welche in Form von Vibrationen der Haut wahrgenommen werden. Somit können für verschiedene Bereiche der Oberfläche virtuelle Texturen generiert werden. Die Stimulationen sind dabei softwaregesteuert, sodass keine mechanisch-bewegten Teile notwendig sind. Im Gegensatz zur TouchSense Technologie ist allerdings nur ein Signal gleichzeitig auf die gesamte Oberfläche übertragbar und nur bewegte Finger können das taktile Feedback spüren [BPIH10]. In ersten Experimenten mit blinden Benutzern stellte sich heraus, dass bei TeslaTouch gefüllte Formen am leichtesten erkennbar sind [XIP⁺11].

Die Möglichkeiten der haptischen Rückmeldung bei Touchscreens können vor allem auch blinden und sehbehinderten Menschen den Zugang erleichtern. Konkrete Anwendungen finden sich beispielsweise im Erkunden von Grafiken [TBWW11] bzw. Stadtplänen [PMPRG11] sowie in Form einer zugänglichen Wahlkabine [NGK⁺10]. Auch die Ausgabe von Braillebuchstaben in Form von (räumlich-)zeitlich taktilen Vibrationen wurde untersucht [RRL⁺09, JAJ⁺10], ist im Vergleich zum Lesen herkömmlicher Brailleschrift allerdings deutlich langsamer. In anderen Versuchen, bei denen TeslaTouch verwendet wurde, konnte Braille hingegen nicht erfolgreich vermittelt werden [XIP⁺11].

2.5.3 Grafisch-taktile Displays

Die Ausgabe auf grafisch-taktilen Displays ähnelt am meisten den klassischen taktilen Medien, die blinde Menschen zur Kommunikation nutzen, d. h. Brailleschrift und taktile Grafik. Da die Stimuli wie auch bei Braillezeilen durch kleine Taststifte hervorgerufen werden, werden diese Geräte auch als *taktile Pin-Arrays* bezeichnet [WB06b, Ker09]. Zur technischen Umsetzung dieser Displays eignen sich unterschiedliche Aktorprinzipien. Neben Piezobiegern, wie sie auch bei herkömmlichen Braillezeilen verwendet werden, kommen unter anderem auch mechanische [VLH04, FLO⁺13], elektromagnetische [YKK⁺09], pneumatische [VVMN05, RGOB15] oder hydraulische [GLS⁺08, WSJ⁺14] Aktoren zum Einsatz. Eine ausführliche technische Betrachtung zu den verschiedenen Aktorprinzipien findet sich beispielsweise in [Ker09] und [Jun04]. Im Folgenden werden einige auf dem Markt befindlichen grafisch-taktilen Displays vorgestellt.

Die Ausgabefläche des *GWP* (Graphic Window Professional, siehe Abbildung 2.11a) der Firma Handytech besteht aus 24 x 16 Taststiften mit einem Pin-Abstand von 3 mm. In Kombination mit dem Mathematikprogramm Maple wurde das GWP beispielsweise zur Darstellung von mathematischen Funktionsgraphen verwendet [Alb06]. Weitere Einsatzgebiete finden sich vor allem im Vermitteln des Aufbaus grafischer Benutzungsoberflächen sowie dem Erkunden von Diagrammen, geometrischen Figuren oder Ländergrenzen. Neben Zooming- und Panningfunktionen stellt das Gerät auch einen Orientierungsmodus (Bildschirmposition sowie aktueller Ausschnitt werden blinkend dargestellt) sowie einen Übersichtsmodus (gesamter Bildschirminhalt wird dargestellt) zur Verfügung. Zur Bedienung der bereitgestellten Funktionalitäten sind insgesamt 15 Tasten, u. a. vier Cursor- und zwei Zoomtasten, am Gerät verbaut. Durch die Kombination mit einer herkömmlichen Braillezeile ist zudem die parallele Ausgabe von Text und Grafik möglich.

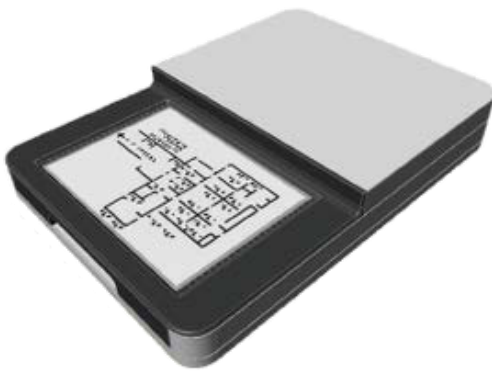
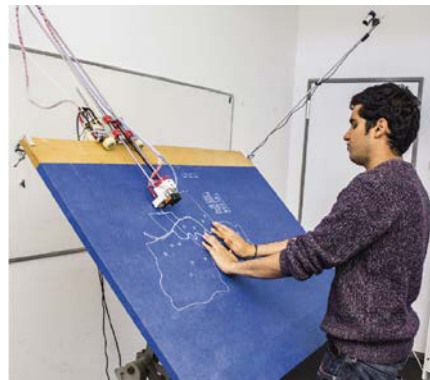
Ein weiteres grafisch-taktilen Display ist das *DotView Tactile Graphics Display* von KGS, welches in der Version DV-2 einen Pin-Abstand von 2,4 mm sowie eine 48 x 32 Pin große Ausgabefläche besitzt. Neben der Anzeige taktiler Grafiken liegen die Anwendungsgebiete dieses Gerätes auch im Erstellen von Zeichnungen. Im Mimizu System wird das DotView Display beispielsweise in Kombination mit einem Ultraschallstift verwendet (vgl. Abbildung 2.11b), um blinden Menschen das selbstständige Zeichnen sowie das Löschen von gezeichneten Inhalten zu ermöglichen [KW04]. Weitere Verwendung findet das Gerät auch in einem System zur Überführung von Handschriftbewegungen in eine taktile Ausgabe auf der Handfläche [Hos12].

²⁹ Bildquelle: <http://www.cs.k.tsukuba-tech.ac.jp/labo/koba/research/dv-1.php>

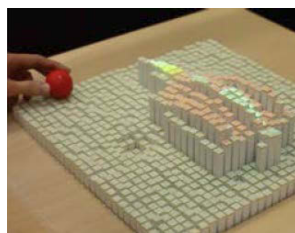
³⁰ Bildquelle: www.tactonom.com



a) CWP (Bildquelle: [Alb06])

b) Mimizu System bestehend aus DotView Display und Ultraschallstift²⁹c) Tactonom Display³⁰

d) Linespace System (Bildquelle: [SRK+16])

e) inFORM Shape Display
(Bildquelle: [FLO+13])**Abbildung 2.11:** Grafisch-taktile Displays

Da die klassische Bauweise, bei der jeder Stift durch einen eigenen Piezobieger angesteuert wird, sehr teuer ist [VVH07, Ker09], konzentriert sich die aktuelle Forschung vor allem auf die Entwicklung kostengünstiger Prototypen (z. B. [VPHS07] und [WSJ⁺14]). Das *Itactl Display* von Smart Technology³¹ basiert beispielsweise auf Elektrorheologischen Flüssigkeiten (ERF) [SM13b], was zwar zu einer längeren Bildaufbauzeit führt, jedoch die Kosten für das Gerät verringern kann. Mit seinen 128 x 64 Punkten ist es deutlich größer als die bisher vorgestellten Displays. Zudem ist das Itactl berührungsempfindlich und besitzt einen Punktabstand von 2,54 mm. Mit über 10.500 Tastpunkten ist das *Tactonom Display*³² (siehe Abbildung 2.11c), welches im Jahr 2017 auf den Markt kommen soll, noch größer. Das Darstellungsprinzip basiert dabei nicht wie üblich auf Stiften, die auf- und abbewegt werden, sondern auf kleinen Kugeln, welche durch einen Magnetmechanismus gesetzt werden. Einen komplett anderen Ansatz verfolgt das *Linespace System*, bei dem mit Hilfe eines 3D-Druckers ein 140 x 100 cm großes Display interaktiv bedruckt wird [SRK⁺16] (vgl. Abbildung 2.11d). Inwieweit diese Technologien dazu geeignet sind, Braille auf eine adäquate Weise darzustellen, müssen zukünftige Studien zeigen.

Projekte wie *inFORM* [FLO⁺13] (siehe Abbildung 2.11e) oder *FEELEX* [IYNK01] gehen einen Schritt weiter, indem sie so genannte „*Shape Displays*“ entwickelt haben. Diese unterstützen mehr als eine Höhenstufe und können somit neben Binärbildern auch Reliefs darstellen. Auf diese Weise lassen sich nicht nur physische Formen simulieren, sondern durch eine zusätzliche Projektion von Bildern auf die Darstellungsfläche auch komplexe visuelle und haptische Ausgaben direkt miteinander kombinieren.

2.5.4 Die taktilen Stiftplatten der Metec AG

Die Untersuchungen und Konzepte der vorliegenden Arbeit basieren auf den grafisch-taktilen Displays der Firma Metec AG³³. Da diese Geräte aus vielen Taststiften bestehen, werden sie im Folgenden auch als „Stiftplatten“ bezeichnet. In Tabelle 2.2 sind die technischen Eigenschaften der verschiedenen Stiftplattenversionen der Metec AG gegenübergestellt. Die beiden aktuellsten Modelle HyperBraille S und Hyperflat waren zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch nicht verfügbar, sodass auf diese nicht näher eingegangen wird.

Betrachtet man die mögliche Bildsetzrate (*Darstellungsfrequenz*) der verschiedenen Stiftplatten-Versionen, so wird ein großer Sprung in Richtung Echtzeitfähigkeit deutlich. Im realen Einsatz reduziert sich gerade beim DMD 12060 die angegebene Setzzeit deutlich, da nur in den wenigsten Fällen alle Stifte gleichzeitig geändert werden müssen und somit das Setzen eines einzelnen Stiftes durchaus höhere Frequenzen erreichen kann. Insbesondere beim Editieren von Braillezeichen sind unmittelbare Änderungen und damit schnelle Setzzeiten der Stifte essentiell, um das interaktive Arbeiten mit Texten zu ermöglichen.

Um eine kontinuierliche Darstellung grafischer Inhalte auf der Stiftplatte zu gewährleisten, ist ein äquidistanter Abstand zwischen den einzelnen Punkten nötig (vgl. auch [TE09]). Für die *Ausgabe von Brailleschrift* bedeutet dies, dass zwischen zwei Zeichen jeweils eine Punktreihe ausgelassen werden muss. Bei der Verwendung von Computerbraille sind somit insgesamt 12 Zeilen á 40 Zeichen auf der Stiftplatte darstellbar. Im Gegensatz zum alten Modell *DMD 12060* entspricht beim *BrailleDis 9000* und *BrailleDis 7200* sowohl der Punktabstand mit 2,5 mm als auch die Punkthöhe mit 0,7 mm dem Standard für die Blindenschrift (vgl. [DIN07]). Lediglich der Abstand zwischen zwei Zeichen ist durch die äquidistante Darstellung etwas größer als im Standard vorgesehen.

Im Rahmen dieser Arbeit finden das *BrailleDis 9000* [VWB08] sowie dessen Nachfolger, das *BrailleDis 7200*, Verwendung (siehe Abbildung 2.12). Beide Geräte basieren auf einer piezoelektrischen Aktuatorik und ermöglichen durch ihre berührungsempfindliche Oberfläche die Eingabe von Multitouch-Gesten. Die *Touchsensorik* ist dabei allerdings aufgrund der

³¹ Spezifikationen zum Itactl Full Page Display von Smart Technology, URL: <http://www.smarttec.co.uk/fpd.htm>

³² Produktseite des Tactonom Displays von Inventivio, URL: www.tactonom.com

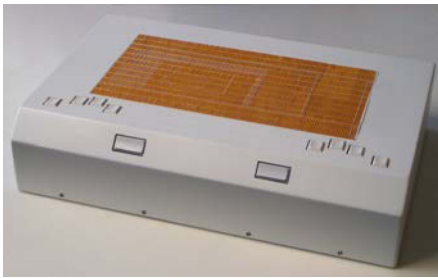
³³ Webseite der Firma Metec AG, URL: <http://web.metec-ag.de/>

Tabelle 2.2: Technische Eigenschaften der Metec Stiftplatten

Eigenschaft	DMD 12060	BrailleDis 9000	BrailleDis 7200
Maße (B x T x H, in mm)	510 x 400 x 85	410 x 235 x 95	410 x 255 x 60
Gewicht	ca. 20 kg	ca. 8 kg	ca. 5,5 kg
Anzahl Pins	7200 (120 x 60)	7200 (120 x 60)	7200 (120 x 60)
Pin-Abstand	3,08 mm	2,5 mm	2,5 mm
Hubhöhe	0,7..0,8 mm	0,7 mm	0,7 mm
Aktuatorik	elektromagnetisch	piezoelektrisch	piezoelektrisch
max. Darstellungsfrequenz (Setzen gesamtes Displays)	> 0,05 Hz (max. Gesamtsetzzeit: 21s)	4-5 Hz	20 Hz
integrierte Bedienelemente	-	10 Tasten (Navigation + Braille)	14 Standardtasten, 2 Wippschalter, 2 Cursorkreuze (je 5 Tasten), 1 Navigationsleiste (4 Richtungen mit jeweils 2 Druckstufen)
Gesteneingabe	Blindenmaus (magnetische Spule, vgl. Kapitel 3.1.3)	kapazitiv, Multitouch (720 Touchsensoren = 2,5 dpi)	kapazitiv, Multitouch (1440 Touchsensoren = 5 dpi)

Realisierung als kapazitive Sensoren technisch anfällig. Einerseits können äußere Einflüsse, wie zum Beispiel die Luftfeuchtigkeit, die Leitfähigkeit der Sensormaterialien beeinflussen oder verändern. Andererseits können innere Einflüsse, wie beispielsweise induzierte Magnetfelder durch das Setzen der Stifte, störend auf die Erkennung von Eingaben wirken. Da die empfangene Berührintensität bei gesetzten und abgesenkten Stiften unterschiedlich stark ist, besteht eine weitere Schwierigkeit darin, die Kalibrierung der einzelnen Sensoren so einzustellen, dass sie die kapazitiven Änderungen in beiden Fällen korrekt interpretieren.

Neben der Möglichkeit zur Gesteneingabe besitzen beide Geräte auch zusätzliche Bedientasten. Das BrailleDis 9000 stellt dem Benutzer eine Brailleeingabetastatur zur Verfügung, die sich vor der taktilen Ausgabebläche befindet und aus acht Fingertasten sowie zwei Daumentasten besteht (vgl. Abbildung 2.12a). Beim Nachfolgemodell BrailleDis 7200 wurden darüber hinaus weitere Bedienelemente hinzugefügt (vgl. Abbildung 2.12b), welche eine intuitivere Eingabe von Kommandos ermöglichen. Die grundlegenden Anforderungen wurden dabei im Rahmen dieser Arbeit mit blinden Benutzern erhoben und in Form eines prototypischen Designs an die Metec AG übergeben (siehe Kapitel 6). Ein weiterer Unterschied des BrailleDis 7200 zum Vorgängermodell besteht in der höheren Touch-Auflösung. Hierfür wurde die Anzahl der Sensoren verdoppelt. Die Module sind mit abnehmbaren Tastkappen versehen, welche durch ihre graue Farbe einen besseren Kontrast zu den weißen Stiften liefern und somit auch ein eventuelles Restsehvermögen der Anwender unterstützen können. Zwei kleine Kunststofffüße links und rechts am Gehäuse erlauben die Neigung der Stiftplatte um etwa sechs Grad (vgl. auch Abbildung 2.12b).



a) BrailleDis 9000



b) BrailleDis 7200

Abbildung 2.12: Taktile Stiftplatten der Metec AG

2.5.5 Bewertung der Eignung der verschiedenen Displayarten

Entsprechend der vorherigen Abschnitte lassen sich die verschiedenen Displayarten einerseits basierend auf der Darstellbarkeit von Braille, andererseits anhand ihrer Eignung zur Vermittlung der Eigenschaften von taktilen Grafiken bewerten. Bezüglich der Brailleschrift konnte bereits gezeigt werden, dass sich Force Feedback Geräte per se nicht dafür eignen. Virtuell-taktile Displays unterstützen teilweise entweder das aktive Lesen einzelner Zeichen oder ein passives Lesen. Dabei werden im Vergleich zum klassischen Braille allerdings deutlich langsamere Leseraten erreicht. Grafisch-taktile Displays eignen sich abhängig von ihrer Auflösung zur Darstellung mehrerer Zeilen von Brailletext gleichzeitig.

In Bezug auf die Eigenschaften taktiler Grafiken (Texturen, Konturen und globale Formen) liegt nach O'Modhrain et al. ein wesentliches Qualitätsmerkmal haptischer Displays darin, inwieweit die entsprechenden Erkundungsprozeduren von Lederman und Klatzky [LK87], d.h. laterale Bewegung, Konturverfolgung sowie Umfassen bzw. Erkunden mit der ganzen Hand (vgl. auch Abschnitt 2.2.3), unterstützt werden. Basierend darauf lassen sich die oben genannten Arten haptischer Displays wie folgt bewerten (vgl. auch [OGGL15]):

- Geräte mit Krafrückmeldung stellen dem Anwender lediglich einen einzelnen Kontaktpunkt zur Wahrnehmung bereit, sodass zwar die laterale Bewegung sowie die Konturverfolgung unterstützt werden, allerdings nicht das Erkunden mit der ganzen Hand.
- Virtuell-taktile Displays unterstützen insbesondere die laterale Bewegung. Das Verfolgen von Konturen wird üblicherweise nur bedingt und das Erkunden mit der ganzen Hand gar nicht unterstützt.
- Aufgrund der großflächigen Ausgabe, die das aktive Lesen mit beiden Händen ermöglicht, unterstützen grafisch-taktile Displays als einzige alle drei Erkundungsprozeduren.

Grafisch-taktile Displays sind somit derzeit die geeignetste dieser Technologien zur Darstellung von Braille und taktilen Grafiken [OGGL15]. Damit scheint es sinnvoll, diese als Zielsystem für zukünftige Anwendungen und zur Überwindung heutiger Barrieren der Informationsgesellschaft stärker zu fokussieren. Insbesondere Displays, deren Darstellungsfrequenz ähnlich hoch wie die herkömmlicher Braillezeilen ist und die damit das Editieren von Braillezeichen in Echtzeit erlauben, könnten zukünftig durchaus einzeilige Brailledisplays ersetzen.

2.6 Zusammenfassung

Zur Wahrnehmung und Interaktion mit der Umwelt verwenden blinde Menschen insbesondere ihren Tast- und Hörsinn. Im Vergleich zur visuellen Wahrnehmung ist dabei die Informationsaufnahme sequentiell und die Aufnahmekapazität geringer, sodass nicht-visuelle Interaktionen

generell zeitaufwendiger sind. Die haptische Wahrnehmung von Texturen und Formen bedingt immer eine Art von Bewegung, wobei das aktive Tasten dem passiven im Normalfall überlegen ist. Dieses Prinzip gilt ebenfalls für das Lesen von Brailleschrift. Im Vergleich zum visuellen Lesen ist das taktile Lesen allerdings deutlich langsamer.

Grafische Inhalte lassen sich nicht nur durch Bildbeschreibungen, sondern auch mit Hilfe von taktilen Grafiken vermitteln. Richtlinien zur Umsetzung von effektiven taktilen Materialien müssen dabei die Besonderheiten der taktilen Wahrnehmung mit einbeziehen. Auf Seiten der blinden Benutzer ist zudem das Training effizienter Strategien zur Erkundung wichtig. Für den Zugang zu grafischen Benutzungsoberflächen verwenden blinde Menschen bereits seit vielen Jahren Screenreader und Braillezeilen. Dabei werden auch hier besondere Bedienstrategien verwendet, um die Effizienz zu steigern und Zugänglichkeitsprobleme zu überwinden. Im Normalfall erlauben diese Hilfsmittel jedoch nur die Vermittlung von textuellen Informationen.

Touchscreens sind mit Hilfe des Explore by Touch Konzepts bedienbar. Die räumliche Erkundung ist allerdings ohne weitere haptische Rückmeldung erschwert. Ansätze zur Erzeugung von haptischen Effekten auf Touchscreens können die Ausgabe zwar durch zusätzliche Rückmeldungen und Texturen bereichern, bieten aber keinen adäquaten Ersatz zur Brailleschrift.

Spezielle Force Feedback Geräte erlauben die Erkundung von sowie die Führung in zwei- oder dreidimensionalen Oberflächen und Grafiken. Ohne zusätzliche taktile Ausgabe ist damit jedoch ebenfalls kein Braille darstellbar. Hilfsmittel, wie das Optacon, basieren auf vibro-taktile Stimulation der Haut und sprechen somit vor allem die kutane Wahrnehmung an. Im Gegensatz zur Braillezeile oder anderen statischen Displays ist damit allerdings kein aktives Abtasten möglich. Andere Bemühungen, wie die Modifikation einer herkömmlichen Maus, waren weniger zielführend, da diese für blinde Menschen als Ein- bzw. Ausgabemedium ungewohnt und aufgrund der fehlenden Hand-Auge-Koordination kaum effektiv nutzbar ist.

Zur Darstellung sowohl von Brailleschrift als auch taktilen Grafiken sind derzeit grafisch-taktile Displays die geeignetste Technologie. Derartige Geräte erlauben nicht nur die Texturerkennung und Konturverfolgung, sondern auch das aktive Erkunden mit beiden Händen. Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit beziehen sich dabei speziell auf die taktilen Stiftplatten der Metec AG (BrailleDis 9000 sowie BrailleDis 7200), welche eine Ausgabefläche von 120 x 60 Taststiften besitzen und aufgrund ihrer berührungsempfindlichen Oberfläche die Eingabe von Multitouch-Gesten ermöglichen.

Darstellung von grafischen Benutzungsoberflächen auf einem flächigen Brailledisplay

Die taktile Anzeigefläche der Stiftplatte kann im Vergleich zur Ausgabe auf einer einzeiligen Braillezeile deutlich mehr Informationen gleichzeitig darstellen. Blinde Menschen sind aufgrund ihrer üblichen Interaktionstechniken eher die lineare Aufnahme von Informationen gewohnt. Für ein effektives und effizientes Arbeiten muss die Ausgabe auf der Stiftplatte entsprechend an die Bedürfnisse der Benutzer angepasst werden. In einer früheren Arbeit der Autorin wurde zur Strukturierung der taktilen Anzeige bereits die Umsetzung eines taktilen Fenstersystems vorgeschlagen [Pre09].

Dieses Kapitel erörtert zunächst mögliche Anwendungsszenarien sowie Anforderungen, die beim Gestalten taktiler Benutzungsoberflächen für flächige Brailledisplays beachtet werden sollten. Aus diesen lassen sich im späteren Verlauf die Forschungsfragen dieser Arbeit ableiten. Zudem werden verwandte Arbeiten vorgestellt, die sich ebenfalls mit der taktilen Stiftplatte beschäftigen. Da sich die Untersuchungen in Kapitel 7 auf die im Rahmen des Fenstersystems umgesetzten Konzepte und Interaktionstechniken beziehen, erfolgt anschließend eine ausführliche Beschreibung der taktilen Informationsvisualisierung, der angebotenen Interaktionsmöglichkeiten sowie dem Zusammenspiel der verschiedenen Softwarekomponenten des Systems anhand konkreter Beispielszenarien. Abschließend erfolgt die Bewertung des Fenstersystems durch blinde Benutzer. Auf diese Weise kann die grundlegende Eignung dieses Ansatzes validiert werden.

3.1 Anwendungsszenarien und Anforderungen an die Interaktion auf flächigen Brailledisplays

Die Konzeption geeigneter Interaktionsmechanismen bedingt die Einbeziehung des verwendeten Geräts, des Benutzers sowie des Kontexts (vgl. Kapitel 1). Bisher wurden das Darstellungsmedium (Stiftplatte) sowie die besonderen Eigenschaften der Zielgruppe (blinde Menschen) betrachtet

(siehe Kapitel 2). Zur Formulierung konkreter Anforderungen an die Interaktion auf taktilen Stiftplatten muss demzufolge noch der Kontext berücksichtigt werden. An dieser Stelle wird deshalb geklärt, wo die Grenzen herkömmlicher Screenreader und Braillezeilen liegen und für welche Nutzungsszenarien sich dementsprechend taktile Flächendisplays besonders eignen.

3.1.1 Benutzerbefragung zu herkömmlichen Arbeitsweisen und möglichen Anwendungsszenarien grafisch-taktile Displays

Um konkrete Erkenntnisse über die Arbeitsweisen blinder Menschen beim Umgang mit ihren assistiven Technologien zu erlangen, wurden im Rahmen dieser Arbeit Interviews mit 8 blinden Menschen (davon 5 geburtsblind und 3 späterblindet, 4 Frauen) im Alter zwischen 22 und 52 Jahren (Durchschnittsalter: 34) durchgeführt. Der Fragebogen für die strukturierten Interviews beinhaltete insbesondere die folgenden Fragen:

1. Wie häufig nutzen Sie einen Computer bzw. ein Smartphone und welche Aufgaben bearbeiten Sie damit typischerweise?
2. Welche Hilfsmittel verwenden Sie dabei?
3. Wie nutzen Sie Ihren Screenreader (Braillezeile vs. Sprachausgabe) und welche Strategien verwenden Sie, um möglichst effizient zu arbeiten?
4. Welche Eingabemethoden nutzen Sie auf Ihrem Smartphone?
5. Bilden Sie sich ein mentales Modell über den Aufbau von Anwendungen?
6. In welchen Situationen stoßen Sie an die Grenzen Ihrer herkömmlichen Methoden und Hilfsmittel?
7. Wie häufig stoßen Sie an derartige Grenzen und was tun Sie in diesem Fall?
8. In welchen konkreten Situationen bzw. für welche Aufgaben würden Sie sich die taktile Stiftplatte als Anzeigegerät wünschen?
9. In welchen Situationen würden Sie die Stiftplatte nicht nutzen, sondern lieber bei Ihren herkömmlichen Hilfsmitteln bleiben?

Die wichtigsten Ergebnisse der Interviews lassen sich wie folgt zusammenfassen. Alle Befragten gaben an, täglich mehrere Stunden am *Computer* zu arbeiten. E-Mail, Internetrecherche und Textverarbeitung sind dabei typische Arbeitsaufgaben, die alle Teilnehmer ausführen. Einige der Befragten nutzen zudem auch Tabellenkalkulations- (6 Benutzer) und Präsentationsanwendungen (3) sowie Tools zur Ausgabe von PDF Dateien (4), zur Dokumentenverwaltung (2) oder zur Programmierung (5). Als Hilfsmittel verwenden alle Befragten Screenreader (vor allem NVDA und Jaws) und Braillezeile. Während ein Benutzer vorwiegend über die Braillezeile arbeitet, benutzen die anderen parallel zur Braillezeile auch die Sprachausgabe. Um zu überprüfen, wie verbreitet die in Abschnitt 2.3.3 vorgestellten Strategien nach Borodin et al. [BBDR10] tatsächlich sind, sollten die Befragten beurteilen, wie häufig sie diese zum effizienten Arbeiten anwenden. Die Ergebnisse dazu sind in Abbildung 3.1 dargestellt.

Sieben Teilnehmer besitzen ein modernes *Smartphone*, welches sie ebenfalls täglich verwenden. Typische Nutzungsszenarien bestehen dabei nicht nur im Telefonieren (7) oder SMS Schreiben (6), sondern auch in der Verwendung von Kalender- (6), E-Mail- (5) und Internetanwendungen (4) sowie im Bereich Navigation (4) und Unterhaltung (u. a. Musik/Radio (6), Hörbücher (5) und Spiele (4)). Fünf der Teilnehmer verwenden VoiceOver (iPhone) und drei Talkback (Android-Smartphone). Drei der iPhone-Anwender koppeln ihr Smartphone teilweise auch mit einer Braillezeile. Als Eingabemethoden nutzen alle Befragten sowohl die Explore by Touch Erkundung als auch die deterministische Navigation mittels Strich-Gesten. Auch das gezielte Anspringen

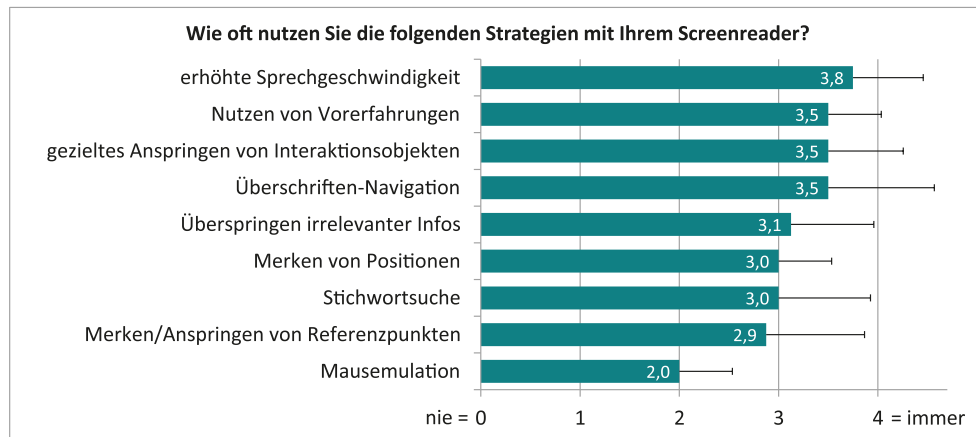


Abbildung 3.1: Häufigkeitsbewertung zur Anwendung der Strategien nach Borodin et al. [BBDR10] durch acht blinde Screenreader-Benutzer (Mittelwerte und Standardabweichungen; $n = 8$)

von Elementen (6), die Steuerung über Gesten (3) oder Sprachbefehle (3) sowie die direkte Eingabe von Brailleschrift (3) werden oft zur Eingabe verwendet.

Alle Teilnehmer gaben an, dass sie sich ein mentales Modell über den Aufbau von interaktiven Anwendungen bilden¹. Eine weitere Frage innerhalb des Interviews bezog sich auf die *Grenzen* der herkömmlichen Methoden und Hilfsmittel. Insgesamt wurde aus den Antworten der Teilnehmer deutlich, dass vor allem grafische Inhalte (6), nicht barrierefreie Anwendungen bzw. Webseiten (6) sowie unübersichtliche Tabellen (4) zu Situationen führen, in denen Screenreader und Braillezeile an ihre Grenzen stoßen. Im Durchschnitt passiert dies bei den Befragten mehrmals pro Woche am Computer und sogar täglich bei der Bedienung des Smartphones. Um das Problem zu lösen, sehen die Teilnehmer das Nachfragen bei sehenden Kollegen bzw. Bekannten eher als letzten Ausweg an. Zu den Möglichkeiten der eigenständigen Problemlösung zählt neben dem Suchen nach einer Alternative (5) auch die Verwendung der Mausemulation (4) sowie das Raten oder Ausprobieren (3). Bei unwichtigen Inhalten bzw. Aufgaben sehen vier der Teilnehmer auch das „Weglassen“ als mögliche Alternative. Die Antworten zeigen deutlich, dass blinden Benutzern ihre Selbstständigkeit beim Umgang mit interaktiven System sehr wichtig ist.

In diesem Zusammenhang könnte die Nutzung flächiger taktiler Displays Abhilfe schaffen. Da alle Befragten bereits Erfahrungen mit der taktilen Stiftplatte sammeln konnten, wurden die Teilnehmer gefragt, in welchen konkreten Situationen bzw. für welche Aufgaben sie sich dieses Gerät wünschen würden. Neben den in Abbildung 3.2 vorgegebenen Antwortalternativen wurden vor allem auch folgende *Anwendungsszenarien* genannt: Tabellenstrukturierung (3), Spiele (3), Lesen längerer Fließtexte (2) sowie Schaffen eines Überblicks über Dokumente bzw. Arbeitsbereiche einer Anwendung (2). Auf der anderen Seite gibt es auch Nutzungskontexte und Aufgaben, bei denen die Benutzer die Stiftplatte nicht verwenden würden, sondern lieber auf ihre herkömmlichen Hilfsmittel zurückgreifen. Insbesondere sind dies mobile Szenarien (4) sowie das Lesen und Schreiben von längeren Texten (3), wobei gerade das Lesen sehr von den persönlichen Benutzerpräferenzen abhängt (zwei andere Teilnehmer konnten sich dies explizit vorstellen).

Zusammenfassend konnten die Interviews zeigen, dass die traditionellen Hilfsmittel vor allem in Bezug auf die Vermittlung räumlicher Zusammenhänge ihre Grenzen haben. Haptische Displays können blinden Benutzern im interaktiven Umgang mit grafischen Inhalten neuartige Möglichkeiten bieten, die mit Hilfe herkömmlicher Screenreader und Braillezeilen nicht effektiv umsetzbar wären. Dies stützt auch die in Abschnitt 2.5 aufgestellte These, dass für haptische Displays vor allem grafische Aufgaben als Anwendungsgebiete gesehen werden, wobei die Benutzer aber auch immer die textuellen Aspekte mit einbeziehen und nicht strikt zwischen beiden trennen.

¹ Lediglich ein geburtsblinder Befragter gab an, sich nur teilweise ein mentales Modell zu bilden.

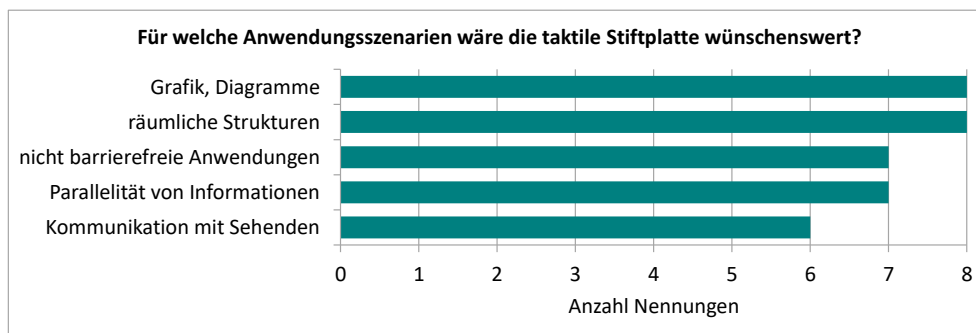


Abbildung 3.2: Mögliche Anwendungsszenarien für flächige Brailledisplays (Mehrfachauswahl möglich, $n = 8$)

3.1.2 Besonderheiten und Anforderungen an die Interaktion auf flächigen Brailledisplays

Großflächige taktile Displays, wie die Stiftplatten der Metec AG, ähneln in Bezug auf die Art der präsentierten taktilen Stimuli üblichen Braillezeilen sehr stark. Mit der Größe des Geräts erhöht sich allerdings nicht nur die Menge der wahrnehmbaren kinästhetischen Informationen [Web00]. Aufgrund der ungewohnten Flächigkeit und der daraus resultierenden hohen Menge an gleichzeitig darstellbaren Informationen können auch besondere Schwierigkeiten in der Bedienung auftreten. Beispielsweise können Probleme in Form von Kontextverlust oder der unvollständigen Inhaltserkundung entstehen, wenn die bereitgestellten Navigations- und Orientierungsmechanismen ungeeignet sind. Adäquate Lösungen zur Überblicksgewinnung, zum Zoomen und Filtern sowie zum Abruf von Details sind demzufolge essentiell [SKNW09]. Da herkömmliche Screenreader taktile Flächendisplays als Ausgabegerät bisher nicht unterstützen, müssen hierfür geeignete grafikfähige Screenreader entwickelt werden. Um für den Benutzer die Umstellung von seinen traditionellen Hilfsmitteln auf grafisch-taktile Geräte zu erleichtern, sollte dabei unter anderem auch auf die Einbeziehung bekannter Interaktionsformen und Arbeitstechniken geachtet werden [SKNW09].

Die wichtigsten Anforderungen im Bereich der *Orientierung und Navigation* innerhalb zweidimensionaler taktiler Ausgaben lassen sich unter anderem von den vorgestellten gängigen assistiven Technologien ableiten. Beim Orientieren können beispielsweise Referenzpunkte helfen. Diese spielen nicht nur beim Arbeiten mit Screenreadern eine große Rolle, sondern auch beim sequentiellen Anspringen im Rahmen der Touchscreen-Interaktion oder in Form von physischen Markierungen auf der Tastatur. Im Kontext der flächigen Darstellung erscheinen lineare Erkundungs- und Orientierungsoperationen nicht immer ausreichend. Zudem ist im Gegensatz zu einzeiligen Braillezeilen die Lokalisierung des fokussierten Elements auf der Stiftplatte deutlich komplexer. Auch das Wiederfinden des Kontexts, beispielsweise nach der Manipulation der Darstellung oder der Rückkehr von einer externen Tastatur (Homing), erfordert einen erhöhten Suchaufwand.

Für die Interaktion auf der Stiftplatte bedarf es somit nicht nur geeigneter Unterstützungsfunktionen, sondern auch der Anwendung von besonderen Bedien- und Erkundungsstrategien. Diese müssen unter Umständen in einem entsprechenden *Benutzertraining* vermittelt werden. Dabei sollte beachtet werden, dass flächige Displays die Nutzung beider Hände erlauben, was wiederum die Effizienz der taktilen Wahrnehmung steigern kann.

Schiewe et al. [SKNW09] sehen in der Zweidimensionalität der Ausgabe auf der Stiftplatte zudem die Möglichkeit, auch blinden Anwendern die Vorteile des „What You See Is What You Get“-Prinzips² in adaptierter Weise bereitzustellen. Dies erlaubt beispielsweise die direkte taktile Layoutkontrolle von Texten oder das Identifizieren von Elementen und Funktionalitäten

² Das WYSIWYG-Prinzip ermöglicht die direkte Ausgabe eines in Bearbeitung befindlichen Dokuments am Bildschirm. Auf diese Weise kann der Benutzer Auswirkungen von Änderungen sofort mitverfolgen.

auf Grundlage von besonderen Gestaltungsmerkmalen. Zweidimensionalität an sich ist dafür allerdings nicht ausreichend. Unter Einsatz von Explore by Touch auf einem herkömmlichen Touchscreen wäre eine adäquate Umsetzung des WYSIWYG-Prinzips beispielsweise schwer anwendbar. Daraus folgt, dass ein zwingendes Merkmal für die Umsetzung eines „What You Feel Is What You Get“ Paradigmas die taktile Grafikfähigkeit des Ausgabegeräts ist.

In diesem Zusammenhang muss auch die *Inhaltspräsentation* an die Besonderheiten der taktilen Wahrnehmung angepasst sein und somit insbesondere den grundlegenden Anforderungen an taktile Grafiken (vgl. Abschnitt 2.2.2.3) genügen. Um die dargestellte Informationsdichte zu senken und den Benutzer innerhalb der Ausgabefläche zu führen, ist die Reduzierung bzw. Zerlegung sowie die feste Platzierung von Informationen hilfreich [SKNW09]. Dies lässt sich beispielsweise in Form eines taktilen Fenstersystems lösen. Basierend auf ersten Ergebnissen von Tests mit taktilen Papierprototypen wurden dabei insbesondere die folgenden Anforderungen an notwendige Interaktionstechniken für den Zugang zu grafischen Benutzungsoberflächen identifiziert (vgl. [Pre09]):

- Ermöglichung der globalen Orientierung auf der Stiftplatte mit Hilfe von nicht überlappenden rechteckigen Bereichen
- Ermöglichung der lokalen Orientierung innerhalb eines Dokuments bzw. einer Anwendung mit Hilfe von vertikalen und horizontalen Bildlaufleisten
- Bereitstellung von Funktionalitäten zur Verwaltung von GUI-Fenstern (u. a. Fensterwechsel, Fenster schließen usw.)
- Bereitstellung von Funktionalitäten zur Verwaltung der Bereiche (insbesondere ein-/ausblenden und Größe ändern)
- Bereitstellung von Funktionalitäten zur Manipulation der taktilen Ausgabe (z. B. Darstellungsart ändern, invertieren)
- Bereitstellung von Funktionalitäten zur Erkundung der dargestellten Inhalte (insbesondere Zooming und Panning)
- Unterstützung beim Lokalisieren des fokussierten Elements
- Unterstützung beim Wiederfinden des Kontexts (z. B. nach der Tastaturbedienung)

Zudem sollten sowohl ein- als auch zweihändige Lesetechniken unterstützt sowie die direkte Interaktion auf der Stiftplatte der Tastatureingabe vorgezogen werden, um häufige Handbewegungen abseits des Geräts zu vermeiden [SKNW09]. Generell sollte das taktile Fenstersystem ein effektives und effizientes Arbeiten mit grafischen Benutzungsoberflächen unterstützen. Die oben genannten Anforderungen sollten demzufolge so umgesetzt werden, dass blinde Benutzer grundlegende Strategien und Paradigmen ihrer gewohnten Arbeitstechniken auf die Stiftplatte übertragen können.

3.1.3 Bisherige Anwendungsgebiete der taktilen Stiftplatte

Bereits seit den 80er Jahren haben sich einige Arbeiten mit der taktilen Stiftplatte beschäftigt. Im Folgenden soll ein kurzer Abriss über die verschiedenen Entwicklungen und Nutzungsgebiete der Metec Stiftplatten gegeben werden. Für die technischen Spezifikationen der Geräte sei auf Kapitel 2.5.4 verwiesen.

Ein wesentliches Anwendungsgebiet bestand bereits sehr früh in der *Darstellung grafischer Benutzungsoberflächen*. Schweikhardt [Sch85c] hat dabei eine statische Grafikdarstellung vorgenommen, bei der die Bildschirmhalte in logische Schichten (Matrix-Ausgabe) zerlegt wurden. Das System erlaubte dadurch bereits die Filterung von Farben und Umrisslinien sowie die Realisierung eines Blink-Effekts. Klöpfer [Kl87] hat ein einfaches Fenstersystem für

ein frühes Modell der Stiftplatte gebaut, welches allerdings mit Kommandoeingaben bedient werden musste. Um erstmals Zeigegesten zu realisieren, entwickelte Weber [Web89a] eine spezielle Blindenmaus, welche die Ortung des Fingers mit Hilfe eines elektromagnetischen Feldes ermöglichte. Später entwickelte Lüthi [Lüt99] für das Stiftplattenmodell DMD 12060 einen ersten Screenreader namens TAWIS („tastbare Windows mit Sprachausgabe“), der neben der Tastatur auch die Eingabe durch die Blindenmaus unterstützt.

Insbesondere die Frage nach der *Darstellung von Grafiken* auf der Stiftplatte hat bereits einige Forscher beschäftigt. Beispielsweise verwendet Rotard [ROE04] SVG zur Überführung von textuellen und grafischen Informationen in eine taktile Form, welche anschließend auf der Stiftplatte gerastert wird. Zeng [ZW10] zeigt basierend auf Open Street Map audio-haptische Stadtpläne auf der Stiftplatte an. Beide Ansätze erlauben zwar die interaktive Erkundung von grafischen Inhalten, allerdings sind sie in keinem Fenstersystem organisiert, welches zusätzliche Referenzpunkte und Kontextwissen vermitteln kann. In einer anderen Arbeit wird ein kleiner Stiftplatten-Prototyp (24 x 15 Stifte) zur Interaktion mit taktilen Grafiken verwendet [NM15]. Um trotz erhöhter effektiver Auflösung Kosten zu sparen, wurde das Display dabei auf eine Art Schlitten-Konstruktion gesetzt, welche horizontal und vertikal bewegbar ist und somit ein virtuelles Erkunden der visuellen Ausgabe ermöglicht. Im Vergleich zu virtuell-taktilen Displays (vgl. Abschnitt 2.5.2) erlaubt dieser Ansatz zwar aufgrund der Displaygröße die aktive Erkundung, allerdings ist der gleichzeitig darstellbare Kontext deutlich geringer als bei einer großflächigen Stiftplatte.

Auch Editoren, die blinden Menschen das eigenständige *Erstellen taktiler Grafiken* erlauben, wurden bereits für die Stiftplatte umgesetzt. Fehrl [Feh85] hat zum Beispiel einen Geometrie-Zeichenarbeitsplatz entwickelt, bei dem die Eingabe von Zeichenbefehlen in natürlicher Sprache erfolgte. Taras [TE09, Tar11] hingegen erlaubt das Zeichnen mittels der Eingabe von Braillezeichen auf herkömmlichen Braillezeilen. Neben der Erstellung monochromer Grafiken, bei dem ein Braillepunkt einem Pixel entspricht, ermöglicht die Nutzung taktiler Farbcodezeichen auch die Erzeugung farbiger Grafiken, bei denen ein einzelnes farbiges Pixel jeweils durch ein Braillezeichen repräsentiert wird. Die auf diese Weise erzeugten Grafiken können auch auf der taktilen Stiftplatte ausgegeben werden.

Power [Pow06] verwendet die taktile Stiftplatte zusammen mit der oben angesprochenen Blindenmaus, um Experimente zu Ungenauigkeiten beim Ermitteln der Fingerposition durchzuführen. So konnte er unter anderem zeigen, dass für eine erfolgreiche audio-taktile Erkundung mit Hilfe der Blindenmaus einzelne Objekte mindestens 4 x 4 Stifte groß und 5 Stifte voneinander entfernt sein sollten. In einer weiteren Arbeit verwenden Power et al. [PGD06] Voronoi Diagramme, um taktile Grafiken zu segmentieren und Vorhersagen zum Erkundungspfad zu treffen. Auf diese Weise wird die Führung durch Grafiken auf der Stiftplatte möglich.

Weitere Anwendungsgebiete für die taktile Stiftplatte finden sich auch bei *kooperativen Szenarien*. Beispielsweise wird das Konzept der Bereiche auf der taktilen Stiftplatte (vgl. Abschnitt 3.2.1.1) bereits zur zugänglichen Darstellung von virtuellen Klassenzimmern [KL15] und Mindmaps [PM14] verwendet. Im Rahmen des HyperBraille Projekts wurden zudem taktile Spiele für die Stiftplatte entwickelt (u. a. Sudoku [GSZ10], Snake und TicTacToe).

3.2 Interaktionstechniken auf Basis des taktilen Fenstersystems

Das in dieser Arbeit umgesetzte taktile Fenstersystem ist im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten HyperBraille Projekts³ (siehe auch [TUD11]) entstanden. In diesem Forschungsprojekt wurde neben den BrailleDis Geräten auch ein entsprechender grafikfähiger Screenreader, der so genannte HyperReader, entwickelt. Das taktile Fenstersystem ist ein Bestandteil des HyperReaders. Im Folgenden werden die einzelnen Aspekte des Fenstersystems im Detail vorgestellt und in den Kontext der Gesamtanwendung eingeordnet.

³ Laufzeit des HyperBraille Projekts: April 2007 bis April 2011

3.2.1 Taktile Informationsvisualisierung

Unter taktiler Informationsvisualisierung soll an dieser Stelle die Darstellung von Inhalten auf der Stiftplatte, d. h. in Form von bestimmten Mustern aus erhabenen und gesenkten Stiften, verstanden werden. Eine taktile Visualisierungsform sollte dabei nicht nur die entsprechende visuelle Darstellung geeignet vermitteln sowie an die Besonderheiten der taktilen Wahrnehmung angepasst sein, sondern auch das mentale Modell blinder Benutzer unterstützen.

Die grundlegenden Überlegungen zur Strukturierung der komplexen Informationen einer GUI auf der Stiftplatte wurden von Schiewe et al. [SKNW09] vorgenommen. Neben der Unterteilung der taktilen Ausgabefläche in mehrere rechteckige Bereiche wurde auch die Bereitstellung verschiedener Sichtweisen auf die zugrundeliegenden Informationen vorgeschlagen. Während die Bereiche definieren, wo sich Informationen auf der Stiftplatte befinden, ermöglichen die so genannten Ansichtsarten wie und wie detailliert die Informationen dargestellt werden. Um die einzelnen Bereiche taktil abzugrenzen, sind sie jeweils durch eine Linie erhabener Punkte voneinander getrennt. Bereiche, die gerade nicht benötigt werden, können auch ausgeblendet sein. In Abbildung 3.3 ist das Konzept von Schiewe et al. zusammengefasst.

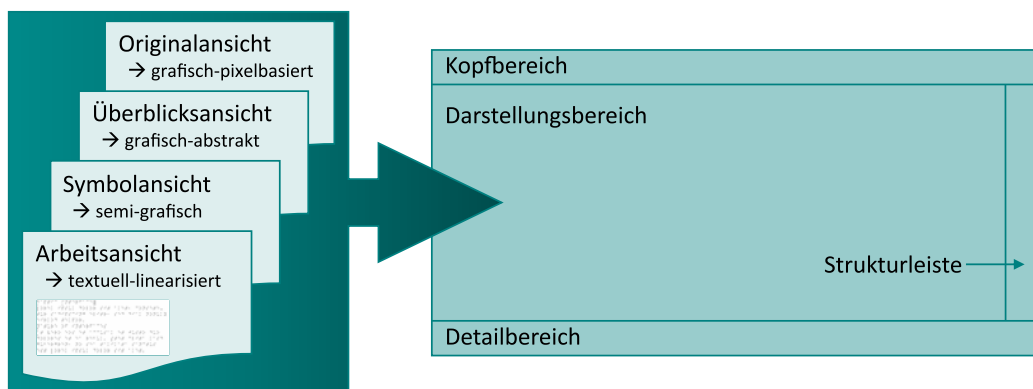


Abbildung 3.3: Konzept der Ansichten und Bereiche nach Schiewe et al. [SKNW09]

In Vorarbeiten zu der vorliegenden Arbeit (siehe [Pre09]) wurde das Bereichskonzept überarbeitet und um zwei zusätzliche Bereiche (*Ansichtsartenliste* und *Fenstertitel-Leiste*) ergänzt. Um die Orientierung auf der Stiftplatte zu unterstützen, wurden zudem taktile *Scrollbar* (siehe Abbildung 3.4b) sowie eine weitere Form der Visualisierung eingeführt, der so genannte Übersichtsmodus. Dieser ist vergleichbar mit dem Orientierungsmodus beim GWP [Alb06] und wurde später als *Minimap* bezeichnet. Im Gegensatz zu den Ansichtsarten von Schiewe et al. dient die Minimap allerdings nicht der Erkundung bzw. dem Lesen von Inhalten. Stattdessen stellt sie einen separaten Modus dar, der dem Benutzer unabhängig von der gewählten Visualisierungsform einen Überblick über das Gesamtdokument ermöglicht. Hierfür wird eine verkleinerte Darstellung des gesamten GUI-Fensters auf der Stiftplatte angezeigt, wobei der aktuelle Ausschnitt mit Hilfe eines blinkenden Rahmens aus sich auf und ab bewegenden Stiften markiert wird⁴ (vgl. Abbildung 3.4a).

Im Folgenden werden die Ansichtsarten sowie die Bereiche des Fenstersystems ausführlich vorgestellt. In ähnlicher Weise wurde die Beschreibung des Fenstersystems auch in [PWS10] und [BPSW13] veröffentlicht.

⁴ In Computerspielen sind Minimaps beispielsweise üblich, um dem Spieler die Orientierung innerhalb einer komplexen Umgebung zu erleichtern. Im Gegensatz zur visuellen Darstellung genügt es in einer taktilen Ausgabe jedoch nicht, den aktuellen Standort mit einem Symbol oder farbigen Rahmen zu markieren, da die Aufmerksamkeit des Benutzers geeignet darauf gelenkt werden muss.

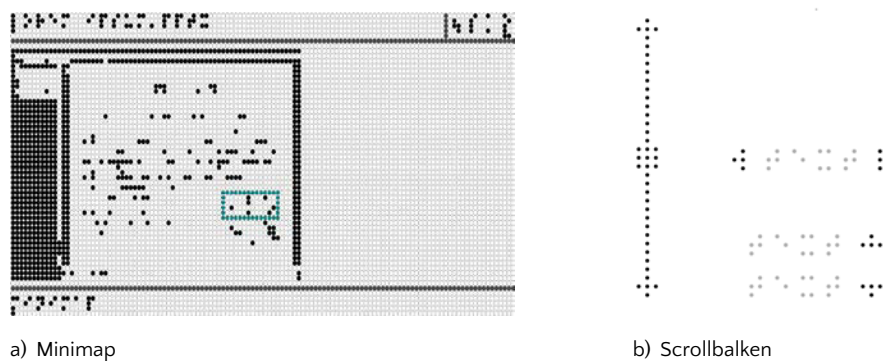


Abbildung 3.4: Orientierungshilfen für die taktile Ausgabe auf der Stiftplatte: a) Darstellung der Minimap, bei welcher der aktuelle Ausschnitt durch einen blinkenden Rahmen auf der Stiftplatte gekennzeichnet ist (hier farbig markiert); b) Darstellung der taktilen Scrollbalken zur Anzeige im Darstellungs- (links) sowie im Detail- bzw. Kopfbereich (rechts)

3.2.1.1 Bereiche des Fenstersystems

Ziel der Unterteilung des Fenstersystems in nicht überlappende Bereiche ist es, ein schnelleres Orientieren und Lokalisieren von Informationen auf einem Flächendisplay zu ermöglichen und somit die üblichen Review- und Trackingphasen blinder Anwender zu unterstützen [SKNW09]. In diesem Zusammenhang erwarten Schiewe et al. auch, dass die Verteilung der Informationen auf verschiedene Bereiche das zweihändige Arbeiten auf der Stiftplatte effizienter machen kann, indem Informationen parallel aufgenommen werden können. Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit implementierte taktile Fenstersystem besteht aus den folgenden Bereichen (siehe auch Abbildung 3.5):

- Im *Darstellungsbereich* wird der aktuelle Inhalt einer Anwendung präsentiert. Aus diesem Grund nimmt er den größten Teil der taktilen Ausgabefläche in Anspruch und kann im Gegensatz zu den anderen Bereichen nicht ausgeblendet werden. Die Präsentation der Inhalte erfolgt dabei in einer der von Schiewe et al. definierten Ansichtsarten (siehe Abschnitt 3.2.1.2). Um dem Benutzer das parallele Erkunden mehrerer GUI-Fenster zu ermöglichen, kann der Darstellungsbereich auch in zwei Unterbereiche geteilt werden. Jeder Unterbereich stellt dabei ein anderes Fenster dar und kann seine eigene Ansichtsart besitzen. Nur einer der beiden Unterbereiche hält den Fokus und ist somit aktiv. Die Inhalte der folgenden Bereiche beziehen sich auf das aktuell aktive Fenster.
- Im *Kopfbereich* wird normalerweise der Titel des dargestellten Fensters ausgegeben. Befindet sich der Benutzer in einem bestimmten Dialogfenster oder Menü einer Anwendung, dann kann stattdessen der entsprechende Name oder Pfad angezeigt werden. Inhaltlich orientiert sich der Kopfbereich also an der Titelleiste eines Fensters und informiert den Benutzer über den aktuellen Status der Anwendung. In der Standardeinstellung befindet sich der Kopfbereich am oberen Rand der Stiftplatte und ist eine Textzeile (5 Stifte) hoch. Bei Bedarf kann dieser Bereich jedoch auch auf zwei Zeilen (10 Stifte) vergrößert werden.
- Rechts neben dem Kopfbereich befindet sich die *Ansichtsartenliste*. Hier sieht der Benutzer eine Liste aller verfügbaren Ansichtsarten, wobei diese jeweils durch ihren ersten Buchstaben als Braillezeichen repräsentiert werden. Die aktuelle Ansichtsart ist durch eine Unterstreichung markiert. Für andere Anwendungszwecke, in denen beispielsweise nur eine Ansichtsart Verwendung findet, ist auch eine Zweckentfremdung dieses Bereichs möglich. Im Tangram Zeichenarbeitsplatz (siehe Kapitel 7.3.1) wird hier zum Beispiel der aktuelle Interaktionsmodus dargestellt.
- Die *Strukturleiste* soll es dem Benutzer ermöglichen, sich einen schnellen Überblick über die horizontale Struktur eines Dokuments zu verschaffen. Die Ausgabe in diesem, ein bis

zwei Zeichen (3 bzw. 6 Stifte) breiten, Bereich bezieht sich dabei jeweils nur auf den aktuell sichtbaren Inhalt im Darstellungsbereich. Einzelne Braillezeichen werden dazu verwendet, das Vorhandensein bestimmter Elemente, z. B. Überschriften oder Links, an der jeweiligen vertikalen Position anzuzeigen. Eine Überschrift in Zeile 1 wird beispielsweise mit einem „h“ in der selben Zeile der Strukturleiste gekennzeichnet. Im Gegensatz zum Konzept von Schiewe et al. (vgl. Abbildung 3.3) ist die Strukturleiste standardmäßig links neben dem Darstellungsbereich platziert. Dies entspricht eher dem Lesen von links nach rechts, d. h. der Benutzer weiß bereits vor dem Lesen einer Textzeile, ob das gesuchte Strukturelement dort enthalten ist.

- Angelehnt an das Konzept der Taskleiste im Windows Betriebssystem bzw. das Konzept von Registerkarten in grafischen Anwendungen dient die *Fenstertitel-Leiste* dazu, eine Liste aller geöffneten Fenster bereitzustellen. Im Vergleich zum visuellen Vorbild ist dieser Bereich allerdings vertikal, d. h. rechts neben dem Darstellungsbereich positioniert. Aufgrund des begrenzten Platzes auf der Stiftplatte ist jeder Fenstertitel nur durch seine ersten vier Buchstaben repräsentiert, sodass die Fenstertitel-Leiste insgesamt 14 Stifte breit ist. Der Titel des aktiven Fensters ist durch einen Rahmen erhabener Stifte markiert. Bei geteiltem Darstellungsbereich wird auch der inaktive Fenstertitel durch eine Spalte erhabener Stifte am rechten Rand markiert.
- Der *Detailbereich* befindet sich am unteren Rand der taktilen Ausgabefläche und nimmt ein oder zwei Textzeilen (5 bzw. 10 Stifte) in Anspruch. Er ist zur Anzeige von zusätzlichen Informationen vorgesehen. Abhängig vom gewählten Modus werden dabei entweder detaillierte Informationen zum fokussierten Element ausgegeben (z. B. Name, Status oder Formatierungseigenschaften) oder der Bereich wird als herkömmliche Braillezeile behandelt. Letzteres wird auch als „Braillexausgabe“ bezeichnet und ermöglicht es einem nicht-grafikfähigen Screenreader (z. B. Jaws), die Stiftplatte für seine Ausgaben zu verwenden. Zudem können im Detailbereich auch Statusmeldungen des HyperReaders selber eingeblendet werden, zum Beispiel Hinweise und Rückmeldungen zur zuletzt ausgeführten Funktion. Diese können temporär den vorherigen Inhalt überblenden und nach einer definierten Zeit⁵ von selbst verschwinden („Quickinfos“).

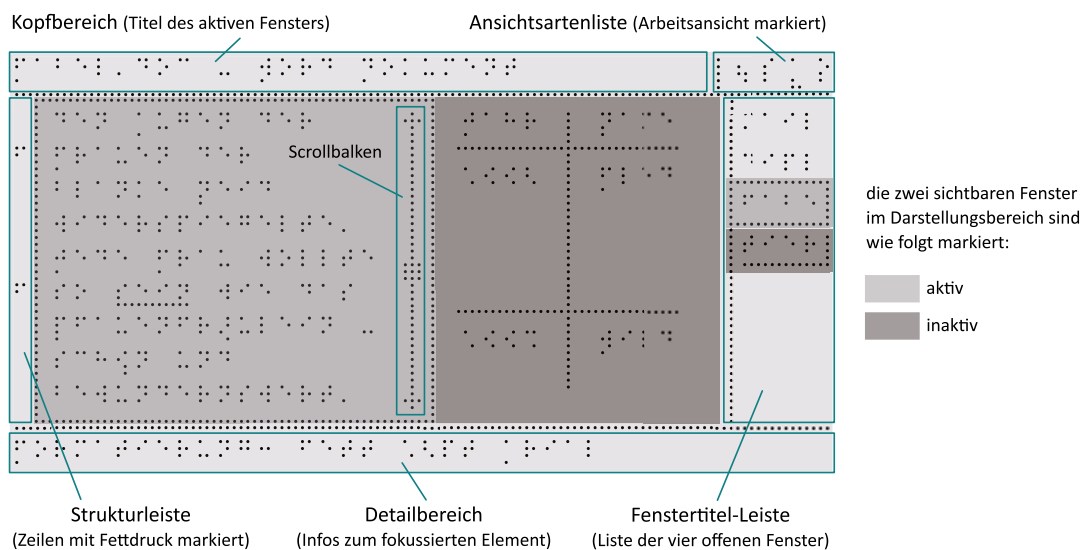


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des taktilen Fenstersystems

⁵ Zum Zwecke der Steuerbarkeit kann die Zeit vom Benutzer selber festgelegt werden. Zudem kann die letzte Statusausgabe auch erneut angefordert werden.

3.2.1.2 Ansichtsarten des Fenstersystems

Um verschiedenen Benutzeranforderungen und Aufgaben zu entsprechen, haben Schiewe et al. vier verschiedene Ansichtsarten definiert [SKNW09]. Charakterisiert sind diese dabei durch ihren Detailgrad sowie ihre Art der Informationspräsentation, d. h. textuell, semi-grafisch oder grafisch. Wie oben erwähnt, werden die Inhalte im Darstellungsbereich in einer dieser Ansichtsarten dargestellt. Abbildung 3.6 zeigt beispielhaft, wie ein Dokument in den folgenden Ansichtsarten aussieht:

- Die *Arbeitsansicht* ist komplett textbasiert und entspricht einer linearisierten Ausgabe wie sie bei konventionellen Braillezeilen üblich ist. Diese logisch strukturierte Ansicht erlaubt somit ein schnelles Arbeiten und Lesen der Inhalte in Brailleschrift. Räumliche Zusammenhänge werden nur in Ausnahmefällen präsentiert, z. B. bei Tabellen. Die Arbeitsansicht kommt der bisherigen Arbeitsweise blinder Menschen am nächsten.
- In der *Symbolansicht* werden textuelle Inhalte zwar auch in Brailleschrift ausgegeben, allerdings bleiben räumliche Zusammenhänge und Positionen der Interaktionsobjekte in dieser Ansichtsart grundsätzlich erhalten. Grafische Elemente, wie beispielsweise Radiobuttons oder Checkboxes, werden hier als taktile Symbole ausgegeben (siehe auch [Alb08]). Diese semi-grafische Visualisierung soll den Benutzern dabei helfen, nicht nur Inhalte zu lesen, sondern auch deren Anordnung nachzuvollziehen.
- Die *Überblicksansicht* erlaubt einen schnellen Überblick über ein Dokument oder eine Anwendung, indem sie lediglich eine abstrakte Repräsentation der Objekte als Rechtecke liefert. Hierfür werden die Boundingboxen⁶ der Elemente eines GUI-Fensters auf der Stiftplatte dargestellt. Struktur-räumliche Zusammenhänge sind somit einfach zu identifizieren. Abgesehen von Position und Ausdehnung der einzelnen Elemente enthält diese Ansichtsart jedoch keine textuellen Informationen oder anderen taktile Hinweise zum Inhalt. Audio-taktile Erkundungsmöglichkeiten sind für diese Ansicht somit essentiell.
- Eine komplett grafische Repräsentation von GUI-Fenstern liefert die *Originalansicht*. Hierbei werden die Pixelinformationen des visuellen Bildschirminhalts direkt auf die Stiftplatte gebracht. Dieser direkte Zugang zu grafischen Informationen bedeutet allerdings auch, dass textuelle Inhalte als taktile Schwarzschrift angezeigt werden. Diese Ansichtsart eignet sich nicht nur zur Erkundung von Grafiken, sondern erlaubt auch die Interaktion mit Anwendungen, die ansonsten nicht zugänglich wären.

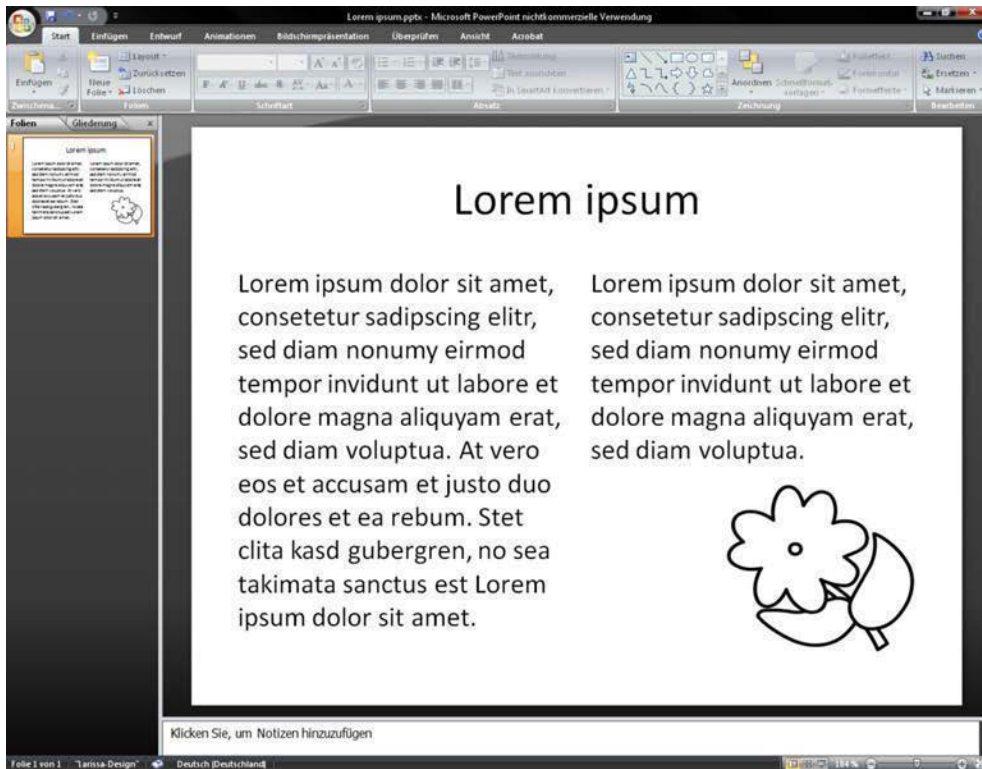
3.2.2 Haptische Interaktion

Zur Realisierung von Eingaben stehen dem Benutzer drei verschiedene Modalitäten zur Verfügung:

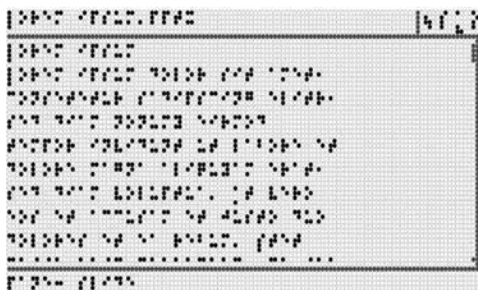
1. Tastaturkommandos
2. Hardwaretasten der Stiftplatte
3. Gesteneingabe

Die *Tastaturkommandos* für die Bedienung des HyperReaders wurden im Rahmen des Hyper-Braille Projekts, angelehnt an die Bedienung eines herkömmlichen Screenreaders, entwickelt. Die Nutzung der *Hardwaretasten* ist natürlich abhängig vom konkreten Modell der Stiftplatte. Das BrailleDis 7200 bietet beispielsweise deutlich mehr und intuitivere Bedienelemente als das BrailleDis 9000 (vgl. auch Abschnitt 2.5.4 sowie Kapitel 6). Das im HyperBraille Projekt entwickelte Tastenkonzept für das BrailleDis 9000 wurde im Rahmen dieser Arbeit entsprechend

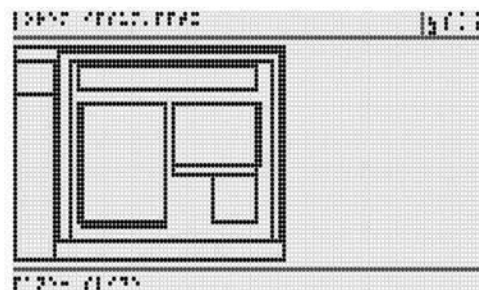
⁶ Unter der Boundingbox eines Grafikobjekts versteht man dessen minimal umgebendes Rechteck.



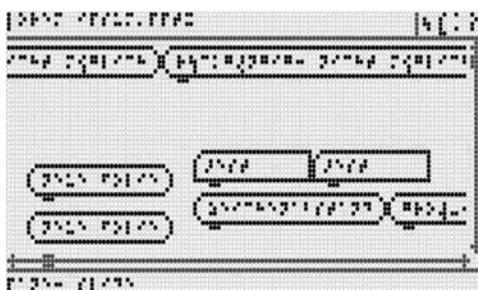
originales PowerPoint Dokument



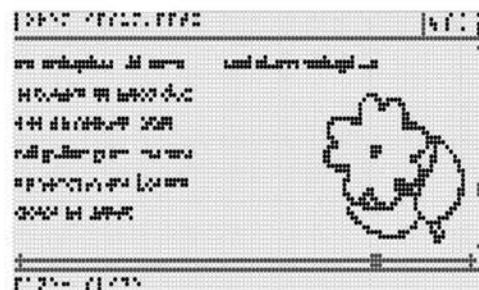
Arbeitsansicht



Überblicksansicht



Symbolansicht



Originalansicht

Abbildung 3.6: Darstellung eines Dokuments in den verschiedenen Ansichtsarten

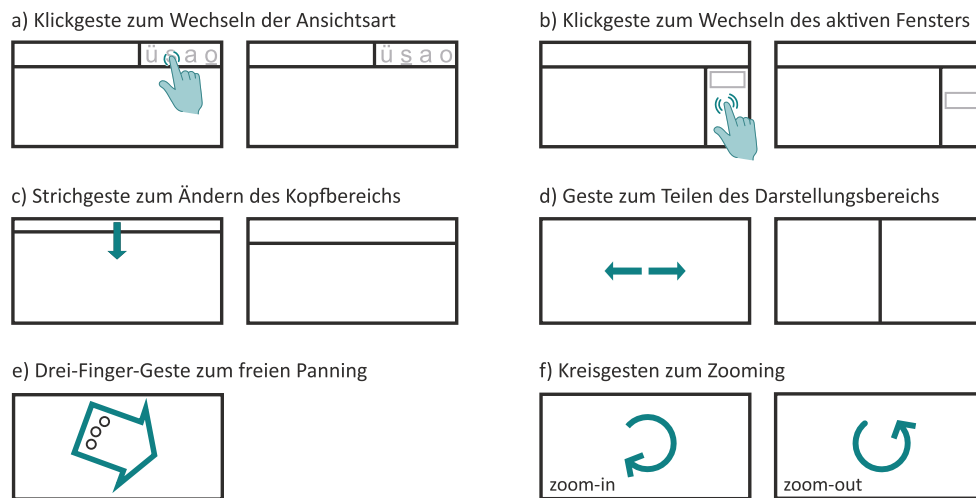


Abbildung 3.7: Schematische Übersicht über die im HyperReader System verwendeten Gesten

den neuen Möglichkeiten an das BrailleDis 7200 angepasst. Eine Übersicht der wichtigsten HyperReader-Tastenkommmandos für beide Geräte findet sich in Anhang A.

Aufgrund des in Kapitel 2.4 beschriebenen Midas-Touch Effekts ist es bei der taktilen Interaktion auf der Stiftplatte nicht möglich, zwischen Lesen und *Gesteneingabe* zu unterscheiden. Aus diesem Grund muss der Benutzer während der Gesteneingabe eine Taste gedrückt halten [SKW10]. Dies bedeutet zwar, dass keine Zweihandgesten umsetzbar sind, allerdings können bei Verwendung verschiedener Tasten (im Folgenden als Gestentasten bezeichnet) unterschiedliche Funktionalitäten zu ein und derselben Geste ausgelöst werden. Insbesondere für einfache Klickgesten hat dies den Vorteil, dass so zwischen Erkundungs- und Aktivierungsabsichten unterschieden werden kann. Im Konkreten bedeutet dies, dass eine Gestentaste zur Umsetzung von Mausclicks und somit zur Aktivierung von Elementen verwendet werden kann (*Mausemulation*), während das Betätigen einer zweiten Gestentaste Audioausgaben zum entsprechenden Element auslöst ohne dieses zu aktivieren (*Erkundungsgesten*).⁷ Die verwendeten Gesten wurden bereits in einer früheren Arbeit in Kooperation mit blinden Benutzern erarbeitet (siehe [Pre09]). Abbildung 3.7 zeigt die im HyperReader implementierten Gesten. Die Erkennung und Interpretation der Berührungen auf der Stiftplatte wird dabei durch den Gestenerkennung von Schmidt [SW09]⁸ realisiert.

Zur Interaktion auf der Stiftplatte stellt das taktile Fenstersystem dem Benutzer die folgenden Arten von Eingabekommandos zur Verfügung:

- Fenstersystemoperationen zur Manipulation von Bereichen und gefilterten Fenstern
- Erkundungsoperationen zur Manipulation des angezeigten Inhaltsausschnitts im Darstellungsbereich
- Hilfsoperationen zum Bewahren der Orientierung

Fenstersystemoperationen beinhalten die Möglichkeit, die Ausgabe der Bereiche an die Anforderungen eines Benutzers bzw. einer konkreten Aufgabe anzupassen. Um die Arbeit mit mehreren Fenstern zu ermöglichen, werden auch die in GUIs üblichen Fensteroperationen (Minimieren,

⁷ Beim BrailleDis 9000 wird zur Mausemulation beispielsweise die rechte Daumentaste und zur Erkundung die linke Daumentaste verwendet.

⁸ Der GestureRecognizer von Schmidt wird auch innerhalb des BrailleIO-Frameworks, auf welchem der in Abschnitt 7.3.1 vorgestellte Grafikeditor aufbaut, verwendet. URL: <https://github.com/TUD-INF-IAI-MCI/BrailleIO/tree/master/GestureRecognizer>

Maximieren, Wiederherstellen und Schließen) sowie die Möglichkeit, zwischen den geöffneten Fenstern zu wechseln, bereitgestellt. Insbesondere für die Kooperation mit sehenden Benutzern ist zudem eine Synchronisierung des HyperReaders mit der GUI nötig. Hierfür werden die relevanten Window Events der GUI an das Fenstersystem weitergeleitet und die Ausgabe auf der Stiftplatte entsprechend aktualisiert. Umgekehrt werden ebenfalls entsprechende Operationen des Fenstersystems an die GUI weitergegeben, um eine Synchronisierung zu gewährleisten.

Für die Arbeit mit einer Anwendung bzw. einem Dokument sind die *Erkundungsoperationen* besonders wichtig. Im Vergleich zu grafischen Ausgaben ist die Auflösung der taktilen Anzeigefläche sehr gering. Komplette Dokumente sind im Normalfall also nicht auf einmal auf der Stiftplatte darstellbar. *Panningoperationen* spielen für den Benutzer somit eine große Rolle, um den Inhalt grafischer Oberflächen auf der Stiftplatte zu erarbeiten. Um ein effizientes Erkunden zu unterstützen, bietet der HyperReader verschiedene Panningmöglichkeiten an. Neben Sprungbefehlen zur unmittelbaren Navigation an die Ränder des Dokumentenfensters werden auch zwei verschiedene Schrittweiten zum Verschieben der Inhalte angeboten. Das kleine Panning (im Folgenden „Verschieben“ genannt) verschiebt den Inhalt um wenige Stifte, sodass sich der dargestellte Kontext nur wenig ändert. Das große Panning (im Folgenden „Blättern“ genannt) ändert den Ausschnitt um genau eine Darstellungsbereichsbreite bzw. -höhe, sodass die neue Ausgabe keine Überschneidung mit der alten Ausgabe hat. Beide Varianten basieren dabei auf der Metapher, dass der sichtbare Bereich als Fensterrahmen über dem darunterliegenden Inhalt verschoben wird – ähnlich einer Lupe. Demgegenüber steht das Konzept, bei dem der Inhalt unter dem sichtbaren Bereich bewegt wird – wie bei einem Mikroskop. Diese Metapher wird für die Panninggeste (vgl. Abbildung 3.7e) verwendet, da der berührte Inhalt nach Ausführung der Geste somit weiterhin unter den Fingern des Benutzers verbleibt. Auf diese Weise ermöglicht das freie Panning per Geste das Beibehalten des Kontexts im Sinne der direkten Manipulation.

Einige Ansichtsarten erfordern auch die Möglichkeit, die Größe bzw. den Detailgrad des dargestellten Inhalts zu verändern. Da Braillebuchstaben in ihrer Größe nicht variabel und somit nicht zoombar sind, ist in der Arbeits- und Symbolansicht keine *Zoomfunktionalität* sinnvoll. Im Gegensatz dazu ist Zoomen in der Original- und Überblicksansicht essentiell, um sowohl Überblicks- als auch Detaildarstellungen der grafischen Oberfläche zu ermöglichen. Neben dem Zoomen um jeweils eine definierte kleine oder große Zoomstufe⁹ stellt der HyperReader auch Funktionen zur Wahl spezieller Zoomstufen bereit. Beispielsweise ist es möglich, den Inhalt in den Darstellungsbereich einzupassen (kleinste Zoomstufe) sowie eine Darstellung zu wählen, in der ein Stift einem Pixel entspricht (1:1-Darstellung).

Insbesondere hohe Zoomstufen führen dazu, dass im Darstellungsbereich nur ein sehr kleiner Teil des gesamten Inhalts angezeigt wird. Kann der Benutzer keine Verbindung zwischen dem aktuellen Ausschnitt und dem globalen Kontext herstellen, dann kann das so genannte „Desert Fog“ Problem [JF98] auftreten. Um diesem Orientierungsverlust vorzubeugen, wurde die oben erwähnte *Minimap* entwickelt (siehe auch Abbildung 3.4a). Dabei wird ein Zwei-Level-Zoom Ansatz verwendet, welcher nach Gutwin und Fedak [GF04] auf kleinen Bildschirmen bevorzugt wird. Das heißt, im Darstellungsbereich wird entweder eine Übersicht über den Gesamtinhalt (die Minimap) oder eine hereingezoomte Variante (der aktuelle Ausschnitt in der gewählten Zoomstufe) angezeigt. Auf diese Weise soll die Minimap dem Anwender dabei helfen, leicht einen Überblick über seine aktuelle Position im Brailfenster¹⁰ zu erhalten. Die oben beschriebenen Panningoperationen werden in der Minimap ebenfalls angeboten, sodass der blinkende Rahmen und somit der aktuelle Ausschnitt direkt in der Übersichtsdarstellung verschoben werden kann.

Eine weitere *Hilfsoperation* stellt die Möglichkeit der Ansichtssynchronisierung dar. Diese erlaubt dem Benutzer, die aktuelle Position innerhalb eines Dokuments auch nach dem Wechsel der Ansichtsart beizubehalten und somit leichter die Orientierung zu bewahren. Hierfür muss lediglich das zu erkundende Objekt selektiert werden. Nach dem Ansichtswchsel wird der neue Ausschnitt automatisch auf dieses Objekt positioniert.

⁹ Konkret verändert sich die Größe beim kleinen Zoom um 5 %, beim großen Zoomen um 25 %.

¹⁰ Repräsentation eines GUI-Fensters auf der Stiftplatte

Ein ähnlicher Überblick über die angebotenen Interaktionsmöglichkeiten wurde in [PWS10] veröffentlicht. Eine Übersicht über die Gestenkommandos wurde zudem auch in [BPSW13] publiziert.

3.2.3 Softwarearchitektur des HyperReaders

In Abbildung 3.8 ist die Architektur des HyperReader Systems dargestellt. Wie jeder moderne Screenreader besteht auch der HyperReader einerseits aus Komponenten zum Sammeln und Verarbeiten von Informationen über eine grafische Anwendung, andererseits aus Komponenten zur Bereitstellung geeigneter Ein- und Ausgabemöglichkeiten. Der im Rahmen dieser Arbeit implementierte BrailleWindowManager stellt dabei als Bindeglied zwischen diesen Komponenten eine zentrale Rolle dar. Im Folgenden wird der Informationsfluss der beteiligten Komponenten des HyperReaders zusammengefasst und am Beispiel einfacher Benutzerinteraktionen visualisiert.

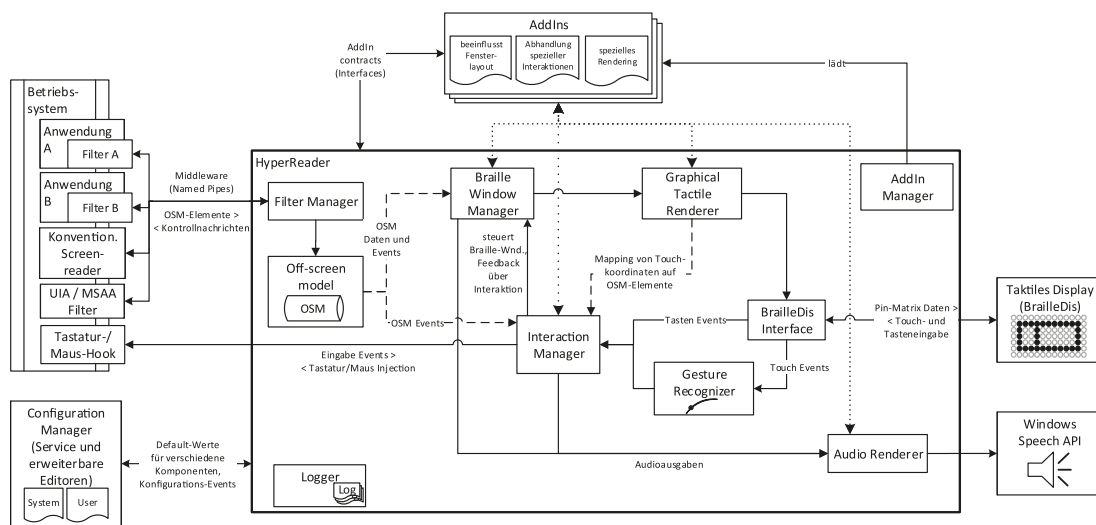


Abbildung 3.8: Softwarearchitektur des HyperReader Systems

Grundsätzlich werden sowohl der Desktop als auch geöffnete Anwendungen durch entsprechende Filter des HyperReaders in einen Teilbaum des hierarchisch aufgebauten Off-Screen-Modells (OSM, vgl. [KVV08]) überführt. Im Rahmen des HyperBraille Projekts wurden dazu Filter für mehrere Office-Anwendungen (u. a. Word [KZS10], Excel und PowerPoint) implementiert. Jedes gefilterte GUI-Element wird zusammen mit seinen Eigenschaften (u. a. Inhalt, Position, Typ und Status) in Form eines entsprechenden OSM-Elements gespeichert. Das oberste Window-Element des OSM-Baums repräsentiert dabei das GUI-Fenster. Dieses wird durch den BrailleWindowManager als Braillefenster (BrailleWindow) registriert. Ab diesem Zeitpunkt steht es den anderen Komponenten zur Interaktion zur Verfügung.

Die oben beschriebenen Darstellungskonzepte (Bereiche und Ansichtsarten) werden ebenfalls vom BrailleWindowManager verwaltet. Die Bereiche werden dabei als BrailleArea-Objekte gespeichert. Über eine entsprechende Schnittstelle übergibt der BrailleWindowManager die auszugebenden OSM-Daten eines Fensters für einen bestimmten Bereich an den GraphicRenderer (Rendering-Framework von Taras [TRSE10, Tar11]). Dieser wiederum ist für die taktile Ausgabe der Informationen in den verschiedenen Ansichtsarten und Bereichen auf der Stiftplatte zuständig. Zum Rendern des Darstellungsbereichs kann der GraphicRenderer insbesondere die aktuellen Anzeigedaten für ein Braillefenster (Ansichtsart, Zoomstufe und Panningposition) direkt vom entsprechenden BrailleWindow-Objekt abrufen. Gleiches gilt für die Inhalte (OSM-Daten), welche in den anderen Bereichen ausgegeben werden sollen und sich auf das aktive Fenster beziehen. Die direkte Benutzerinteraktion mit einzelnen gerenderten Objekten wird durch den Ansatz verschiedener objekt- und widgetbasierter Renderer innerhalb der GraphicRenderer Komponente möglich (siehe [TRSE10]).

Für die Verarbeitung der Benutzereingaben, wie zum Beispiel Tastendrucke oder vom Gesture-Recognizer interpretierte Gesten, ist der InteractionManager von Spindler verantwortlich. Dabei werden den Eingaben durch frei konfigurierbare Skripte konkrete Kommandos zugewiesen. Ein nachträgliches Ändern der Tastenbelegungen zum Zwecke der Individualisierbarkeit ist somit nicht nur durch AddIns [SKW10], sondern mit Hilfe des ConfigurationManagers auch manuell durch den Benutzer möglich. Je nach erkanntem Kommando werden die entsprechenden Funktionalitäten zur Manipulation der BrailleWindows oder der BrailleAreas durch den BrailleWindowManager ausgeführt. Mit Hilfe von Keyboard und Mouse Hooks können dabei auch Tastatur- sowie Mauseingaben als Events empfangen und entsprechend im HyperReader verarbeitet oder mittels Stiftplatteingaben in der GUI selber emuliert werden. Auditive Rückmeldungen bzgl. derartiger Interaktionen werden durch den InteractionManager und Interaktionen mit Bereichen oder Fenstern durch den BrailleWindowManager veranlasst und entsprechend durch die AudioRenderer Komponente des HyperReaders ausgegeben.

In den Abbildungen 3.9 bis 3.11 wird das Zusammenspiel der einzelnen Softwarekomponenten des HyperReaders beispielhaft an konkreten Benutzerinteraktionen dargestellt. Die Abläufe sind dabei stark vereinfacht und ohne Einbeziehung des Benutzers als Akteur wiedergegeben, da die Diagramme vorrangig die Rolle des BrailleWindowManagers als zentraler Vermittler zwischen den Ein- und Ausgabekomponenten verdeutlichen sollen.

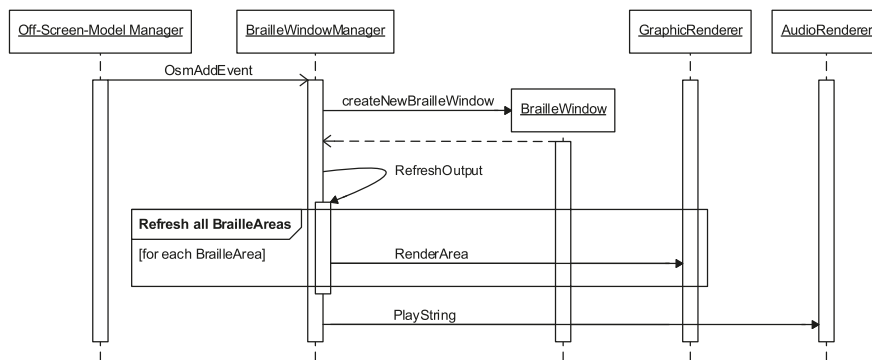


Abbildung 3.9: Zusammenspiel der HyperReader Komponenten am Beispiel des Öffnens eines GUI-Fensters

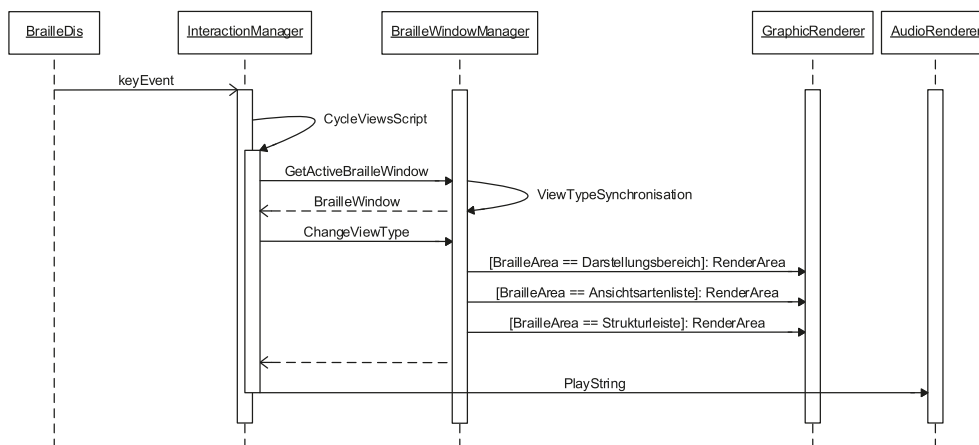


Abbildung 3.10: Zusammenspiel der HyperReader Komponenten am Beispiel eines Ansichtswechsels

3.2.4 Benutzerinteraktionen am Beispiel von PowerPoint

Am Beispiel der Office-Anwendung PowerPoint werden im Folgenden mögliche Benutzerinteraktionen innerhalb des taktilen Fenstersystems näher erläutert. Dazu wurde eine Pilotstudie

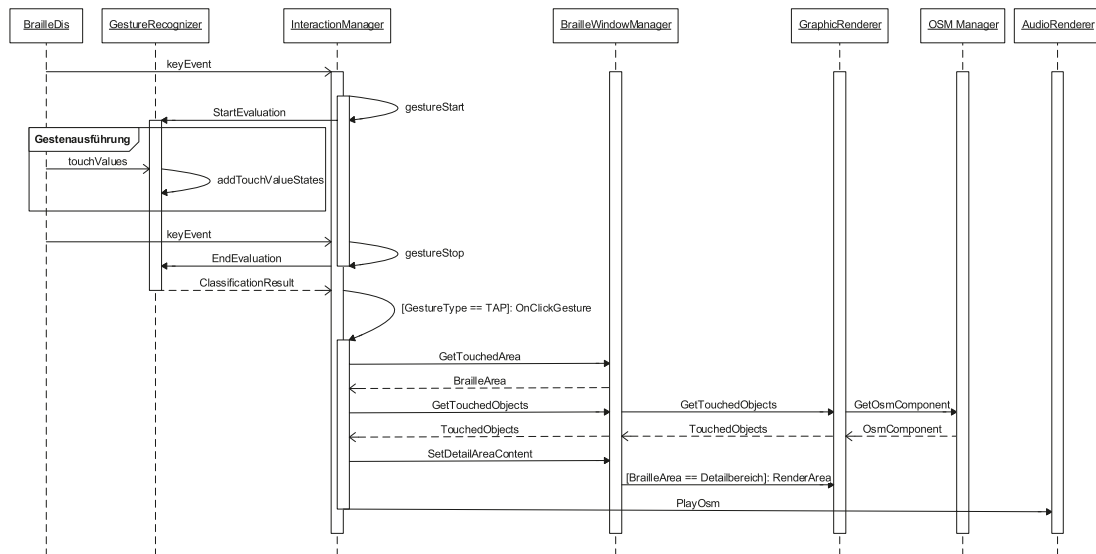


Abbildung 3.11: Zusammenspiel der HyperReader Komponenten am Beispiel einer Zeigegeste auf ein GUI-Element

mit drei blinden Benutzern (eine 28-jährige Frau sowie zwei 21-jährige Männer) durchgeführt. Alle Probanden hatten zum Zeitpunkt des Tests zumindest ein wenig Erfahrung im Umgang mit PowerPoint. Dabei hatten alle Benutzer minimale Erfahrung beim Erstellen eigener Präsentationen – ein Teilnehmer allerdings nur in der visuellen Bedienung¹¹, die anderen beiden mit ihren herkömmlichen Screenreadern. Einer der beiden Screenreader-Benutzer hatte zudem sehr viel Erfahrung beim Lesen und Vorführen von Präsentationen, während der andere darin wenig Erfahrung besaß. Die Teilnehmer gaben weiterhin an, dass insbesondere Funktionalitäten wie das Erkennen von Folienlayouts und das Festlegen von Designs mit ihrer herkömmlichen Arbeitsweise nicht nutzbar sind. Neben diesen Funktionen würden die Probanden auch gerne Folienmaster, Notizen, Grafiken sowie Kopf- und Fußzeile verwenden, da auch für sie Layout und Design nicht unwichtig sind.

Im Rahmen der Untersuchung wurden drei typische Aufgaben in PowerPoint auf der Stiftplatte bearbeitet: 1) die Erkundung einer vorhandenen Präsentation, 2) das Festlegen eines Foliendesigns und 3) das Anlegen einer neuen Folie (inklusive der Inhalte). Die Probanden mussten zudem einige Fragen beantworten und wurden bei der Interaktion beobachtet.

Beim Erkunden der Präsentation durften zunächst alle Ansichtsarten sowie die verschiedenen Bereiche verwendet werden. Zur Überprüfung, inwieweit der HyperReader die Informationsaufnahme unterstützen kann, sollten die Benutzer herausfinden, worum es in der Präsentation geht (Inhalt), wie viele Folien vorhanden (Aufbau) und wie diese strukturiert sind (Layout). Anschließend sollte der Präsentation ein bestimmtes Foliendesign zugewiesen werden. Dazu wurden den Probanden verbal einige Vorgaben gemacht – unter anderem, dass die Folie einen hellen Hintergrund mit einem dunklen Streifen in der oberen Hälfte besitzen soll. Danach sollte eine neue zweispaltige Folie eingefügt werden. Die bereits vorhandenen Platzhalter sollten entsprechend mit Inhalt gefüllt werden. In der linken Spalte sollte zudem eine Grafik eingefügt und zur oberen Kante der rechten Textspalte bündig platziert werden.

In Tabelle 3.1 findet sich ein Überblick über den Erfolg der drei Probanden sowie die zur Lösung der Aufgaben verwendeten Ansichtsarten. Im Durchschnitt benötigten die Benutzer etwa 8 Minuten zur Erkundung der Präsentation (Aufgabe 1), 9 Minuten zur Auswahl eines geeigneten Foliendesigns (Aufgabe 2) und 22,5 Minuten zum Anlegen einer neuen Folie sowie deren Inhalte (Aufgabe 3). Aufgaben, in denen das Layout eine Rolle spielt, konnten besonders in

¹¹ Dieser Proband nutzte PowerPoint lediglich vor seiner Erblindung und hatte somit noch keine Erfahrung im nicht-visuellen Umgang damit.

Tabelle 3.1: Überblick über Aufgaben zur Erkundung und Bearbeitung einer Präsentation sowie die dabei von den Probanden benutzten Ansichtsarten

Aufgabe	Proband 1		Proband 2		Proband 3	
	Ansicht	Aufgabe erfüllt?	Ansicht	Aufgabe erfüllt?	Ansicht	Aufgabe erfüllt?
1a) Identifizierung des Themas	AA	ja	AA	ja	AA	ja
1b) Identifizierung der Folienanzahl	ÜA	ja	SA	nein	ÜA	ja
1c) Bestimmung der fünf Folienlayouts	ÜA	ja	OA	teilweise (1 Fehler)	ÜA	teilweise (1 Fehler)
2) Festlegung des Foliendesigns	OA	ja	OA	mit Hilfe	OA	ja
3a) Hinzufügen einer neuen Folie	AA	ja	AA	ja	AA	ja
3b) Auswahl eines Layouts für die neue Folie	AA	mit Hilfe	OA	mit Hilfe	OA	mit Hilfe
3c) Einfügen von textuellen Inhalten	ÜA + DB	ja	AA	mit Hilfe	ÜA + DB	ja
3d) Einfügen einer Grafik	ÜA + AA	ja	ÜA + SA	mit Hilfe	ÜA + SA	mit Hilfe
3e) Positionieren einer Grafik	OA	ja	OA	mit Hilfe	OA	mit Hilfe

AA = Arbeitsansicht, OA = Originalansicht, SA = Symbolansicht, ÜA = Überblicksansicht, DB = Detailbereich

der Überblicksansicht erfolgreich bearbeitet werden. Zum Einfügen von Texten in vordefinierte Platzhalter auf der Folie war der Detailbereich als Ergänzung hilfreich, um das Geschriebene in Brailleschrift zu kontrollieren. Die Originalansicht zeigte sich wiederum gut zur Identifizierung von speziellen Designs sowie zur Platzierung von grafischen Inhaltselementen. Zur Verdeutlichung der Interaktionen im taktilen Fenstersystem ist in Abbildung 3.12 beispielhaft das Hinzufügen und Bearbeiten einer Folie dargestellt wie es von Proband 3 gelöst wurde. Die Verwendung der Hände zur Eingabe von Tastaturkommandos und zur Überprüfung der taktilen Ausgabe kann dabei sowohl synchron (wie in diesem Beispiel beim Bearbeiten des Titel-Platzhalters) als auch asynchron bzw. unabhängig voneinander erfolgen (in diesem Beispiel beim Editieren der Grafik).

Insgesamt konnte das Beispiel PowerPoint sehr schön zeigen, dass die verschiedenen Ansichtsarten bei der Bedienung einer grafischen Benutzungsoberfläche einen großen Mehrwert für blinde Benutzer bieten können. Während Inhalte in der Arbeitsansicht gelesen werden können, lassen sich andere Aufgaben, die sich mit dem Layout oder Design befassen, eher in grafischen Ansichtsarten, wie der Überblicks- oder Originalansicht, lösen. Insbesondere in diesem Anwendungsszenario hat sich der Vorteil der Überblicksansicht gezeigt, da die Anwender auf diese Weise einen schnellen Überblick über das Layout der einzelnen Folien erhalten konnten. Zudem kann diese Ansichtsart auch die Bildung eines mentalen Modells des Benutzers über eine Anwendung unterstützen. Ein Proband hatte beispielsweise vor der Nutzung der

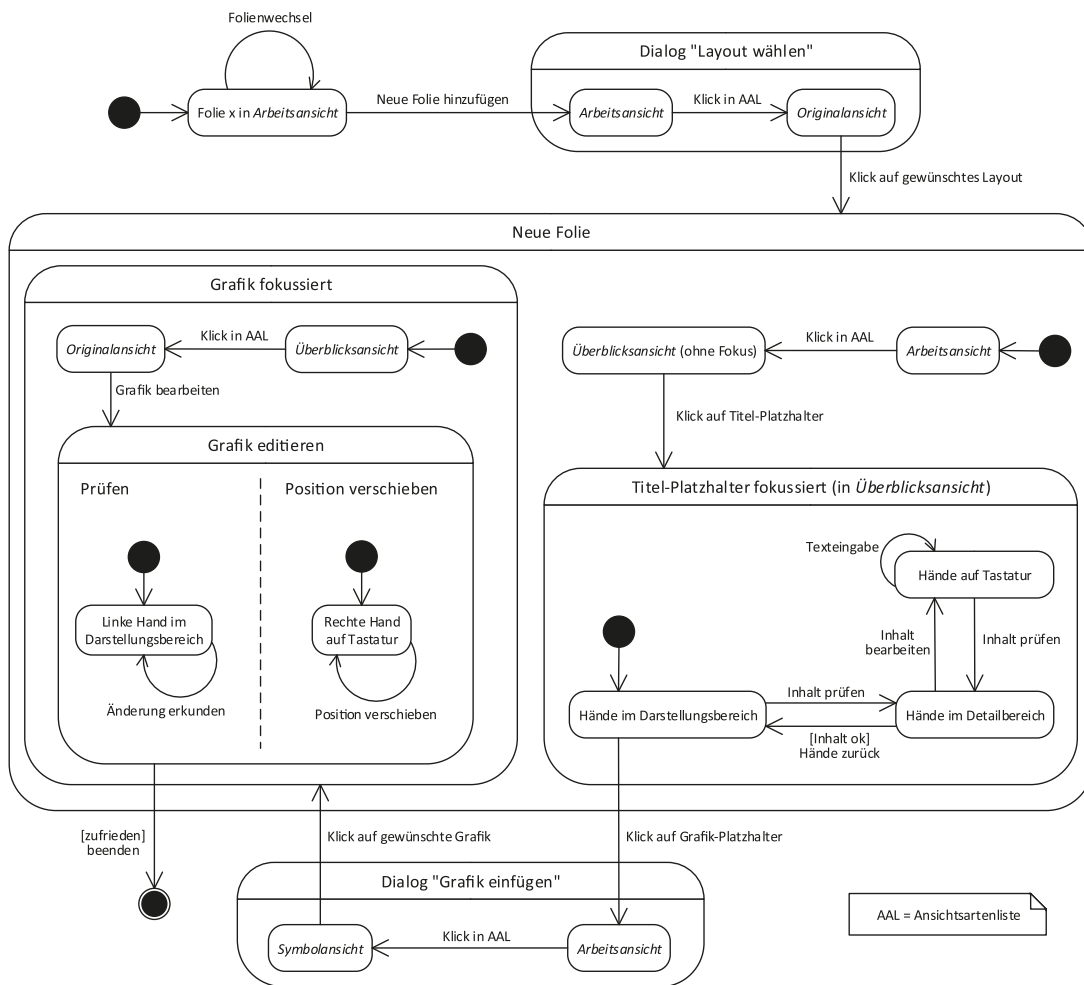


Abbildung 3.12: Interaktionen im taktilen Fenstersystem am Beispiel des Hinzufügens und Bearbeitens einer Folie in PowerPoint

Stiftplatte keine Vorstellung über die verschiedenen Arbeitsbereiche von PowerPoint. Mit Hilfe der Überblicksansicht wurde ihm der räumliche Aufbau der Anwendung erstmals verdeutlicht. Gerade dies ist für das Erlernen von GUI-Anwendungen sowie die Kommunikation mit sehenden Menschen sehr wichtig (vgl. [WPKM94, Kal96]).

3.3 Bewertung des taktilen Fenstersystems

Da blinde Benutzer Informationen normalerweise sequentiell wahrnehmen, muss untersucht werden, inwieweit das entwickelte taktilen Fenstersystem die Arbeit auf der Stiftplatte erleichtert. Hierfür wurde eine Studie durchgeführt, welche die allgemeine Gebrauchstauglichkeit untersucht und dabei die folgenden Forschungsfragen beantworten sollte:

1. Wie kommen blinde Benutzer mit der zweidimensionalen Ausgabe und der Bedienung des Fenstersystems zurecht?
2. Wird das Konzept der Ansichten und Bereiche in der praktischen Anwendung positiv aufgenommen?
3. Wie wird die Eingabe von Gesten akzeptiert?

4. Können blinde Benutzer ihre Orientierung bewahren, wenn sie ein oder mehrere Fenster erkunden?
5. Kann das Fenstersystem dazu beitragen, das Verständnis über visuelle Fenstersysteme zu erhöhen und somit die Zusammenarbeit mit sehenden Kollegen zu erleichtern?

Die Studie ist in ähnlicher Weise in [PWS10] veröffentlicht.

3.3.1 Methodik

Das Ziel der Untersuchung war es, die Probanden beim Interagieren mit dem Fenstersystem unter Verwendung von Gesten- und Tasteneingaben auf dem BrailleDis 9000 zu beobachten. Dabei sollte nicht die Erlernbarkeit der Konzepte und verwendeten Eingabekommandos analysiert werden, sondern die Intuitivität beim Umgang mit dem Fenstersystem.

3.3.1.1 Probanden

An der Untersuchung nahmen acht blinde Personen im Alter zwischen 27 und 58 Jahren (Durchschnittsalter: 37, vier Frauen) teil. Alle Probanden waren Braille-Leser und benutzten täglich einen Screenreader. Drei von ihnen hatten bereits an früheren Studien des HyperBraille Projekts teilgenommen und somit etwas Erfahrung im Umgang mit der Stiftplatte. Die anderen Probanden hatten vor dem Test noch keine Erfahrung mit taktilen Flächendisplays.

3.3.1.2 Aufgaben

Der Test unterteilte sich in vier verschiedene Aufgabenbereiche, wobei insgesamt 21 Aufgaben bearbeitet werden mussten:

1. Lernphase: teilweise geführte Erkundung des Desktops (Windows Vista), um die wichtigsten Prinzipien und Eingabemöglichkeiten des Fenstersystems zu erlernen (u. a. Erläuterung der Bereiche, Ansichten und Gestenbedienung)
2. Ansichtsarten: selbstständige Erkundung eines Textdokuments in den verschiedenen Ansichten (u. a. Verwendung der Minimap sowie Zooming- und Panningfunktionen)
3. Bereiche: selbstständige Erkundung eines komplexen Textdokuments unter Verwendung der unterschiedlichen Bereiche (u. a. Ein- und Ausblenden sowie Ändern der Größe von Bereichen mittels Gesteneingaben)
4. geteilter Darstellungsbereich: Arbeit mit mehreren Fenstern im geteilten Darstellungsbereich (u. a. Teilung des Darstellungsbereichs, Wechsel des aktiven Fensters sowie Maximieren eines Fensters)

3.3.1.3 Versuchsablauf

Die Aufgaben wurden den Probanden verbal aufgetragen. Beim Durchführen sollten sich die Benutzer nicht auf die dargestellten Inhalte konzentrieren, d. h. zur Erfüllung der Aufgaben war es nicht notwendig, die Texte der präsentierten Dokumente zu lesen. Stattdessen sollten sich die Teilnehmer auf die Bedienung des Fenstersystems konzentrieren, also auf das Auftauchen von Informationen in bestimmten Bereichen oder die Auswirkung der verschiedenen Ansichtsarten bzw. Zoomstufen auf das Aussehen des Dokuments. Am Ende der Studie wurden zu jedem Aufgabenbereich einige Fragen gestellt, bei denen die Benutzer unter anderem spezielle Aspekte bewerten sollten. Der Test wurde per Video aufgenommen, um eine spätere Analyse der Benutzerinteraktion vornehmen zu können.

3.3.2 Ergebnisse

Während der gesamten Testsitzung, die etwa 2 Stunden gedauert hat, interagierten alle Benutzer mit beiden Händen auf der Stiftplatte. Da die komplexen Konzepte nicht ausführlich genug innerhalb der kurzen Lernphase geübt werden konnten, war auch in den anderen Phasen eine gewisse Führung bzw. Hilfestellung durch den Testleiter nötig. Zur Beantwortung der einzelnen Fragestellungen der Untersuchung war dies jedoch nicht hinderlich.

Die Bewertung der allgemeinen Bedienung der Stiftplatte ist in Abbildung 3.13 zusammengefasst. Insgesamt hat sich gezeigt, dass sich die Benutzer erst an den Umgang mit einer komplexen flächigen Ausgabe gewöhnen müssen, aber dennoch eine intuitive Bedienung möglich ist. Alle Probanden empfanden die Bereiche als nützlich und hilfreich, um spezifische Informationen zu erhalten. Insgesamt wurde die Arbeit mit den Bereichen zwar von fünf Probanden als gewöhnungsbedürftig bezeichnet, aber dennoch als effizient und intuitiv eingeschätzt. Dabei wurden die einzelnen Bereiche als zweckmäßig zur Anzeige der jeweils vorgesehenen Informationen empfunden. Auch die Ansichtsarten wurden von sieben Teilnehmern als sinnvoll erachtet¹². Die Studie konnte demnach das Konzept der Ansichten und Bereiche erfolgreich bestätigen.

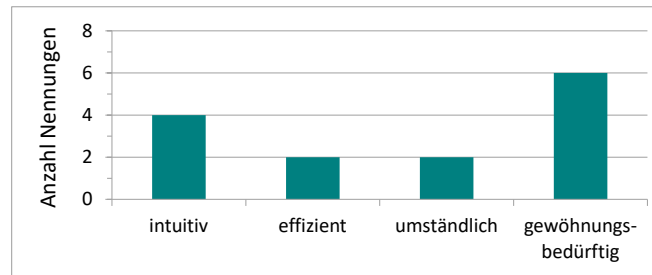


Abbildung 3.13: Beurteilung der allgemeinen Bedienung durch die acht Probanden (mehrere Antworten erlaubt)

Vor allem das Konzept des direkten Anwählens von Inhalten mit dem Finger (z. B. eines Desktopicons) wurde gut angenommen durch die Teilnehmer. Zum Abrufen detaillierter Informationen und Audioausgaben kann dieses Konzept neue Dimensionen für die räumliche Erkundung eröffnen¹³. Die Kombination von Überblicksansicht und Sprachausgabe zur Gewinnung eines Überblicks über den Desktop wurde beispielsweise als gut bewertet (4,1 von 5). Die Minimap war für die Probanden vor allem in großen Zoomstufen der Originalansicht sehr hilfreich, um ihre aktuelle Position einschätzen zu können. Auch die taktile Rückmeldung über den aktuellen Fokus (blinkender Rahmen in der Original- und Überblicksansicht) wurde im Kontext der Menüleisten-Bedienung positiv bewertet (4,4 von 5).

Abbildung 3.14 fasst die Bewertung des Fenstersystems bzgl. der Navigation in Dokumenten sowie der Interaktion mit Fenstern und Bereichen zusammen. Die Möglichkeit, den Darstellungsbereich zu teilen, um mit zwei Dokumenten nebeneinander zu arbeiten, gefiel sechs Probanden sehr gut und wurde auch von den anderen beiden Teilnehmern als sinnvoll erachtet.

Die Verwendung von Gesten zur Realisierung von Zooming, Panning und der Größenänderung der Bereiche wurde aufgrund der Intuitivität von den meisten Probanden positiv beurteilt. Drei Benutzer würden diese sogar der Eingabe von Tastaturkommandos vorziehen. Es wurde allerdings kritisiert, dass während der Durchführung einer Geste eine Taste gehalten werden muss und dadurch die Ausführung verkompliziert wird. Die verwendeten Gesten wurden wie in Abbildung 3.15 dargestellt bewertet.

¹² Ein Proband konnte es nicht einschätzen.

¹³ Zur Zeit des Tests (März 2010) kam die heute übliche Explore by Touch Funktionalität auf Smartphones erst auf, sodass diese Art der Interaktion für blinde Benutzer noch relativ neuartig war.

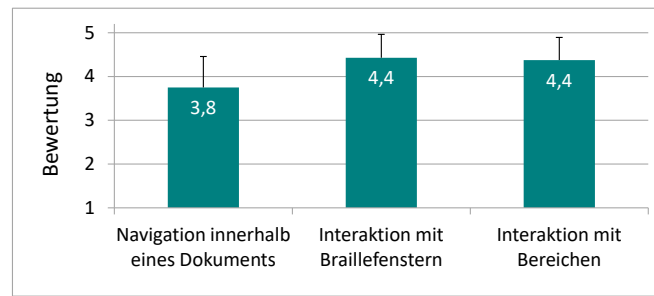


Abbildung 3.14: Bewertung einiger Interaktionsaspekte des Fenstersystems (Skala: 1 = sehr schlecht bis 5 = sehr gut; Mittelwerte und Standardabweichungen; $n = 8$)

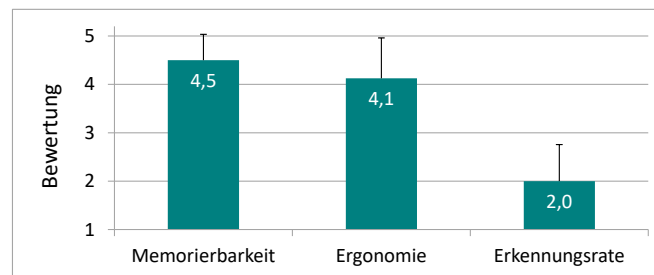


Abbildung 3.15: Bewertung einiger Aspekte der Gestenbedienung (Skala: 1 = sehr schlecht bis 5 = sehr gut; Mittelwerte und Standardabweichungen; $n = 8$)

3.3.3 Diskussion

Im Allgemeinen war es allen Probanden möglich, das taktilen Fenstersystem mit seiner zweidimensionalen Ausgabe zu bedienen. Es wurde allerdings auch deutlich, dass sich die Benutzer erst an eine derartige Interaktionsweise gewöhnen müssen und darüber hinaus auch ein gewisses räumliches Vorstellungsvermögen mitbringen sollten oder sich zunächst erarbeiten müssen. Besonders wichtig für eine effiziente und eigenständige Bedienung ist dabei vor allem ein umfangreiches Training.

Aufgrund ihrer Äquidistanz wurde auch die dargestellte Brailleschrift von einigen Probanden als gewöhnungsbedürftig empfunden. Inwieweit dies Einfluss auf das effiziente Lesen hat, ist zu diesem Zeitpunkt allerdings unklar. In der Untersuchung wurden neue Fenster jeweils in der Arbeitsansicht geöffnet, mit Ausnahme des Desktops, welcher in der Überblicksansicht in der kleinsten Zoomstufe geöffnet wurde. Es ist somit an dieser Stelle nicht möglich, zu bestimmen, in welcher Ansichtsart und welchem Zoomlevel ein neues Fenster gestartet werden sollte.

Innerhalb der begrenzten Testzeit haben die Probanden zwar die Notwendigkeit der Ansichtsarten erkannt, allerdings konnten sie noch keine Vorstellung darüber gewinnen, wie man mit den verschiedenen Ansichtsarten arbeiten würde. Eine geeignete Schulung sollte später nicht nur die Funktionalitäten und Tastenkommandos aufführen, sondern auch Hinweise dazu liefern, für welche konkreten Aufgaben die Ansichtsarten hilfreich sind. Beim Wechsel zwischen den Ansichtsarten spielt dabei auch deren Synchronisierung eine wichtige Rolle, um nicht nur das Bewahren der Orientierung zu unterstützen, sondern auch ein effizientes Arbeiten auf dem taktilen Flächendisplay zu ermöglichen. Vor allem bei Ansichtsarten ohne Braille zeigte sich die Notwendigkeit der multimodalen Ausgabe in Form zusätzlicher auditiver Informationen.

Die Strukturleiste als Hilfsmittel zum Auffinden fett geschriebener Wörter hat im Falle der Arbeitsansicht allen Probanden sehr geholfen. Inwieweit sie die Erkundung in realen Nutzungsszenarien unterstützen kann, wird allerdings nicht nur von der Informationsdichte eines Dokuments sowie der Anzahl an angezeigten Strukturelement-Typen abhängig sein, sondern auch von der Ansichtsart, in welcher dieses Hilfsmittel verwendet wird. Beispielsweise lassen

die grafischen Ansichtsarten auch ein horizontales Scrollen zu anstatt die Informationen nur zeilenweise auszugeben. Dies führt dazu, dass sich auch mehrere verschiedene Strukturelemente in einer Zeile befinden können, was die Ausgabe in der Strukturleiste deutlich komplexer macht.

Die Frage, inwieweit das Fenstersystem blinden Benutzern dabei helfen kann, ein besseres Verständnis über visuelle Benutzungsoberflächen zu erlangen, kann an dieser Stelle nicht vollständig geklärt werden. Allerdings lässt das Beispiel PowerPoint (vgl. Abschnitt 3.2.4) vermuten, dass die verschiedenen Ansichtsarten durchaus dazu beitragen können, unterschiedliche Sichtweisen auf eine Anwendung und damit ein umfassenderes Verständnis zu ermöglichen.

3.4 Zusammenfassung

Aufgrund der großflächigen Ausgabe taktiler Stiftplatten finden sich deren besondere Anwendungsgebiete vor allem in der Darstellung von grafischen Inhalten und Benutzungsoberflächen. Zur konsistenten Strukturierung der Informationen wurde bereits in einer früheren Arbeit der Autorin die Konzeption eines taktilen Fenstersystems vorgenommen. Dabei wurden konkrete Anforderungen an die Interaktion identifiziert, welche nicht nur die notwendigen Funktionalitäten beim Zugang zu einer GUI, sondern insbesondere auch die Bedürfnisse und gewohnten Arbeitsweisen blinder Menschen berücksichtigen.

Als Kernpunkt dieses Kapitels wurden die besonderen Interaktionstechniken des für die Stiftplatte entwickelten taktilen Fenstersystems beschrieben. Dieses besteht aus sechs Bereichen und bietet vier verschiedene Arten der taktilen Informationsvisualisierung. Auf diese Weise hat der Benutzer nicht nur die Möglichkeit, gleichzeitig auf unterschiedliche Informationen des Dokuments zuzugreifen, sondern kann die Inhalte auch in verschiedenen Detailgraden und Sichtweisen erkunden. Die Synchronisation zwischen diesen Ansichtsarten erlaubt dabei sowohl die Bewahrung, als auch das Verstehen des Kontexts innerhalb einer Anwendung.

Da neuartige taktile Flächendisplays, wie das BrailleDis 9000 und das BrailleDis 7200, berührungsempfindlich sind, erlauben sie dem Benutzer neben der Eingabe von Tastenbefehlen auch die Ausführung direkter Eingabeinteraktionen auf der taktilen Ausgabefläche. Die Nutzung der Gesteneingabe kann dabei völlig neue Dimensionen in der räumlichen Erkundung und Interaktion bieten sowie zweihändige Arbeitsweisen unterstützen.

Am Beispiel von PowerPoint konnte gezeigt werden, wie blinde Benutzer mit dem Fenstersystem und insbesondere mit den verschiedenen Ansichtsarten interagieren, um bisher nicht effektiv zu bewältigende Aufgaben zu lösen. Insgesamt konnten die allgemeinen Bedienkonzepte sowie die prinzipielle Eignung des Fenstersystems zur nicht-visuellen Vermittlung grafischer Benutzungsoberflächen im Rahmen erster Pilotuntersuchungen bestätigt werden. Dennoch sind weitere Benutzerstudien notwendig, um konkrete Aussagen zur Effektivität und Effizienz des Systems in verschiedenartigen Nutzungsszenarien treffen zu können.

Entwurf einer Taxonomie für die taktile Interaktion auf flächigen Brailledisplays

Das folgende Kapitel widmet sich dem Ziel, relevante Aspekte der taktilen Interaktion innerhalb einer Taxonomie einzuordnen, um eine entsprechende Formalisierung und Systematisierung zu ermöglichen. Auf diese Weise lassen sich Systeme und Interaktionen leichter kategorisieren und miteinander vergleichen. Darüber hinaus können Entwickler entsprechender Systeme und Anwendungen Hilfestellungen zur Konzeption und Umsetzung erhalten. Hierfür muss die Taxonomie abbilden können, was auf welcher Art von Gerät passiert. Insbesondere sind dabei Benutzerhandlungen sowie Ein- und Ausgaben zu berücksichtigen.

Zunächst werden vorhandene Taxonomien im Bereich der Gestaltung von Benutzungsoberflächen und im Speziellen für die haptische Interaktion betrachtet. Als Basis für die zu entwickelnde Taxonomie wird anschließend eine Beschreibung von möglichen Handlungen während der Interaktion auf einem taktilen Flächendisplay vorgenommen. Daraus wird ein erster Taxonomie Ansatz entwickelt, der eine systematische Gestaltung und Evaluation von taktilen Benutzungsoberflächen unterstützen soll.

4.1 Vorhandene Taxonomien

Taxonomien, auch als Klassifikationsschemata bezeichnet, werden in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen verwendet, um Objekte entsprechend bestimmter Kriterien in Kategorien einzuordnen. In der Informationsverarbeitung dienen Taxonomien häufig dazu, Wissensbereiche inhaltlich zu strukturieren und ihnen somit eine einfache Semantik zuzuweisen. Im Gegensatz zu den komplexeren Ontologien [Gru09], welche insbesondere auch Beziehungen zwischen den einzelnen Begrifflichkeiten abbilden, werden die Daten in einer Taxonomie hierarchisch organisiert.

4.1.1 Taxonomien zur haptischen Interaktion

Neben Taxonomien, die eine allgemeine Klassifizierung von Benutzungsoberflächen in der Mensch-Computer Interaktion (z. B. [Chi90, Aga00]) oder die Einteilung nach Aufgaben in

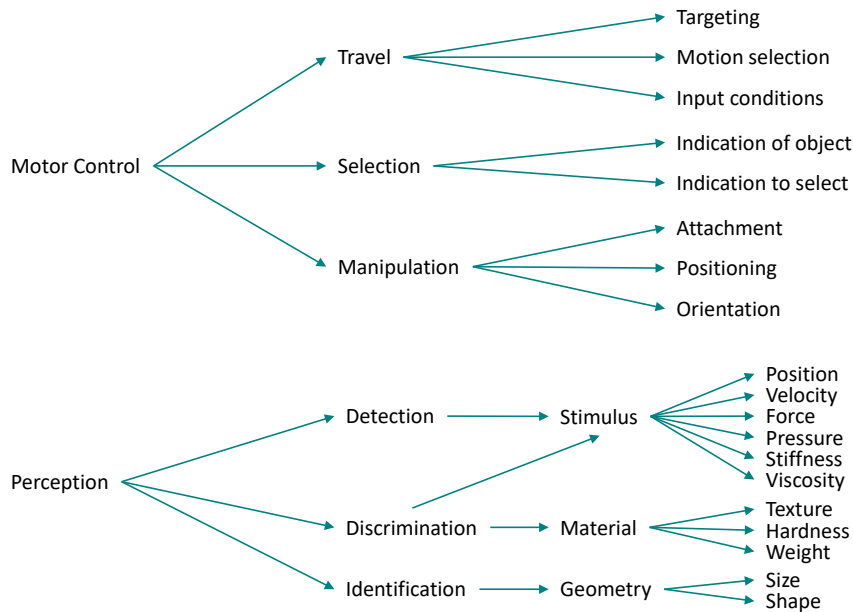


Abbildung 4.1: Taxonomie haptischer Interaktionsaufgaben nach Samur [Sam10]

Informationsvisualisierungen [Shn96] ermöglichen, existieren auch speziellere Systematiken, die sich auf Aspekte der haptischen Interaktion beziehen.

Laut Kirkpatrick und Douglas [KDO2] lassen sich in haptischen Systemen zwei verschiedene Interaktionsmodi unterscheiden. Auf der einen Seite sind dies motorische Handlungen (*motor control*), welche wiederum in Zielerfassung und Objektmanipulation unterteilt werden können. Auf der anderen Seite ist es die Wahrnehmung selber (*perception*), wobei zwischen geometrischer und materieller Wahrnehmung sowie der Beobachtung der Umgebung (*environmental monitoring*) unterschieden werden kann. Die Unterteilung in dieser Taxonomie beruht also direkt auf der entsprechenden Unterteilung der haptischen Sensorik (vgl. Kapitel 2.1). Basierend auf den allgemeinen Aufgabenkategorien in immersiven virtuellen Umgebungen, d. h. Bewegung des Blickfelds (*viewpoint motion control* bzw. *travel*), Selektion (*selection*) und Manipulation (*manipulation*), haben Bowman und Hodges [BH99] Taxonomien zu entsprechenden Interaktionstechniken aufgestellt. Samur [Sam10] kombiniert in seiner Taxonomie diese beiden Einteilungen miteinander (vgl. Abbildung 4.1).

Eine weitere Taxonomie zu haptischen Aktionen basiert auf zwei Dimensionen, dem allgemeinen Typ der Aktion (z. B. genaue motorische Handlung, taktile Reibung oder kooperative zweihändige Aufgabe) und dem Typ der erforderlichen Kräfte (Force und Torque) [BDW⁺03]. Diese Einordnung erscheint allerdings eher geeignet für virtuelle haptische Umgebungen mit Geräten wie dem Phantom.

Neben der Klassifizierung von bestimmten Handlungen in haptischen Systemen existieren unter anderem auch Taxonomien zur Betrachtung von Wahrnehmungsaufgaben (z. B. [SSCR01]), zu taktile Illusionen [Hay08] sowie zur Art der haptischen Ausgabe. Speziell für taktile Displays haben Kaczmarek und Bach-Y-Rita [KBYR95] beispielsweise eine Unterteilung nach der einbezogenen sensorischen Komponente vorgenommen. Dabei wird auf der obersten Ebene zwischen bewegten und stationären Bildern (Ausgaben) unterschieden sowie die Art der Benutzerkontrolle einbezogen. Darauf aufbauend kann für jede Art der Informationsaufnahme der Grad an notwendiger Kinästhesie bestimmt werden (vgl. Abbildung 4.2).

Auch für Tangible User Interfaces [Ish07], d. h. haptische Benutzungsoberflächen, bei denen die Interaktion auf physischen Objekten basiert, existieren entsprechende Taxonomien. Dabei erfolgt unter anderem eine Betrachtung von zwei Dimensionen, in diesem Fall basierend auf

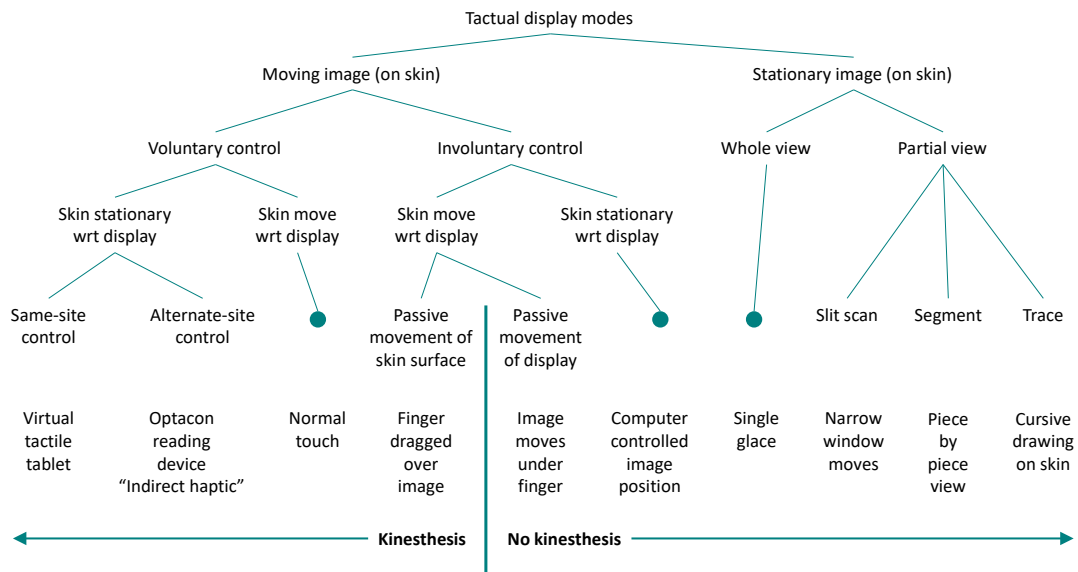


Abbildung 4.2: Taxonomie taktiler Anzeigearten nach Kaczmarek und Bach-Y-Rita [KBYR95]

dem Embodiment¹ und der angewandten Metapher [Fis04]. Zudem gibt es Klassifizierungen basierend auf sozialen [HB06] oder pädagogischen Aspekten [Mar07].

Die betrachteten Taxonomien erlauben meist eine Klassifizierung nach Aufgabenarten oder konkreten Systemeigenschaften. Sie werden oft dazu verwendet, um zu identifizieren, welche Aktionen in virtuellen Umgebungen simuliert und bei Verwendung unterschiedlicher Geräte miteinander verglichen werden können. Auf diese Weise kann das Verständnis von Interaktionstechniken verbessert und damit Problemen in der Usability von interaktiven Systemen entgegen gewirkt werden. Zweidimensionale Kategorisierungen werden dabei häufig zur Einordnung einzelner Systeme verwendet, um diese und deren besondere Eigenschaften von anderen Systemen abzugrenzen. Zur ganzheitlichen Betrachtung der taktilen Interaktion scheinen jedoch mehr Dimensionen notwendig. Beispielsweise sind neben Aufgabentypen und konkreten Ausgabemodalitäten auch die verwendeten Eingabetechniken sowie zeitliche Relationen der Interaktion mit einzubeziehen. Nachfolgend soll deshalb auch ein Einblick in speziellere Taxonomien gegeben werden.

4.1.2 Taxonomien zu Eingabetechniken

Zur Klassifizierung von *Eingabegeräten* gibt es mehrere Ansätze. Die Taxonomie von Foley und seinen Kollegen [FWC84] führt eine Gruppierung nach *Interaktionsaufgaben* der Computergrafik (Selektion, Positionierung und Orientierung von Objekten, Festlegen eines Pfades, Quantifizierung bzw. Wertzuweisung sowie Texteingabe) und der Art der Eingabe (u. A. direkt, indirekt, numerisch usw.) durch und weist diesen dann konkrete Geräte zu (vgl. Abbildung 4.3). Beispielsweise kann eine Selektion direkt auf dem Bildschirm realisiert werden, in dem ein Lichtgriffel (light pen) oder ein Touchscreen (touch panel) verwendet wird. Diese Art der Taxonomie erlaubt somit, für jede Interaktionsaufgabe entsprechende Eingabetechniken und dafür geeignete Eingabegeräte für ein System zu identifizieren. Buxton [Bux83] hingegen bezieht in seiner Kategorisierung die Anzahl der Dimensionen (entspricht dem Freiheitsgrad der Eingabe) sowie die wahrgenommenen Eigenschaften (Position, Bewegung und Druck) ein (siehe Abbildung 4.4). Auf diese Weise lassen sich relevante Charakteristiken und Metaphern verschiedener Eingabegeräte gegenüberstellen.

¹ Embodiment bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die körperliche Verbundenheit des Benutzers mit der Ein- und Ausgabe sowie den Grad der Immersion.

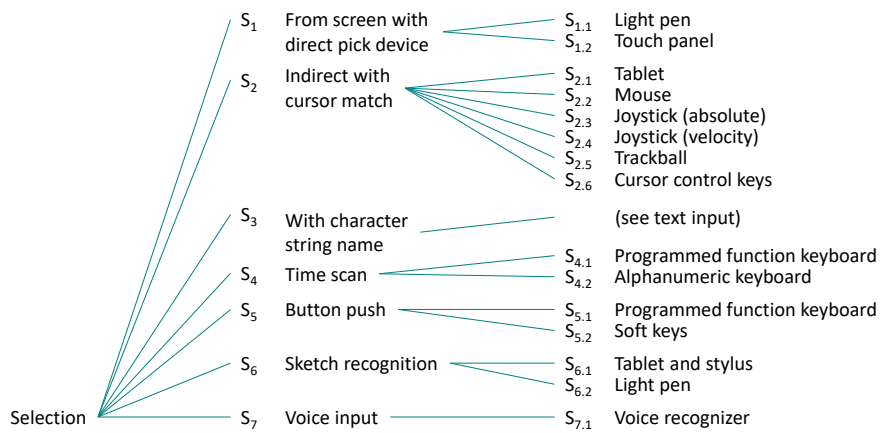


Abbildung 4.3: Taxonomie für Selektionstechniken nach Foley [FWC84]

		Number of Dimensions							
		1		2			3		
Property Sensed	Position	Rotary Pot	Sliding Pot	Tablet & Puck	Tablet & Stylus	Light Pen	Isotonic Joystick	3D Joystick	M
					Touch Tablet	Touch Screen			T
	Motion	Continuous Rotary Pot	Treadmill	Mouse			Sprung Joystick Trackball	3D Trackball	M
			Ferinstat				X/Y Pad		T
	Pressure	Torque Sensor					Isotonic Joystick		T
		rotary	linear	puck	stylus finger horz.	stylus finger vertical	small fixed location	small fixed with twist	

Abbildung 4.4: Taxonomie für Eingabegeräte nach Buxton [Bux83]

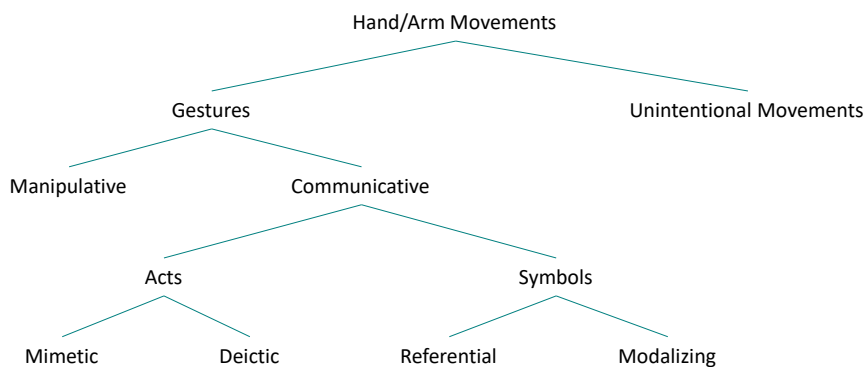


Abbildung 4.5: Taxonomie für Gesten in der Mensch-Computer Interaktion nach Pavlovic [PSH97]

Da die in dieser Arbeit verwendete Stiftplatte eine berührungsempfindliche Oberfläche besitzt, ist neben der Nutzung physischer Geräte bzw. Tasten auch die Eingabe mittels Gesten möglich. Zur *Klassifizierung von Gesten* gibt es zahlreiche Taxonomien, wobei vor allem die Abstrahierung der Bewegung als grundsätzliche Dimension zur Beschreibung verwendet wird. Gesten können demzufolge prinzipiell in Aktionen sowie Symbole unterschieden werden [Que94]. Basierend darauf haben Pavlovic et al. [PSH97] eine Taxonomie für Handgesten in der Mensch-Computer Interaktion erarbeitet, die insbesondere zwischen manipulativen Gesten zur direkten Bearbeitung von Objekten und kommunikativen Gesten zum Auslösen fest definierter Aktionen unterscheidet (vgl. Abbildung 4.5). Daneben werden teilweise auch entsprechende Handposen sowie der Ausführungsfluss [WMW09, FBMW09] oder auch Aspekte wie die Anwendungsdomäne, die aktivierende Technologie (Eingabemodalität) sowie die Systemantwort (Ausgabemodalität) mit einbezogen (z. B. [KSO5]), um gestenbasierte Interaktionen zu klassifizieren.

4.2 Ansätze zur Entwicklung einer geeigneten Taxonomie

Zur Klassifizierung von haptischer Interaktion im Allgemeinen scheint der Einbezug der Wahrnehmungsaspekte ein möglicher Ansatz zu sein. Im Gegensatz zur handlungsbezogenen Sichtweise von Kirkpatrick und Douglas [KDO2] soll die Unterteilung jedoch nicht auf den Interaktionsmodi basieren, sondern auf einer sensorischen Ebene. Zusätzlich zur beteiligten „*Wahrnehmungskomponente*“ (kinästhetisch vs. taktil) entsprechend der Klassifizierung nach Kaczmarek und Bach-Y-Rita [KBYS95] wird dabei allerdings noch eine weitere Dimension herangezogen, die „*Aktivität des Benutzers*“ (aktiv vs. passiv). Moderne haptische Benutzungsoberflächen lassen sich dann entsprechend Abbildung 4.6 einordnen. Es wird deutlich, dass taktile Displays einen sehr weitreichenden Bereich innerhalb dieses Gestaltungsraums einnehmen. Aus diesem Grund ist eine gesonderte Betrachtung bestimmter Ein- und Ausgabeprozesse in diesem Kontext notwendig. Für die Stiftplatte könnte dies wie in Abbildung 4.7 dargestellt aussehen. Ersichtlich wird hierbei, dass bei der Beschreibung taktiler Interaktion verschiedenartige Aspekte betrachtet werden müssen, um eine ganzheitliche Sichtweise darauf zu erhalten. Neben den technischen Voraussetzungen und Eigenschaften des Geräts, die insbesondere Einfluss auf die Ein- und Ausgabe haben, spielen auch die Handlungen des Benutzers während der Interaktion eine zentrale Rolle.

Die nachfolgend erarbeitete Taxonomie bezieht sich im Besonderen auf taktile Flächendisplays, bei denen die Ausgabe in der Regel statisch und in Form einer Matrix aus erhabenen bzw. gesenkten Punkten dargestellt und mittels aktiver Handbewegungen des Benutzers erkundet wird. Je nach der verfügbaren Anzeigefrequenz des konkreten Displays sind natürlich auch schnell blinkende Ausgaben möglich. Jene dynamischen Ausgaben bilden bei dieser Art von Display allerdings eher die Ausnahme, da sie weniger der Informationsvermittlung als mehr der Aufmerksamkeitssteuerung des Benutzers dienen (sollten).

4.2.1 Beschreibung der Benutzerhandlungen während der Interaktion auf taktilen Flächendisplays

Die folgende Betrachtung stellt keine vollständige Liste aller möglichen Aktionen auf taktilen Ausgabegeräten dar. Ziel ist es eher, eine allgemeine Klassifizierung typischer Handlungen auf einem taktilen Flächendisplay vorzunehmen.

Einzelhandlungen basierend auf konkreten Interaktionsaufgaben des Bewegungsapparates (motor control) und der Wahrnehmung (perception) wie bei Samur ([Sam10], vgl. Abschnitt 4.1) sind zwar eindeutig klassifizierbar, allerdings ist die reale Interaktion schwer zerlegbar in disjunkte atomare Handlungen. Beispielsweise erfordert die Detektion eines Stimulus (perception) im Sinne der aktiven Wahrnehmung die gleichzeitige Bewegung der Hand (motor control) auf der Stiftplatte. Aus diesem Grund erscheint der Ansatz der *Elementaraufgaben* nach ISO 9241-910 [ISO11b] als zielführender zur Beschreibung taktiler Interaktionen.

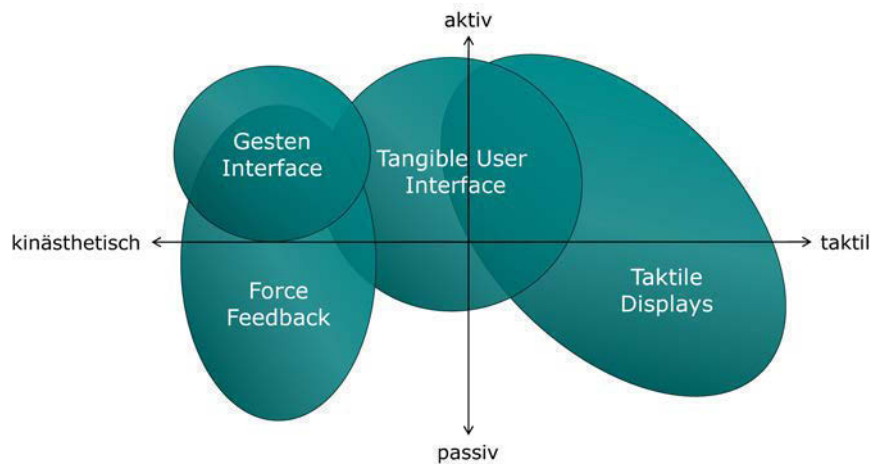


Abbildung 4.6: Gestaltungsraum haptischer Benutzungsoberflächen bezüglich Wahrnehmungskomponente und Aktivität des Benutzers

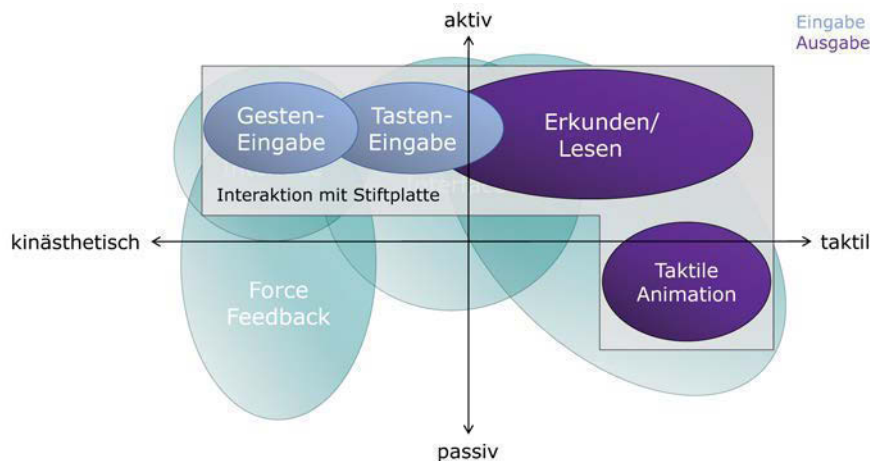


Abbildung 4.7: Einordnung der Interaktion mit der Stiftplatte innerhalb des Gestaltungsraums haptischer Benutzungsoberflächen

Die originalen Elementaraufgaben wurden für die allgemeine haptische Interaktion entwickelt. Dies schließt neben der Interaktion auf taktilen Displays auch die Arbeit mit virtuellen Objekten bei haptischen Geräten, wie dem Phantom, mit ein. Allerdings gibt es einige Unterschiede zwischen realen taktilen und virtuellen Force Feedback Geräten. Zum Beispiel ermöglichen physisch-taktile Ausgaben eine Art periphere Wahrnehmung, wohingegen bei virtuellen Geräten nur die direkt angebotenen Körperregionen als Kontaktpunkte zur digitalen Darstellung dienen. Um die Besonderheiten der Interaktion auf taktilen Displays in der Taxonomie zu berücksichtigen, scheint eine Anpassung der Elementaraufgaben notwendig. Folgende Änderungen im Vergleich zu den Elementaraufgaben beim ISO Standard wurden vorgenommen. Die angepassten Elementaraufgaben nach ISO 9241-910 sind in Abbildung 4.8 dargestellt.

- „Betätigen“ im Sinne von Bedienen bzw. Beeinflussen wird durch den Begriff „Manipulieren“ ersetzt, da dieser als passender erscheint. Zudem erfolgt eine weitere Unterteilung dieser Aufgabe in „Bezugssystem“ und „Objekt“. Auf diese Weise können Unteraufgaben besser kategorisiert und unterschieden werden.
- „Auswählen“ erhält gleichzeitig die Bedeutung von „Aktivieren“. Für Objekte und Gruppen bedeutet dies, dass nicht nur zusätzliche Informationen über dieses Objekt ausgegeben

werden (vergleichbar mit dem Explore by Touch Prinzip), sondern auch ein anschließendes Manipulieren möglich wird.

- Der Begriff „Markieren“ bezieht sich entsprechend der Definition im ISO Standard vor allem auf das Auffinden und Erkennen von Objekten. Im Kontext taktiler Interaktion scheint deshalb die Verwendung des Wortes „Identifizieren“ bezogen auf die Wahrnehmung von entsprechenden Oberflächeneigenschaften als geeigneter. Um eine strukturierte Einordnung verschiedenartiger Inhaltselemente zu gewährleisten, wurden zudem konkrete Unterkategorien (Text, Widget, Grafikobjekt) hinzugefügt. Die „Betrachtung charakteristischer Eigenschaften“ wurde dabei ebenfalls in diese Kategorie aufgenommen. Im ISO Standard befindet sich dieser Eintrag unter der Elementaraufgabe „Betätigen“. Da es sich beim Betrachten jedoch um keine Manipulationsaufgabe, sondern eher um eine Identifizierungsaufgabe handelt, scheint ein Verschieben dieser Kategorie als zielführender.

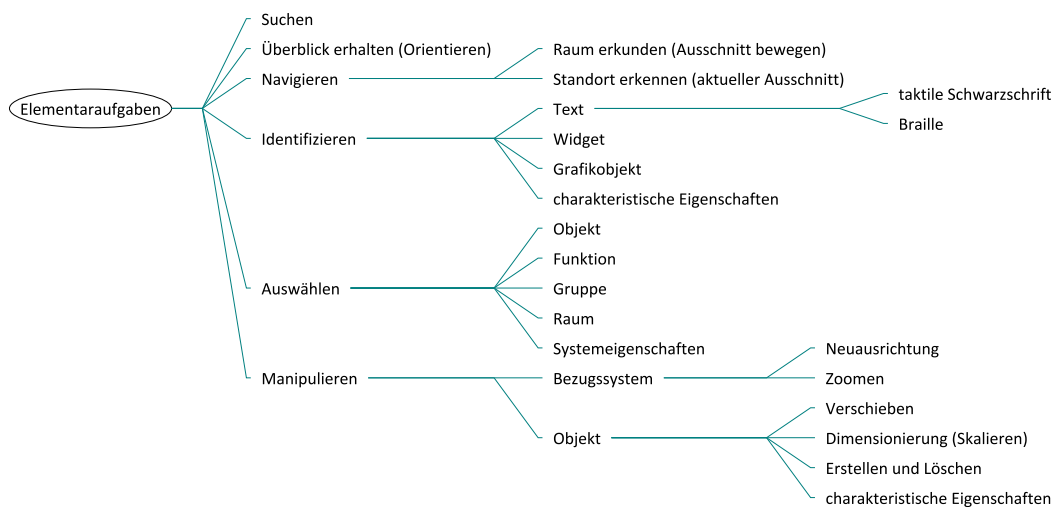


Abbildung 4.8: Elementaraufgaben für die taktile Interaktion

Eine besonders wichtige Handlung auf einem taktilen Flächendisplay stellt das Lesen bzw. Wahrnehmen von Inhalten dar. Wie in Kapitel 2.2.3 vorgestellt, gibt es verschiedene Strategien wie sich die Hände beim Erkunden bewegen können. Eine besondere Berücksichtigung dieses Aspekts in der Taxonomie ist somit ebenfalls wichtig. Für haptische Systeme, die auf dreidimensionalen Eingaben basieren, wie beispielsweise bei der Interaktion mit Robotersystemen oder Tangible User Interfaces, existieren bereits umfangreiche Taxonomien zu möglichen Handstellungen (z. B. [CW86, FRS⁺16]). Für die Betrachtung planarer taktiler Interaktionen sind derartige, vorwiegend statische, Einordnungen nicht zielführend. Stattdessen spielt für die Beschreibung von *Handbewegungen* neben der Bewegungsrichtung auch der zeitliche Aspekt eine große Rolle. Die Bewegungen beider Hände können beispielsweise nicht nur sequentiell, sondern auch parallel oder überlappend stattfinden. Allen [All83] hat eine Reihe von zeitlichen Relationen aufgestellt (vgl. Abbildung 4.9), die zur Modellierung geeignet scheinen.

4.2.2 Dimensionen der taktilen Interaktion

Grundsätzlich liegt der taktilen Interaktion das Modell der Mensch-Computer Interaktion zugrunde (vgl. Kapitel 1). Das heißt, zur ganzheitlichen Betrachtung genügt es nicht, lediglich die Interaktion an sich einzubeziehen. Das verwendete Gerät, der Benutzer bzw. in diesem Fall seine Intention und der Kontext der Interaktion spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Da sich die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Einordnung allerdings auf das konkrete Beispiel der Interaktion mit der Stiftplatte bezieht, ist der allgemeine Kontext bereits festgelegt, d. h. ein

Relation	Symbol	Symbol for Inverse	Pictoral Example
<i>X before Y</i>	<	>	XXX YYY
<i>X equals Y</i>	=	=	XXX YYY
<i>X meets Y</i>	m	mi	XXXXYY
<i>X overlaps Y</i>	o	oi	XXX YYY
<i>X during Y</i>	d	di	XXX YYYYYY
<i>X starts Y</i>	s	si	XXX YYYYY
<i>X finishes Y</i>	f	fi	XXX YYYYY

Abbildung 4.9: Zeitliche Relationen nach Allen [All83]

stationärer Desktop-Arbeitsplatz für blinde Benutzer. Der konkrete Arbeitskontext (Aufgaben, soziale und organisatorische Einordnung usw.) sowie die spezifischen Umgebungsbedingungen (z. B. Lautstärke im Raum) werden an dieser Stelle nicht näher betrachtet. Hierfür wird stattdessen auf die Klassifizierung des Kontext bei der ACM [HBC⁺92] sowie bei Schmidt et al. [SBC99] verwiesen. Die wichtigsten Begriffskategorien im Zusammenhang mit der taktilen Interaktion auf einer Stiftplatte, d.h. *Gerät*, *Intention* und *Interaktionsart* (vgl. auch Abbildung 4.10), werden im Folgenden näher betrachtet. Eine vollständige grafische Darstellung der Taxonomie findet sich in Anhang B.

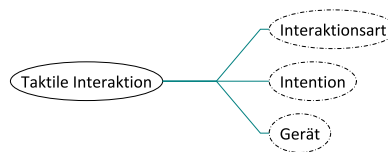


Abbildung 4.10: Kategorien der taktilen Interaktion

4.2.2.1 Gerät

Zur Beschreibung des verwendeten Geräts sind neben allgemeinen Eigenschaften insbesondere die Möglichkeiten zur Ein- und Ausgabe relevant (vgl. Abbildungen 4.11 bis 4.14). Da sich diese Arbeit mit grafisch-taktilen Displays beschäftigt, deckt die angegebene Taxonomie vorrangig diese Art ab. Insbesondere Geräte zur Krafrückmeldung besitzen teilweise andere Eigenschaften (z. B. Freiheitsgrade), die an dieser Stelle nicht mit betrachtet werden. Im Gegensatz zu den anderen Dimensionen der taktilen Interaktion muss das Gerät nicht bei jedem Interaktionsschritt neu thematisiert werden. Da sich die jeweiligen Eigenschaften im Normalfall nicht ändern, genügt hier die einmalige Beschreibung. Sobald sich jedoch während eines Nutzungsszenarios die Eigenschaften ändern, indem zum Beispiel ein Erweiterungsgerät hinzugenommen wird, muss das Gerät an dieser Stelle neu beschrieben werden.

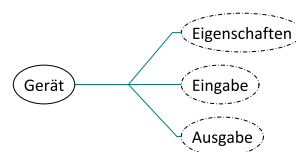


Abbildung 4.11: Aspekte taktiler Geräte

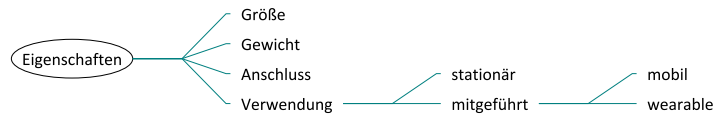


Abbildung 4.12: Taxonomie zu allgemeinen Eigenschaften taktile Geräte

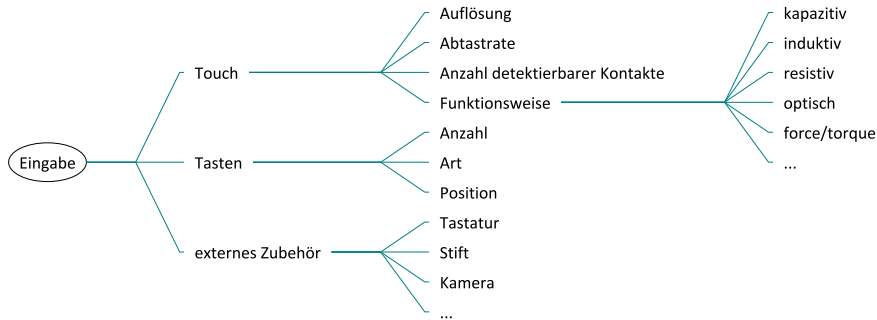


Abbildung 4.13: Taxonomie zu Eingabeeigenschaften taktile Geräte

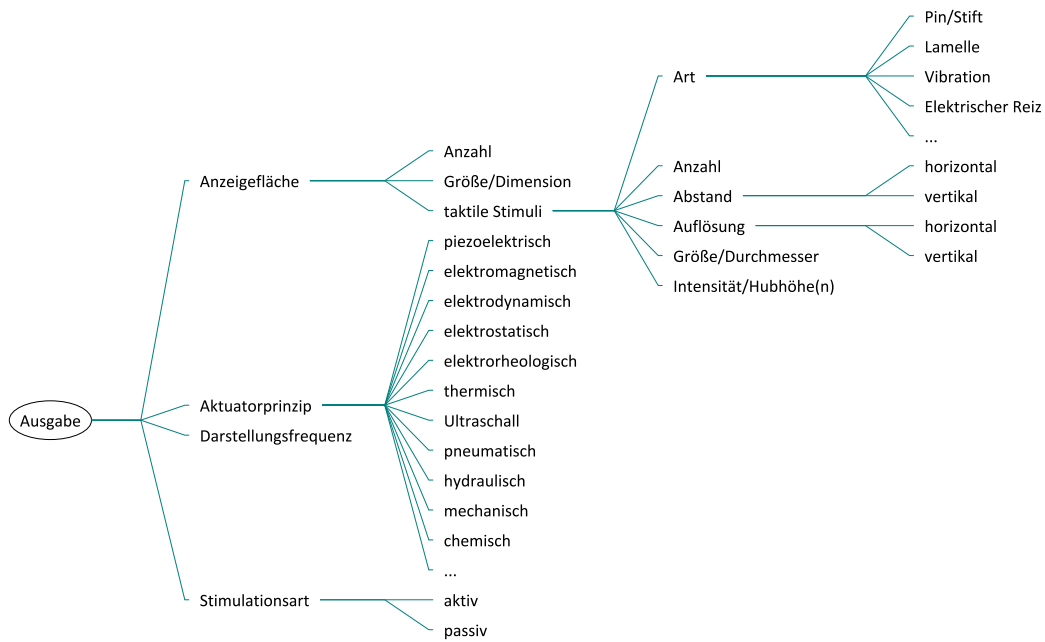


Abbildung 4.14: Taxonomie zu Ausgabeeigenschaften taktile Geräte

4.2.2.2 Intention

Interaktionen eines Benutzers können entweder unbewusst stattfinden oder auf einer konkreten Intention basieren. Im Fall der bewussten Interaktion kann eine der oben angesprochenen *Elementaraufgaben* zur Klassifizierung der Intention herangezogen werden (vgl. Abbildung 4.8). Unbewusste Interaktionen spielen zwar für die idealisierte Beschreibung der Interaktion keine Rolle, können im realen Kontext jedoch unbeabsichtigte oder fehlerhafte Eingaben hervorrufen. Zum Beispiel kann das Ablegen der Handballen auf dem Ausgabebereich der Stiftplatte während der Ausführung einer Geste dazu führen, dass eine falsche Aktion ausgelöst wird. In der in Abbildung 4.15 dargestellten Taxonomie zur Intention werden deshalb beide Arten einbezogen.

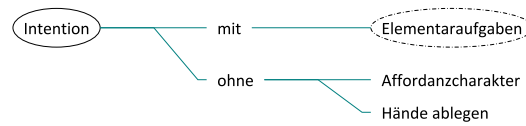


Abbildung 4.15: Taxonomie zur Intention bei der taktilen Interaktion

Zu beachten ist, dass sogar eine für Außenstehende unbewusst wirkende Handbewegung eine konkrete Intention verfolgen kann. Das Ablegen des Handballens könnte dem Benutzer auch zur passiv-taktilen Informationsaufnahme dienen. Bei der Manipulation eines Objekts auf der Stiftplatte im Rahmen des Tangram Zeichenarbeitsplatzes (vgl. Abschnitt 7.3.1) ist es zum Beispiel vorstellbar, dass Anwender mit einer Hand Editierfunktionen auslösen, während die andere Hand auf der taktilen Ausgabefläche ruht, um die entsprechenden Änderungen wahrzunehmen.

4.2.2.3 Interaktionsart

Die Interaktion auf einem taktilen Gerät selber kann in drei Unterkategorien unterteilt werden: 1) die Handbewegung des Benutzers, 2) die Eingabe, und 3) die Ausgabe (vgl. Abbildung 4.16).

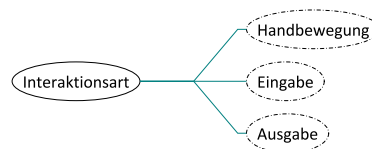


Abbildung 4.16: Aspekte taktiler Interaktionsarten

Bei der *Handbewegung* wiederum spielt nicht nur der Bewegungsablauf eine Rolle, sondern auch die mögliche Interpretation durch das System (vgl. Abbildung 4.17). Zur Beschreibung des Bewegungsablaufs sind neben den Händen selber sowie den entsprechenden Start- und Zielpunkten bzw. der Trajektorie (Bewegungspfad) insbesondere auch die in Abschnitt 4.2 angesprochenen zeitlichen Relationen nach Allen [All83] zu berücksichtigen.

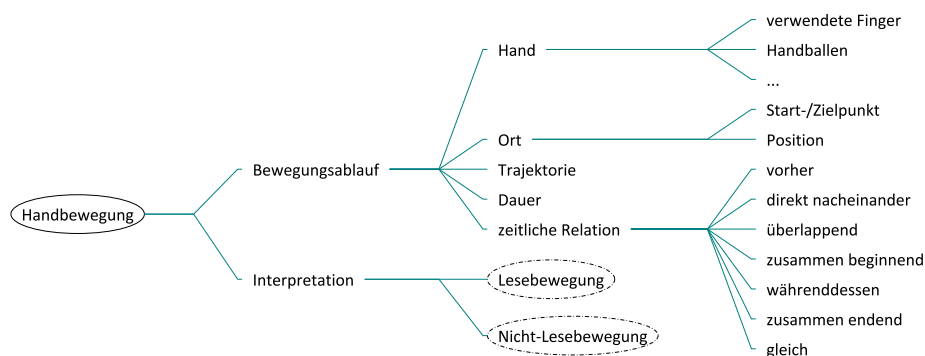


Abbildung 4.17: Taxonomie zu Handbewegungen bei der taktilen Interaktion

Basierend auf der Art der Handbewegung muss bei der Interpretation zwischen Lesebewegung und Nicht-Lesebewegung unterschieden werden. *Lesebewegungen* lassen sich weiter anhand der verwendeten Strategie klassifizieren (vgl. Abbildung 4.18). Dabei wurden innerhalb der Taxonomie die Handbewegungsmuster beim Lesen von Braille nach Wormsley [Wor96] sowie die Strategien zur Grafikerkundung nach Berlá [Ber72] miteinander kombiniert (siehe auch Abbildung 4.19). Beim Anwenden der Taxonomie sollte darauf geachtet werden, dass die Art der Lesebewegung auf dem aktuellen Stiftplattenausschnitt nicht zu verwechseln ist mit der Art

der Erkundungsstrategie zwischen den Ausschnitten (Panningstrategie). Letztere kann ebenfalls ähnliche Muster aufweisen (z. B. horizontal, vertikal oder spiralförmig).

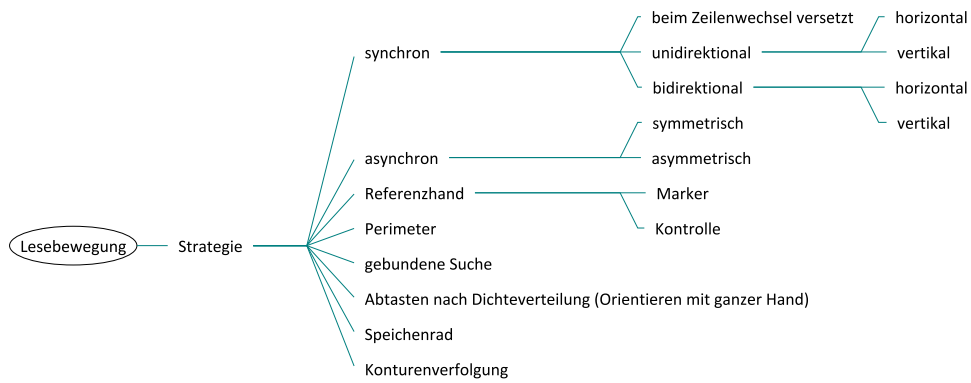


Abbildung 4.18: Taxonomie zu möglichen taktilen Lesebewegungsstrategien

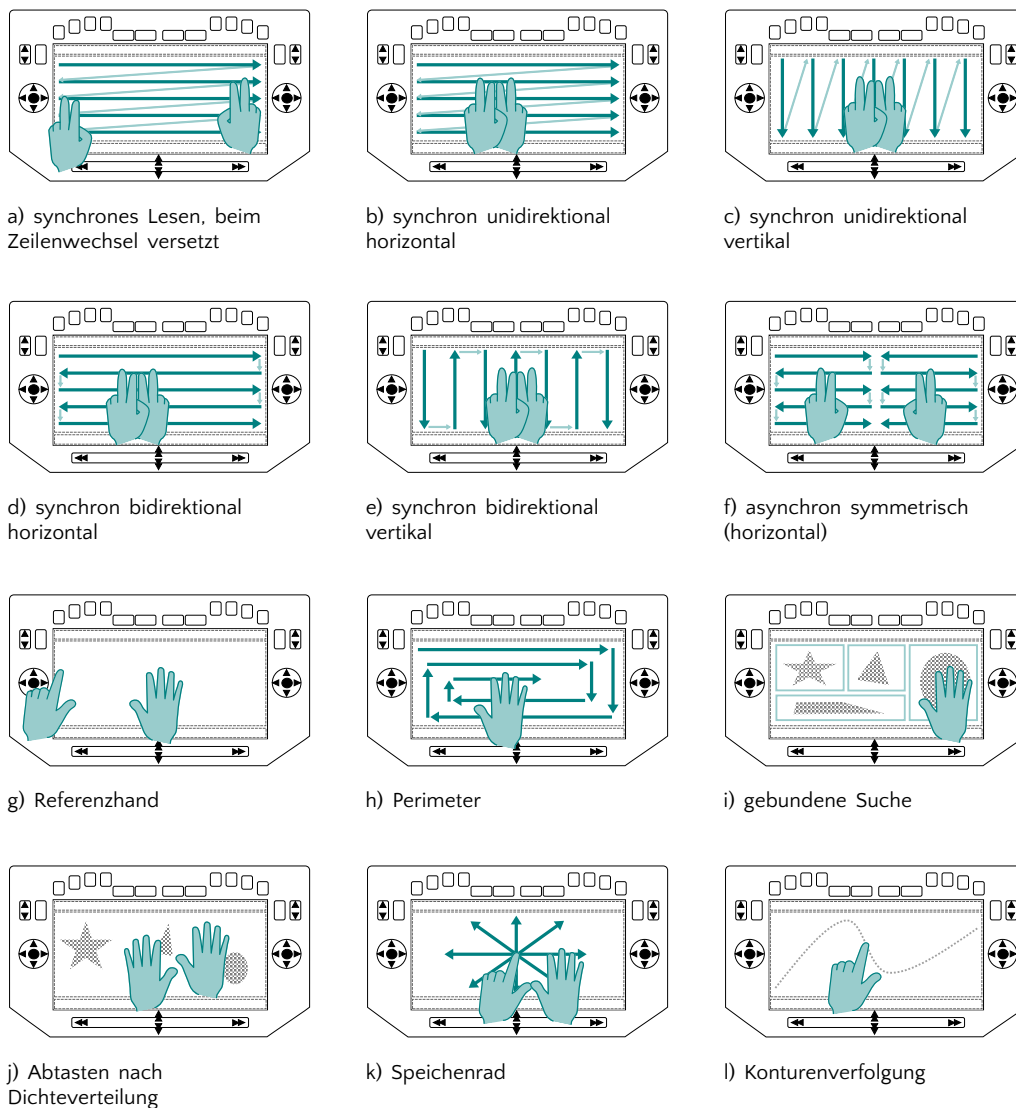


Abbildung 4.19: Schematische Darstellung typischer taktiler Lese- und Erkundungsstrategien

Nicht-Lesebewegungen (vgl. Abbildung 4.20) sind im Normalfall eng verbunden mit der Eingabe, insbesondere wenn es sich um eine Gestenausführung oder die Bewegung der Hände zu einem Eingabegerät bzw. Bedienelement handelt. Darüber hinaus kann auch das Erkunden des Geräts sowie die Führung der Hände durch eine Animation oder eine Art Korridor (vgl. Schmidt [SW09]) als Nicht-Lesebewegung klassifiziert werden.

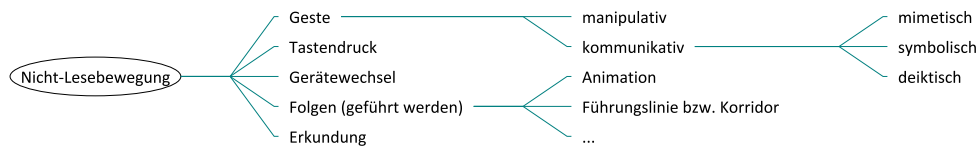


Abbildung 4.20: Taxonomie zu taktilen Nicht-Lesebewegungen

Bei der *Eingabe* sind die angewandten Eingabemethoden bzw. zusätzlich verwendete Geräte sowie eine Referenz zur auslösenden Hand vorzusehen (siehe Abbildung 4.21). Als Resultat der durch das System interpretierten Eingabe wird durch das taktile Anzeigegerät eine entsprechende *Ausgabe* generiert. Diese kann einerseits stark abhängig vom Gerät selber, andererseits aber auch sehr komplex sein. Die in Abbildung 4.22 vorgeschlagene Taxonomie erhebt deshalb nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, sondern stellt vor allem einen möglichen Ansatz für das Beispiel der Interaktion mit der Stiftplatte dar. Wichtige Aspekte der Ausgabe sind dabei insbesondere die Modalität, der zeitliche Verlauf sowie die konkreten Eigenschaften der Informationspräsentation (u. a. Darstellungsbereiche, Art der Darstellung und Objekteigenschaften).

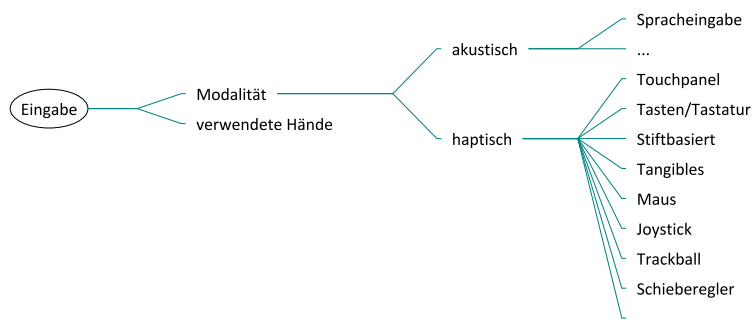


Abbildung 4.21: Taxonomie zur Eingabe bei der taktilen Interaktion

4.2.3 Sichtweisen auf die taktile Interaktion

Je nach Blickwinkel können die oben vorgestellten Dimensionen der taktilen Interaktion verschiedenartig zueinander in Relation stehen. In Abbildung 4.23 sind die entsprechenden Prozessmodelle für die im Rahmen dieser Arbeit relevanten Sichtweisen visualisiert.

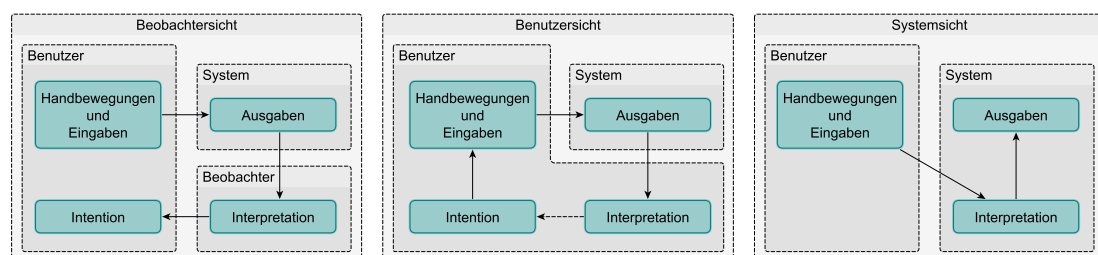


Abbildung 4.23: Prozessmodell der taktilen Interaktion

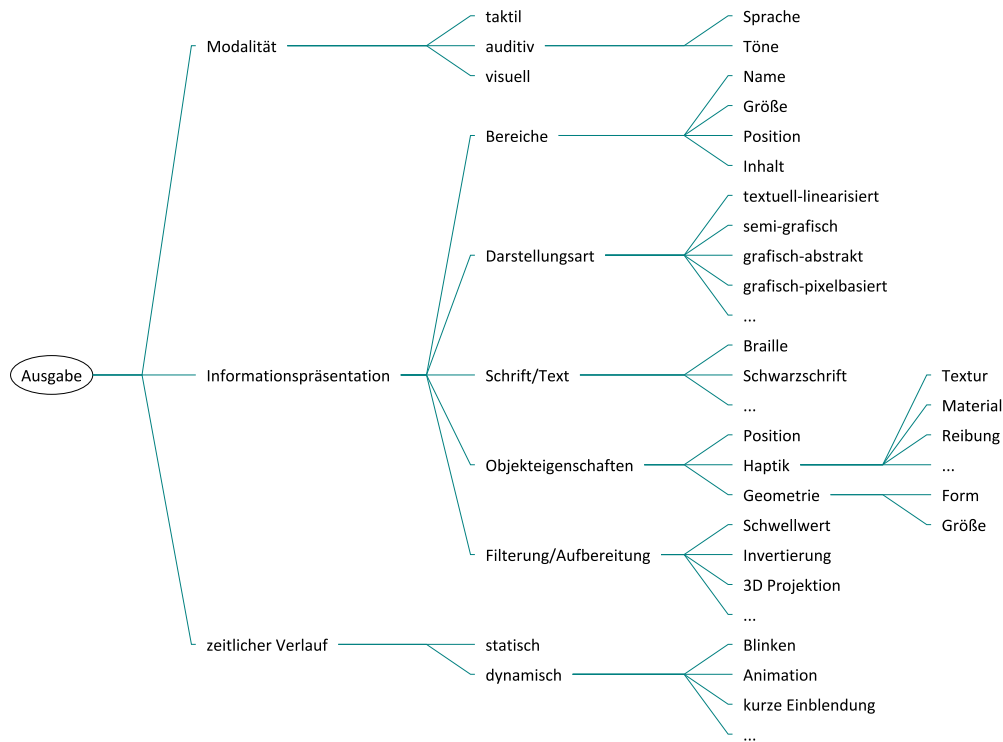


Abbildung 4.22: Taxonomie zur Ausgabe auf taktilen Flächendisplays

Beobachtersicht: Ein externer Beobachter sieht die Handbewegungen und Eingaben des Benutzers auf dem Gerät sowie die daraus resultierenden Ausgaben. Diese wiederum werden durch ihn interpretiert, woraus er auf die Intention des Benutzers schließen kann. Diese Sichtweise ist insbesondere zur Auswertung von Benutzerstudien bzw. zur Beschreibung der taktilen Interaktion aus der objektiven Sicht eines Beobachters anwendbar.

Benutzersicht: Zu Beginn einer Interaktion hat jeder Benutzer eine Intention, die abhängig vom Gerät zu bestimmten Handbewegungen sowie Eingabehandlungen führt. Die resultierende Ausgabe wird anschließend von ihm interpretiert und stimmt im Idealfall mit seiner Intention überein. Diese Sichtweise stellt die Grundlage zur Erstellung von Schulungen für die Bedienung einer taktilen Stiftplatte dar.

Systemsicht: Abhängig vom Gerät interpretiert das System Handbewegungen und Eingaben des Benutzers, wobei die Benutzerintention möglichst ideal getroffen werden sollte, um der Erwartungshaltung des Anwenders zu entsprechen und somit positiv auf die Zufriedenheit einzuwirken. Diese Sichtweise ist die Grundlage zur Entwicklung von Anwendungskomponenten, z. B. Gestenerkennung, Interaktionsmanager usw.

Die verschiedenen Sichtweisen können dabei helfen, die Taxonomie für unterschiedliche Einsatzgebiete geeignet einzusetzen. Beispielsweise ist für die Benutzersicht das Mapping von Intention und angebotenen Funktionalitäten eines Systems besonders wichtig. Für die Systemsicht wiederum ist vor allem die Interpretation von Handbewegungen sowie die Erzeugung von Ausgaben, die für das entsprechende Gerät angemessen sind, essentiell.

4.3 Anwendung der Taxonomie

Ein möglicher Weg zur Verifizierung der Generalisierbarkeit einer Taxonomie ist es, existierende Systeme und Techniken innerhalb der Taxonomie einzuordnen [BH99]. Im Folgenden werden

deshalb für jeden Aspekt der entwickelten Taxonomie ein paar Beispiele gegeben. Da die vorliegende Arbeit insbesondere die Interaktion auf den taktilen Flächendisplays BrailleDis 9000 und BrailleDis 7200 betrachtet (siehe Kapitel 7), beziehen sich die Beispiele auf diese Geräte.

4.3.1 Beschreibung des Geräts BrailleDis 7200

Am Beispiel des BrailleDis 7200 (vgl. auch Abbildung 4.24 sowie Abschnitt 2.5.4) kann eine Geräte-Beschreibung wie folgt aussehen:

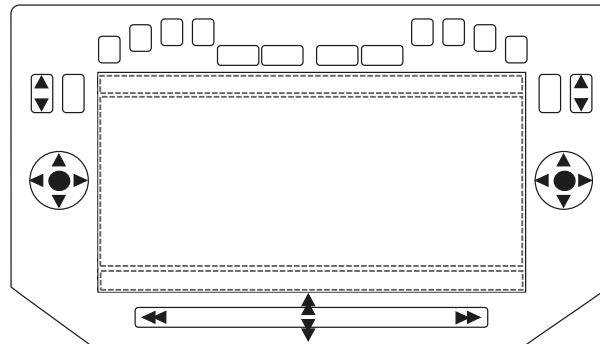


Abbildung 4.24: Schematische Darstellung des BrailleDis 7200

- Eigenschaften
 - Größe: 410 x 255 x 60 mm (B x T x H)
 - Gewicht: 5,5 kg
 - Anschluss: USB, separater Stromanschluss
 - Verwendung: stationär
- Ausgabe
 - Anzeigefläche
 - * eine Tastfläche mit 300 x 150 mm
 - * taktile Stimuli
 - Art: Pin/Stift
 - Anzahl: 120 x 60 (7200 Pins)
 - Abstand: 2,5 mm horizontal und 2,5 mm vertikal
 - Auflösung: 10 dpi horizontal und 10 dpi vertikal
 - Durchmesser: ca. 1 mm
 - Hubhöhe: ca. 0,7 mm
 - Aktuatorprinzip: piezoelektrisch
 - Darstellungsfrequenz: 20 Hz
 - Stimulationsart: passiv (Anmerkung: aktives Blinken von Pins möglich)
- Eingabe
 - Touch
 - * Auflösung: 60 x 24 (insgesamt 1440 Sensoren)
 - * Abtastrate: 50 Hz
 - * Anzahl detektierbarer Kontakte: multitouchfähig
 - * Funktionsweise: kapazitiv

- Tasten
 - * 14 Standardtasten (12 oben, 2 links/rechts oben)
 - * 2 Wippschalter (links und rechts)
 - * 2 Cursorkreuze mit jeweils 5 Tasten (links und rechts)
 - * 1 Navigationsleiste (unten)
- externes Zubehör
 - * nicht notwendig

Zur weiteren Formalisierung der Position von Tasten, Tastflächen oder anderen relevanten Eigenschaften eines taktilen Displays wäre es beispielsweise möglich, diese mittels einer konkreten Beschreibung der Geometrie festzuhalten. Thimbleby [Thi07] schlägt im Kontext der Performanzanalyse mittels Fitts Law eine Angabe von Koordinaten in Form einer (x,y)-Matrix und dem Radius bzw. der Breite und Höhe von Buttons vor. Diese Art der Kodierung würde sich auch für eine formale Beschreibung physischer taktiler Geräte eignen.

4.3.2 Beschreibung von Interaktionen auf dem BrailleDis 7200

Die Interaktionen auf der Stiftplatte lassen sich, wie in Abschnitt 4.2 skizziert, basierend auf der Intention des Benutzers sowie den Aspekten zur Handbewegung, Eingabe und Ausgabe charakterisieren. Nachfolgend erfolgt beispielhaft die Beschreibung einer einfachen Eingabeinteraktion, im Konkreten anhand der Geste zum Einblenden der Strukturleiste, entsprechend der erarbeiteten Taxonomie. In Abbildung 4.25 findet sich eine schematische Darstellung dieser Interaktion am Beispiel des BrailleDis 7200. In Anhang C finden sich darüber hinaus zwei weitere Beispiele – das Lesen von Brailletext als einfache Erkundungsinteraktion sowie das Editieren eines Textfelds als komplexe Interaktion.

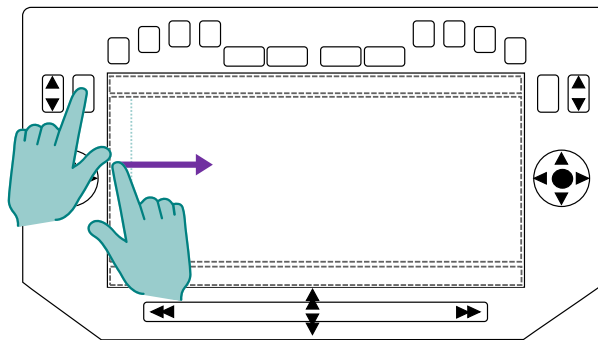


Abbildung 4.25: Schematische Darstellung der Interaktion zum Einblenden der Strukturleiste auf dem BrailleDis 7200

- Intention: Manipulieren des Bezugssystems (Neuausrichtung)
- Handbewegung
 - Bewegungsablauf
 - * rechte Hand
 - Finger: Zeigefinger
 - Ort: Startpunkt (0/25)², Zielpunkt (35/26)
 - Trajektorie: gerade Linie
 - Dauer: 0,8 Sekunden

² Start- und Zielpunkt werden in diesem Fall durch die Pin-Koordinaten mit Ursprung links oben angegeben.

- * linke Hand
 - Finger: Zeigefinger
 - Ort: linke Gestentaste
 - Trajektorie: Absenken/Anheben
 - Dauer: 1 Sekunde
- * zeitliche Relation: währenddessen (rechte Hand *d* linke Hand)³
 - Interpretation: Nicht-Lesebewegung (mimetische Geste)
- Eingabe
 - Modalität: haptisch (Taste als aktivierende Technologie + Geste)
 - verwendete Hände: linke Hand für die Taste und rechte Hand für die Geste
- Ausgabe *nach der Benutzerinteraktion*
 - Modalität: taktil⁴
 - Informationspräsentation
 - * Bereiche
 - Kopfbereich (AreaPositions.Top⁵, 120 x 6 Pins)
 - Detailbereich (AreaPositions.Bottom, 120 x 6 Pins)
 - Strukturleiste (AreaPositions.Left, 4 x 48 Pins)
 - Darstellungsbereich (AreaPositions.Middle_Left, 116 x 48 Pins)
 - * Darstellungsart: semi-grafisch (Symbolansicht)
 - * Schrift/Text: Braille
 - * ...⁶
 - zeitlicher Verlauf: statisch

4.3.3 Zuordnung der Stiftplattenbedienung zu den Elementaraufgaben

Auch die angepassten Elementaraufgaben der ISO 9241-910 lassen sich erfolgreich den Funktionalitäten des HyperReaders sowie des Tangram Arbeitsplatzes zuweisen.⁷ Tabelle 4.1 zeigt beispielhaft das Mapping der Funktionalitäten zur Elementaraufgabe *Manipulieren des Bezugssystems*. Die vollständigen Zuordnungstabellen finden sich in Anhang D. Die Tabelle kann bei der Entwicklung und Testauswertung als Hilfsmittel verwendet werden, um eine gewünschte Funktionalität der entsprechenden Elementaraufgabe zuzuordnen. Auf diese Weise können sich Anwendungsentwickler beispielsweise auch einen schnellen Überblick darüber verschaffen, welche konkreten Funktionen notwendig sind, um den Anforderungen an taktile Benutzungsoberflächen nach ISO 9241-910 zu genügen. Auf der anderen Seite kann die formale Beschreibung von Interaktionen auf der Stiftplatte gemäß der erarbeiteten Taxonomie vereinfacht werden, da nicht bei jeder Benutzerevaluation erneut eine konkrete Zuordnung gefunden werden muss.

³ Die entsprechenden Symbole für die zeitlichen Relationen nach Allen können in Abbildung 4.9 nachgelesen werden.

⁴ Bei aktivierter Sprachausgabe erfolgt zusätzlich auch eine auditive Ausgabe.

⁵ An dieser Stelle wird zur Formalisierung die interne Repräsentation der Bereichspositionen verwendet, wie sie im taktilen Fenstersystem implementiert ist.

⁶ Auf die Beschreibung einzelner Objekteigenschaften sowie sonstiger Aspekte der Aufbereitung wird an dieser Stelle aus Gründen der Einfachheit verzichtet.

⁷ Bei den untersuchten Funktionalitäten handelt es sich um die implementierten sowie die noch nicht umgesetzten, aber zukünftig vorgesehenen Funktionen der beiden Systeme.

Tabelle 4.1: Zuordnung der Stiftplattenbedienung zu den Elementaraufgaben (Ausschnitt)

Kategorie	Elementaraufgabe		HyperReader/Tangram Funktionalität	
	betroffenes Objekt	Eigenschaft	Interaktionsobjekt	Funktion
Manipulieren	Bezugssystem	Zoomen	Darstellungsbereich	5fach Zoom-in/out
				Zoom auf 1:1-Darstellung
				Höhe einpassen
			Bereiche	Druckzoom
				ein-/ausblenden
				verkleinern/vergrößern
		Darstellungsbereich	Neuausrichtung	Vollbildmodus
				alle einblenden
				vertikale Teilung
		Braillefenster	horizontale Teilung	
			Teilung aufheben	
			aktiv setzen	
			minimieren, maximieren, wiederherstellen, schließen	
Ansicht	neu rendern			
Hilfsraster	ein/aus			

4.4 Diskussion

Anhand der Beispiele konnte gezeigt werden, dass sich die Taxonomie zur formalen Beschreibung von verschiedenartigen Interaktionen auf der Stiftplatte eignet. Aufgrund der Komplexität taktiler Benutzungsoberflächen ist es jedoch kaum möglich, alle Anwendungsfälle für verschiedenartige Geräte und Interaktionsformen umfänglich zu berücksichtigen. Im Folgenden werden deshalb Möglichkeiten und Grenzen der erarbeiteten Taxonomie diskutiert.

Die Dimension „Gerät“ kann innerhalb der Taxonomie separat betrachtet werden, da sich diese normalerweise im Verlauf der Interaktion nicht ändert. Für das BrailleDis 7200 und demzufolge auch für das BrailleDis 9000 konnte die Anwendbarkeit bereits gezeigt werden. Für eine detailliertere Beschreibung eines Geräts kann die Taxonomie weiter verfeinert oder ergänzt werden. Finden spezielle Aspekte auf ein Gerät keine Anwendung oder sind Aspekte nicht näher spezifiziert, so können diese bei der Beschreibung beispielsweise mit „nicht zutreffend“ bzw. „nicht bekannt“ markiert werden. Auf diese Weise lassen sich auch Displays ohne Toucheingabe oder zusätzliche Tasten modellieren. Insbesondere der Ast „externes Zubehör“ stellt zudem die Möglichkeit bereit, auf andere Eingabegeräte zu verweisen (z. B. den Ultraschallstift beim Mimizu-System [KW04] oder die Blindenmaus beim DMD 12060 [Web89a]). Eine weitere Verzweigung schließt die Taxonomie nicht aus, sodass auch diese Geräte näher spezifiziert werden könnten. Zukünftige Neuentwicklungen, zum Beispiel bezüglich der Aktuatorprinzipien oder der Stimuli-Arten, können der Taxonomie ebenfalls problemlos hinzugefügt werden.

Schnelle dynamische Änderungen sind für große Flächendisplays im Normalfall eher ungeeignet, da die vollständige Informationsaufnahme durch blinde Benutzer nur durch eine manuelle Steuerbarkeit gewährleistet werden kann. Ausnahmen sind hierbei lediglich das Blinken einzelner Stifte zum Zwecke der Aufmerksamkeitssteuerung (z. B. Fokusblinken) oder das kurzzeitige Anzeigen von Statusmeldungen im Detailbereich (Quickinfos, vgl. Abschnitt 3.2.1.1). In der Taxonomie ist die Beschreibung der Ausgabe entsprechend als Momentaufnahme vorgesehen. Um insbesondere die oben genannten Ausnahmen zu adressieren, können dynamische Ausgaben zumindest rudimentär mit Hilfe der Eigenschaft „zeitlicher Verlauf“ angegeben werden. Für die Modellierung der Interaktion auf deutlich langsameren Flächendisplays, die für das Setzen der taktilen Stimuli bis zu mehreren Minuten benötigen, ist die Taxonomie dementsprechend genauso geeignet wie für die BrailleDis-Geräte. Multimodalität ist bei sehr langsamen Displays allerdings besonders wichtig, d. h. statt der taktilen Ausgabe von Informationen im Detailbereich kann die auditive Ausgabe dazu verwendet werden, dem Benutzer unmittelbare Rückmeldungen zu liefern. Die „Informationspräsentation“ für die auditive Modalität kann dabei analog zu der in der Taxonomie vorgeschlagenen Art und Weise modelliert werden. Beispielsweise kann der Inhalt einer Audioausgabe im Ast „Bereiche“ angegeben werden, wobei unter einem auditiven Bereich die jeweilige Tonspur zu verstehen ist. Die Dauer lässt sich durch den „zeitlichen Verlauf“ als „kurze Einblendung“ modellieren.

Betrachtet man jeden Interaktionsschritt einzeln, so ergeben sich besonders in Hinblick auf die Beschreibung der Ausgabe sehr viele Redundanzen, da die Ausgabe vor, während und nach der Benutzerhandlung jeweils verschieden sein kann. Eine Möglichkeit wäre es, die einzelnen Aspekte der Interaktion, d. h. Intention, Handbewegung, Eingabe und Ausgabe, jeweils separat zu betrachten und nur bei Änderungen zu adressieren anstatt sie innerhalb eines Interaktionsschritts zu bündeln. Auf der anderen Seite erschwert dies bei der Formalisierung die Zuordnung einzelner elementarer Interaktionen.

In diesem Zusammenhang zeigt sich ein weiteres Problem, da der zeitliche Bezug der Ausgabe zur Eingabe bzw. zur Handbewegung nicht abgedeckt ist. Ein denkbarer Ansatz für eine zukünftige Beschreibungssprache wäre die Einbeziehung von Zeitstempeln für Ein- und Ausgabe. Dies würde zudem auch die Ermittlung der Dauer und somit eine Effizienzbewertung, zum Beispiel anhand der Homingzeiten oder Ähnlichem, ermöglichen. Der Weg ist hingegen durch die Kodierung der Handpositionen innerhalb des Bewegungsablaufs bereits mit den jetzigen Daten bewertbar. Komplexe Bewegungen der Hände, wie ein Neigen oder Drehen, sind mittels der Eigenschaft „Trajektorie“ allerdings nicht abbildbar.

Speziell zur Bewertung der Interaktionsergonomie sind neben der Handposition, welche grundlegend durch die Angaben zum Bewegungsablauf ableitbar ist, auch Daten zur Komplexität der Eingabe sowie zur allgemeinen Beanspruchung des Benutzers nötig, welche im Rahmen der Taxonomie nicht berücksichtigt werden. Die subjektive Beanspruchung kann dabei durch die Nutzung des TLX-Verfahrens (vgl. Abschnitt 5.2) erhoben werden. Die Bewertung der Komplexität ist im Allgemeinen ebenfalls abhängig von subjektiven Faktoren, wie den körperlichen Bedingungen sowie der Leistungsfähigkeit des Benutzers. Aus diesem Grund ist auch hier eine objektive Beurteilung, die beispielsweise lediglich auf der Anzahl der zu betätigenden Tasten beruht, schwer möglich und bedarf deshalb dem Fachwissen von entsprechenden Ergonomie-Experten.

Um ein Evaluationsszenario im Kontext der taktilen Interaktion zu beschreiben, sind noch weitere Daten notwendig, die im Rahmen der Taxonomie nicht abgedeckt sind (u. a. Datum/Ort, Name des Testleiters, Methode, untersuchte Variablen usw.). Auch mögliche Kriterien zur Bewertung der Interaktion, die beispielsweise die Fähigkeiten der Probanden mit einbeziehen, wurden nicht mit betrachtet. Die Taxonomie kann jedoch zumindest dabei helfen, die eigentliche Interaktion sowie deren Auswertung zu formalisieren. Zudem kann sie als Checkliste dienen, um die Planung der Datenerhebung in Bezug auf spätere qualitative und quantitative Auswertungen zu unterstützen.

4.5 Zusammenfassung

Zur Systematisierung der taktilen Interaktion wurde in diesem Kapitel eine Taxonomie entwickelt. Inspiriert von vorhandenen Klassifizierungen zur haptischen Interaktion sowie zu Eingabetechniken wurde zunächst ein Ansatz zur Einordnung haptischer Benutzungsoberflächen erarbeitet. Dieser basiert auf zwei Dimensionen – der Wahrnehmungskomponente sowie der Aktivität des Benutzers. Dabei wurde deutlich, dass die Interaktion auf taktilen Displays sehr verschiedenartige Ausprägungen aufweisen kann, insbesondere wenn sowohl die Ein- als auch die Ausgabe betrachtet wird.

Um typische Benutzerhandlungen während der taktilen Interaktion zu beschreiben, wurde zunächst eine Anpassung der Elementaraufgaben nach ISO 9241-910 vorgenommen. Zudem ist die Betrachtung der Handbewegungen beim Lesen und Tätigen von Eingaben ein wichtiger Aspekt. Dabei spielen neben der Bewegungsrichtung auch zeitliche Relationen eine Rolle. Für eine ganzheitliche Betrachtung der taktilen Interaktion ist es notwendig, neben den Handlungen und Intentionen des Benutzers auch das Gerät sowie den Kontext der Interaktion mit einzubeziehen. Der Kontext für die vorliegende Arbeit ist bereits festgelegt („stationärer Desktop-Arbeitsplatz für blinde Benutzer“) und wurde dementsprechend nicht weiter betrachtet.

Die in diesem Kapitel erarbeitete Taxonomie besteht letztendlich aus den folgenden drei Dimensionen: 1) Gerät, 2) Intention des Benutzers und 3) Interaktionsart. Die Eigenschaften des Geräts sind insofern wichtig, als dass sie Ein- und Ausgabemöglichkeiten der Interaktion definieren und begrenzen. Die Intention wiederum repräsentiert die bewussten Aktionen des Benutzers und stellt diese den unbewussten Handlungen, welche unter Umständen zu fehlerhaften Eingaben führen können, entgegen. Zudem kann die Intention zur Erkennung und Beschreibung von Fehlern (z. B. bei der Benutzerinteraktion oder der Interpretation durch das System) genutzt werden. Die Interaktion selber wurde unterteilt in die Handbewegungen des Benutzers, die Ein- und die Ausgabe. Die Handbewegungen und deren Interpretation durch das System stellen dabei den Kernpunkt der taktilen Interaktion dar, da sie einerseits abhängig von der Intention des Benutzers sind, andererseits direkten Einfluss auf die Ein- und Ausgabe ausüben.

Abhängig vom Blickwinkel stehen die Dimensionen der taktilen Interaktion in unterschiedlichen Beziehungen zueinander. Aufgrund der losen Kopplung der einzelnen Aspekte kann die Taxonomie somit für verschiedene Sichtweisen (Beobachter, Benutzer, System) verwendet werden und so unter anderem als Grundlage zur Auswertung von Benutzerstudien oder zur Entwicklung von Anwendungskomponenten dienen. An konkreten Beispielen konnte zudem gezeigt werden, dass die erarbeitete Taxonomie für die Interaktion auf dem taktilen Flächendisplay BrailleDis 7200 erfolgreich anwendbar ist.

Grundlagen zur Evaluierung der taktilen Interaktion

Um im Kontext der taktilen Interaktion die Eignung konkreter Geräte und Anwendungen zu beurteilen, müssen diese anhand adäquater Kriterien evaluiert werden. An dieser Stelle werden deshalb einige Grundlagen und Besonderheiten zur Durchführung der Evaluation von Benutzungsoberflächen mit blinden Menschen vorgestellt. Neben geeigneten Evaluationsmethoden wird auch ein Überblick über mögliche Bewertungskriterien und Auswertungsmethoden für die taktilen Interaktion gegeben. Ziel dieses Kapitels ist es dabei jedoch nicht, einen umfassenden Überblick über das weite Gebiet der Evaluation von interaktiven Systemen zu geben. Stattdessen wird insbesondere auf die in dieser Arbeit angewendeten Methoden eingegangen, um eine Grundlage für die durchgeführten Benutzerstudien zu schaffen.

5.1 Evaluationsmethoden

In einer auf Leistung basierenden Gesellschaft ist die Entwicklung gebrauchstauglicher Anwendungen zunehmend wichtig, um Benutzer beim Erledigen ihrer Aufgaben bestmöglich zu unterstützen. Um Aspekte der Gebrauchstauglichkeit zu messen und Probleme zu identifizieren, werden bereits seit vielen Jahren verschiedene Methoden der Usability Evaluation angewendet. Ein umfangreicher Überblick dazu findet sich beispielsweise bei Sarodnick und Brau [SB06].

Zur Bewertung von Benutzungsoberflächen existieren grundlegend zwei Ansätze: 1) die Beurteilung durch Experten und 2) die Einbeziehung von Benutzern. Expertenbasierte Methoden beziehen dabei meist konkrete Richtlinien bzw. Checklisten zur Beurteilung ein (*heuristische Evaluation* [NM90]) oder beruhen darauf, dass sich Experten in die Rolle eines hypothetischen Anwenders sowie dessen Handlungsweisen hineinversetzen (*Cognitive Walkthrough* [PLRW92]). Im Zuge der menschenzentrierten Gestaltung (*User Centered Design* [ND86, ISO10]) erlangte zunehmend die Einbeziehung potentieller Benutzer an Bedeutung. Neben klassischen *Usability-Studien* im Labor [DR99, RC08, SS09], bei denen repräsentative Benutzer konkrete Aufgaben mit Hilfe der zu untersuchenden Anwendung lösen, gibt es zahlreiche weitere benutzerzentrierte Methoden (u. a. Feld- [CKI88, LSS05] bzw. Fallstudien [RH09] und Fokusgruppen [Nie97, KLB04]). Ziel der verschiedenen Methoden ist dabei entweder das Analysieren von Anforderungen oder

das Identifizieren von vorhandenen Nutzungsproblemen sowie das Erheben entsprechender Lösungsvorschläge.

Setzt sich die Zielgruppe für ein Produkt aus Personen mit besonderen Anforderungen zusammen, so können bei der Studienplanung und -durchführung allerdings auch spezielle Herausforderungen auftreten. Warren [War78] fasst sehr schön die Problematik der methodischen Schwierigkeiten bei *Untersuchungen mit blinden Menschen* zusammen. Diese liegen vor allem darin, dass man die Probanden normalerweise nicht aus einer großen Gruppe potenzieller Anwender auswählen kann (vgl. auch [SH11]). Da die Population blinder Menschen zudem sehr heterogen ist, beispielsweise in Bezug auf die Krankheitsursachen, den Grad der Sehbeeinträchtigung oder das Alter bei Eintreten der Erblindung, können die Probanden kaum repräsentativ für die Gesamtpopulation sein. Eine Generalisierung der Resultate einer Studie ist somit kaum möglich.

Nichtsdestotrotz ist gerade bei einer solch speziellen Benutzergruppe die Einbeziehung betroffener Personen sehr wichtig [SH11]. Sears und Hanson diskutieren diesbezüglich die Eignung nicht-repräsentativer Benutzer als Ersatz bzw. Ergänzung zu repräsentativen Anwendern. Selbst in Szenarien, bei denen die Besonderheiten der Zielgruppe nicht relevant oder bei anderen Benutzern simulierbar sind, könnten falsche Rückschlüsse aus den Ergebnissen gezogen werden. Mit Ausnahme von Vorstudien sollten demzufolge immer Benutzer der Zielgruppe einbezogen werden, um effektive Forschungsergebnisse zu erzielen.

Da die Benutzergruppen dann meist sehr klein und in sich heterogen sind, lassen sich im Bereich der Accessibility-Forschung, also der Forschung zur Barrierefreiheit bzw. Zugänglichkeit, traditionelle statistische Methoden allerdings schwer anwenden [SH11]. Neben Einzelfallanalysen (*Case Studies* [ST07]), welche ein tiefgründiges Verständnis zur Technologienutzung und dabei auftretenden Fehlern ermöglichen, sind deshalb auch entfernte Studien (*Remote Evaluations* [PHKPO6]) beliebt, da diese den Zugang zu mehr potentiellen Benutzern ermöglichen. Allerdings müssen dabei andersartige Schwierigkeiten bedacht werden, wie beispielsweise mangelnde Beobachtungsmöglichkeiten für den Testleiter sowie der hohe Aufwand für die Probanden selber, um den Test vor- und nachzubereiten [Mia14].

Um auch mit einer kleinen Anzahl an Probanden ausreichend viele Messwerte zu erhalten, ist beim Konzipieren der Studie die Nutzung eines *within-group designs* hilfreich. Dabei werden jedem Teilnehmer mehrere Testbedingungen zugewiesen. Auf diese Weise können zwar Ermüdungs- und Lerneffekte auftreten, allerdings wird durch den direkten Vergleich mehrerer Bedingungen an einer Person der Einfluss individueller Unterschiede isoliert [LFH10]. Im Gegensatz dazu wird beim *between-group design* jedem Teilnehmer nur eine Testbedingung zugewiesen. Aufgrund der hohen Anzahl an notwendigen Probanden und dem großen Einfluss individueller Unterschiede scheint dieses Testdesign allerdings gerade für Accessibility-Studien weniger geeignet. Ein effektiverer Ansatz, um die oben angesprochenen Ermüdungs- und Lerneffekte beim *within-group design* zu kontrollieren ist es, die Reihenfolge der Testbedingungen zu randomisieren.

Im Folgenden werden einige Methoden zur Evaluierung von Benutzungsoberflächen und deren Besonderheiten bei Tests mit blinden Benutzern vorgestellt. Die Anwendbarkeit üblicher Methoden bei Menschen mit besonderen Anforderungen wurde unter anderem von Petrie [PGD15] sowie, speziell für blinde Menschen, von Miao [Mia14] untersucht.

5.1.1 Prototyping Methoden

Um bereits in frühen Phasen der Entwicklung einer Anwendung Benutzer einbeziehen zu können und somit frühzeitig Rückmeldungen und Verbesserungsvorschläge zu erhalten, gibt es verschiedene Prototyping Methoden. Dabei kann je nach Ähnlichkeit zum Endprodukt zwischen *Low-fidelity* (niedrige Ähnlichkeit) und *High-fidelity Prototypen* unterschieden werden. *Low-fidelity* Prototypen adressieren dabei vor allem Aspekte der Darstellung, wie Layout und Terminologie. *High-fidelity* Prototypen widmen sich hingegen mehr dem Informationsfluss

sowie der Navigation. Eine ausführliche Diskussion der jeweiligen Vor- und Nachteile findet sich bei Rudd et al. [RSI96].

Eine Art des Low-fidelity Prototyping stellt das *Paper Prototyping* (siehe auch [Ret94, Sny03]) dar. Dabei werden verschiedene Zustände einer Benutzungsoberfläche, d. h. Fenster, Menüs, Dialogboxen usw., auf Papier gebracht und dem Benutzer zur Bewertung vorgelegt. Bei den Papierprototypen kann es sich um händisch skizzierte, digital gezeichnete oder auch reale Screenshots handeln. Für Untersuchungen mit blinden Menschen können als angepasste Variante taktile Papierprototypen genutzt werden. Diese lassen sich ähnlich herstellen wie taktile Grafiken, also beispielsweise mit Brailledruckern. Auf diese Weise wurden im HyperBraille Projekt erste Entwürfe zu möglichen taktilen Präsentationsformen auf der Stiftplatte evaluiert (siehe [MKS09]).

Miao [Mia14] hat die Eignung taktiler Papierprototypen auch bei weiteren Tests mit blinden Benutzern untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass diese besonders gut zur Vermittlung konzeptueller Modelle einsetzbar sind, d. h. zum Verstehen der Menüstruktur, Navigation und Funktionen einer Anwendung, da sie einen guten Überblick über die Oberfläche ermöglichen. Um die Intuitivität einer Software bei der realen Interaktion zu bewerten, sind allerdings *computerbasierte Prototypen* sinnvoller. Ein kombinierter Einsatz beider Methoden eignet sich für die Einbeziehung blinder Probanden somit am besten, um möglichst viele Usability-Probleme zu identifizieren.

Ein Beispiel des High-fidelity Prototyping ist das *Wizard-of-Oz-Experiment* [DJA93, BDD94]. Dabei interagiert der Benutzer mit einer für ihn anscheinend lauffähigen Version der Anwendung. In Wirklichkeit werden die Rückmeldungen jedoch nicht automatisch durch das System erzeugt, sondern durch einen Menschen, den so genannten Wizard, simuliert. Der Vorteil dieser Methode ist es, dass die Interaktionsmöglichkeiten eines zukünftigen Systems bereits vor dessen Implementierung mit Anwendern getestet werden können. Dabei ist der Mensch im Erzeugen von Ausgaben zwar flexibler, allerdings unter Umständen auch langsamer. Wichtig für eine realistische Gestaltung des Experiments ist deshalb, die Aktionen des Wizards konsistent und zeitlich ähnlich der Ausgabedauer eines Computers umzusetzen. Aus diesem Grund werden zur Unterstützung oft Assistenzprogramme benutzt [DJA93].

Obwohl Wizard-of-Oz-Experimente häufig zur Evaluierung von Systemen, deren Interaktion auf natürlicher Sprache basieren (z. B. [Kel84]), verwendet werden, eignen sie sich auch für Untersuchungen anderer Modalitäten. Beispielsweise wurden im Rahmen des HyperBraille Projekts bereits vor der Implementierung des taktilen Fenstersystems die Interaktionsmöglichkeiten auf der Stiftplatte mit blinden Benutzern getestet und diskutiert [Pre09]. Auf diese Weise konnten die Benutzer von Beginn an stärker in den Entwicklungsprozess einbezogen werden. Trotz der manuellen Aktivierung von statischen Ausgabebildern waren ausreichend realistische Testbedingungen bzgl. der Aktualisierungszeiten auf der Stiftplatte möglich. Allerdings erlaubte die Wizard-of-Oz Methode in diesem Fall lediglich die Simulation fest definierter Interaktionspfade, da für jede mögliche Ausgabe im Vorfeld die entsprechenden Bilder erstellt werden mussten. Ein freies Erkunden durch den Benutzer sowie die Betrachtung komplexer Interaktionen war demzufolge nicht realisierbar.

5.1.2 Methoden zur Datenerhebung

Zur Realisierung einer Evaluation ist neben der eigentlichen Durchführungsmethode sowie der Art der bereitgestellten Testmaterialien auch die Form der Datenerhebung relevant. Neben den zu überprüfenden Kriterien, welche im nächsten Abschnitt betrachtet werden, spielt hierfür vor allem auch eine Rolle, wie die notwendigen Informationen vom Benutzer und dessen Interaktionen extrahiert werden können.

Bei der so genannten *Thinking Aloud* Methode (Lautes Denken) verbalisiert der Benutzer seine Beweggründe, Entscheidungen und Gedanken während er eine Problemlöseaufgabe bearbeitet [FKG93]. Die Anwendung dieser Methode kann bei Studien mit blinden Probanden

allerdings zu Problemen führen, insbesondere dann, wenn sie zur Lösung der gestellten Aufgabe auf ihre Sprachausgabe angewiesen sind [CSFB06]. In diesem Fall müssen sie ihre auditive Aufmerksamkeit teilen, um einerseits ihrem Screenreader zuzuhören und andererseits ihre Gedanken laut auszusprechen. Für blinde Menschen scheinen demzufolge andere Ansätze geeigneter zu sein.

Beim *Retrospective Thinking Aloud* werden die Gedanken beispielsweise erst nach der Aufgabebearbeitung geäußert, was sich als effektiver bei blinden Probanden herausgestellt hat [SPP15]. Da hierbei allerdings die Zeitspanne zwischen der Aufgabenerledigung und der Formulierung der dabei gemachten Gedanken relativ groß sein kann, werden beim *Partial Concurrent Thinking Aloud* [SBS10] beide Ansätze miteinander kombiniert. Während des Tests werden lediglich Probleme angesprochen, nachdem die eigentliche Interaktion unterbrochen wurde. Im Anschluss können diese als Gedankenanstöße dienen, um die Probleme noch einmal retrospektiv zu diskutieren.

Zur Modellierung des Benutzers und seiner Gedankenwelt werden häufig *mentale Modelle* verwendet. Unter einem mentalen Modell versteht man die kognitive Repräsentation realer oder theoretischer Situationen, Vorgänge oder Gegenstände [JLGL98]. Mentale Modelle sind einerseits sehr subjektiv und individuell, andererseits meist auch unvollständig und instabil [Nor83]. Für das Erlernen einer Anwendung oder eines Geräts ist die Entwicklung eines geeigneten mentalen Modells beim Benutzer wichtig, um insbesondere komplexe Zusammenhänge besser zu verstehen [FAA⁺88, FOO93].

Zur Erhebung mentaler Modelle werden neben Thinking Aloud Methoden unter anderem auch Interaktionsprotokolle sowie Zeit- und Fehlermessungen verwendet [Sas91]. Miao hat konkrete Methoden auf deren Eignung bei blinden Benutzern untersucht [Mia14]. Dabei hat sich gezeigt, dass sich das mentale Modell der Probanden weder mit retrospektivem Thinking Aloud, noch mit einer Methode, bei dem der Benutzer einer anderen Person sein Wissen vermitteln soll (Teaching-Back [Sas91]), vollständig übermitteln konnte. Generell haben derartige Methoden den Nachteil, dass die Ergebnisse stark vom Gedächtnis sowie den Fähigkeiten des Benutzers beim verbalen Wiedergeben des eigenen mentalen Modells abhängen. Im Bereich von Kartenanwendungen hat Miao deshalb die *Rekonstruktion mit Magnetstreifen* als Erhebungsmethode überprüft. Um eine reproduzierte mit der originalen Karte zu vergleichen, wurden bestimmte Bewertungskriterien aufgestellt und gewichtet (vgl. auch [MW12]). Anhand dieser Quantifizierung konnte eine Aussage über die Abweichung zum Original getroffen werden. Insbesondere bei taktil vermittelten Informationen konnte die Methode der Magnetstreifen-Rekonstruktion deutlich genauere Ergebnisse liefern als eine verbale Beschreibung.

Neben den mentalen Modellen gibt es weitere Variablen, welche Einfluss auf die Interaktion haben und somit im Rahmen von Benutzerstudien erhoben werden können. Für die taktil Interaktion spielen beispielsweise die *Handbewegungen* des Benutzers eine große Rolle, um Lese- oder Erkundungsstrategien zu identifizieren (vgl. Abschnitt 2.2.3). Diese werden üblicherweise mit Hilfe von Videokameras, die von oben die Hände der Probanden aufnehmen, erfasst. Berührungsempfindliche Geräte erlauben darüber hinaus auch die direkte Erfassung der Bewegungen. Beide Methoden haben den Nachteil, dass berührungslose Interaktionen entweder nicht eindeutig identifiziert oder nicht ausreichend nachvollzogen werden können. Zudem werden die erkundeten Inhalte bei der herkömmlichen Videoaufnahme von oben verdeckt, sodass keine ausreichend akkurate Bestimmung der aktuellen Lese- oder Erkundungsposition möglich ist. Millar [Mil88a] hat hierfür eine spezielle Vorrichtung zur Aufnahme von Handbewegungen entwickelt, welche eine sehr feingranulare Analyse aller Finger ermöglicht. Aufgrund der Verwendung von transparentem Punktschriftpapier und der von unten angebrachten Kamera verdecken die Hände dabei nicht den Text.

5.2 Bewertungskriterien

Zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit nach ISO 9241-11 [ISO98] werden die Faktoren Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung herangezogen. Die *Effektivität* beschreibt dabei wie

genau und vollständig der Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen konnte. Als Maß für die Genauigkeit eignet sich beispielsweise die Anzahl der gemachten Fehler bzw. Abweichungen zum gewünschten Ergebnis. Die Vollständigkeit wiederum bestimmt, ob alle Teilziele und -aufgaben erledigt werden konnten. Unter der *Effizienz* versteht man das Verhältnis des erreichten Grads der Effektivität zum Aufwand, den der Benutzer dafür investieren musste. Typische Aspekte zur Bewertung des Aufwands sind dabei neben der benötigten Zeit sowie den (Material-)Kosten auch die psychische oder physische Beanspruchung des Benutzers. Der Grad der *Zufriedenstellung* gibt an, inwieweit der Benutzer positiv eingestellt ist gegenüber der Verwendung eines Produkts und ob die Nutzung frei von Beeinträchtigungen ist. Da dieser Faktor der Gebrauchstauglichkeit äußerst subjektiv ist, wird die Zufriedenstellung üblicherweise mittels individueller Einstufungen auf vorgegebenen Skalen gemessen. Daneben können auch konkrete Beobachtungen während der Nutzung eines Produkts, wie die Anzahl positiver und negativer Äußerungen, zur Bewertung herangezogen werden.

Weitere Kriterien, die nicht nur bei der Entwicklung, sondern auch zur Bewertung von interaktiven Anwendungen herangezogen werden können, sind die *Grundsätze der Dialoggestaltung* nach ISO 9241-110 [ISO06]. Um einen hohen Grad an Gebrauchstauglichkeit zu erreichen sowie grundlegende Nutzungsprobleme zu vermeiden, sollten demzufolge die folgenden Aspekte berücksichtigt werden: Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Erwartungskonformität, Lernförderlichkeit, Steuerbarkeit, Fehlertoleranz und Individualisierbarkeit. Insbesondere auf die Selbstbeschreibungsfähigkeit hat auch die so genannte *Affordanz* (Angebotscharakter, Anforderungscharakter, engl. *affordance*) einen Einfluss. Bedienelemente sollten demnach selber Hinweise auf ihre Bedienweise liefern [Nor88] und somit eine intuitive Bedienung unterstützen.

Um zwei unterschiedliche Systeme geeignet miteinander zu vergleichen, werden teilweise auch *standardisierte Fragebögen* verwendet. Im Bereich der Mensch-Computer Interaktion hat sich beispielsweise die *System Usability Scale* (SUS [Bro96]) etabliert, um subjektiv die Kriterien der Gebrauchstauglichkeit zu evaluieren. Dazu werden dem Benutzer konkrete Aussagen bzgl. des Systems gegeben, zu welchen er anhand einer Likert-Skala den Grad seiner Zustimmung oder Ablehnung bewerten soll.

Auch zur Erhebung konkreter Aspekte der Gebrauchstauglichkeit existieren spezielle Fragebögen. Zur Bewertung der Beanspruchung des Benutzers wurde beispielsweise der *Task Load Index* (NASA-TLX [HS88]) entwickelt. Bei diesem soll der Benutzer die Faktoren geistige, körperliche und zeitliche Anforderung sowie Leistung, Anstrengung und Frustration bewerten (vgl. auch Anhang E). Normalerweise soll er dabei jeweils ein Kreuz auf einer 21-stufigen Skala setzen. Bei blinden Probanden ist dies nicht ohne Weiteres möglich, sodass eine angepasste Art der Bewertung vorgenommen werden muss. Am einfachsten scheint dabei eine verbale Äußerung, beispielsweise basierend auf einer Prozentangabe. Auf die Frage danach, wie hoch er die geistige Anforderung einschätzt, würde er demzufolge kein Kreuz irgendwo zwischen „sehr niedrig“ und „sehr hoch“ setzen, sondern eine Zahl zwischen 0 und 100 % angeben. Ursprünglich musste jeder Proband die einzelnen Faktoren des TLX individuell gewichten. Am Ende wurde daraus ein entsprechender Wert für die allgemeine Beanspruchung errechnet. Eine vereinfachte Variante stellt der Raw TLX dar, da er auf den Gewichtungprozess verzichtet [Har06]. Zudem ist auch die Analyse und Gegenüberstellung der einzelnen Faktoren üblich anstatt einen Gesamtwert zu berechnen.

Nicht-standardisierte Fragebögen erlauben ein individuelleres Erheben von Daten. Um systematische Fehler bei der Auswertung auszuschließen, geben Trewin et al. [TMG15] einige Empfehlungen speziell zur Durchführung von Accessibility-Studien. Demnach ist es bei der Verwendung von Likert-Skalen wichtig, nicht nur auf die Neutralität der Fragestellungen zu achten, sondern auch auf ein ausgeglichenes Skalenniveau. Zudem wird empfohlen, dass der Benutzer die Fragen selbstständig und anonym ausfüllen sollte anstatt sie ihm vorzulesen. Auf diese Weise kann bei der Beantwortung einerseits eine Beeinflussung durch den Testleiter und andererseits ein möglicher sozialer Druck¹ vermieden werden.

¹ Probanden könnten sich beispielsweise scheuen, die Arbeit der Entwickler als zu negativ zu bewerten oder unangenehme Fragen wahrheitsgemäß zu beantworten.

Speziell zur Bewertung der Effizienz von Zeigegegeräten (u. a. Maus, Stift oder Joystick) bei Zielerfassungsaufgaben wird bei grafischen Benutzungsoberflächen häufig *Fitt's Law* [Fit54] angewendet. Es besagt, dass die Zeit zum Erreichen einer Zielfläche sowohl von der Distanz zum Ziel als auch von der Größe des Zielobjekts abhängig ist. Verwendung findet Fitt's Law nicht nur bei der Vorhersage der benötigten Zeit zum Anwählen von GUI-Elementen, sondern auch beim Vergleich verschiedener Zeigegegeräte [SM04]. Normalerweise ist dabei der Sehsinn involviert, welcher ein kontinuierliches Bewusstsein über die aktuelle Zeigeposition sowie die Zielfläche ermöglicht. Taktile und auditive Rückmeldungen können dem Benutzer hingegen nur ungefähre Positionen vermitteln. Dies hat Einfluss auf den Bewegungsablauf beim nicht-visuellen Anvisieren eines Ziels, weshalb es in diesem Fall eher einer trajektorienbasierten Zeigehandlung (vgl. *Steering Law*² [AZ97]) entspricht [FSM98]. Ansonsten wurde Fitt's Law bisher nur bei einfachen horizontalen [CJ15] oder geführten taktilen [Kur98] Interaktionen angewendet, da hierbei gezielte Bewegungen vermittelt werden können. Diese entsprechen somit am ehesten einem geradlinigen und somit kürzesten Weg zwischen Hand und Ziel. Inwieweit Fitt's Law bei der nicht-visuellen Wahrnehmung ohne Führung und in komplexeren Benutzungsoberflächen Anwendung finden kann, scheint bisher noch nicht untersucht worden zu sein. Insbesondere wenn der Benutzer das Ziel nicht kennt, sondern erst suchen muss, ist davon auszugehen, dass es aufgrund der fehlenden Geradlinigkeit der Interaktionsbewegung nicht anwendbar ist.

Einen weiteren messbaren Einfluss auf die Effizienz stellt die so genannte *Homingzeit* dar, d. h. die Zeit, welche für den Wechsel zwischen zwei Geräten erforderlich ist. Erwartungsgemäß wächst die Homingzeit mit dem Abstand zwischen den Geräten [CEB78]. Speziell für die Informationsaufnahme, also insbesondere das Lesen von Inhalten, spielen weitere Zeitmessungen eine Rolle. Diese werden häufig in Form der *Lesegeschwindigkeit* bzw. der Leserate in Wörtern pro Minute angegeben (vgl. auch Abschnitt 2.2.1). Beim Planen einer entsprechenden Untersuchung sollte darauf geachtet werden, dass neben der Leseaufgabe (z. B. lautes Vorlesen, stilles Lesen, Text Studieren, vgl. [WK00]) auch die Wahl des Kürzungsgrades von Braille (z. B. Computerbraille, Vollschrift, Kurzschrift) einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse haben kann.

5.3 Auswertungsmethoden

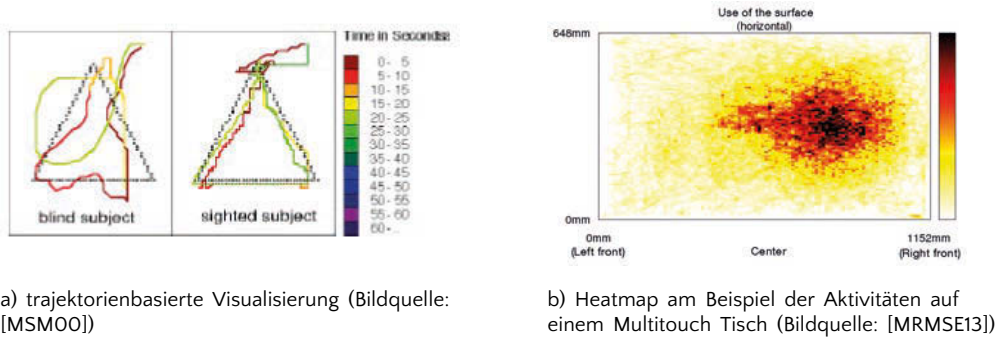
Neben statistischen Tests zur Überprüfung der Signifikanz der Ergebnisse einer Studie (z. B. t-Test oder Varianzanalyse)³ existieren auch weitere Verfahren, welche unter anderem die qualitative Auswertung unterstützen können. Insbesondere die Analyse von Audio- oder Videoaufnahmen erfordert eine möglichst objektive Kodierung der Informationen unter Verwendung von einheitlichen Beobachtungskategorien (vgl. [LFH10]). Kodierung bedeutet in diesem Zusammenhang die Transkription und Annotation von Beobachtungen bzw. auftretenden Events (z. B. Eingabe- und Ausgabeaktionen, Kommentare des Probanden, Hilfestellungen bzw. Eingriffe durch den Testleiter usw.) zu bestimmten Zeitpunkten innerhalb der Aufnahme. Systeminterne Aktionen lassen sich zwar meist automatisch mit Logdateien protokollieren, allerdings sind zur Auswertung von Benutzerstudien häufig auch externe Beobachtungen relevant, welche händisch kodiert werden müssen. Um die manuelle *Ereignisprotokollierung* (event logging) zu unterstützen, gibt es spezialisierte Softwarelösungen, die teilweise auch die Visualisierung sowie weiterführende Analysen der kodierten Daten ermöglichen (z. B. „The Observer“ von Noldus⁴).

Die Qualität der Kodierung ist nicht nur von der Validität der Daten abhängig, sondern auch in hohem Maße von der Reliabilität (Verlässlichkeit, siehe auch [Web90]). Die größte Herausforderung hierbei ist, dass die gleiche Beobachtung immer auf die gleiche Weise kodiert

² Im Gegensatz zu Fitt's Law betrachtet das Steering Law die Zielverfolgung entlang eines bestimmten zweidimensionalen Pfades, wie beispielsweise bei verschachtelten Menüs.

³ Eine ausführliche Betrachtung von statistischen Analysen im Kontext der Mensch-Computer Interaktion findet sich beispielsweise bei Lazar et al. [LFH10].

⁴ Produktseite der Ereignisprotokollierungs-Software „The Observer XT“ von Noldus, URL: <http://www.noldus.com/human-behavior-research/products/the-observer-xt>



a) trajektorienbasierte Visualisierung (Bildquelle: [MSM00])

b) Heatmap am Beispiel der Aktivitäten auf einem Multitouch Tisch (Bildquelle: [MRMSE13])

Abbildung 5.1: Beispiele zur Visualisierung von Handbewegungen und Fingerpositionen

wird. Eine Möglichkeit, dies zu überprüfen, ist es, die Kodierung durch mehrere Personen durchführen zu lassen. Kommen die einzelnen *Gutachter* unabhängig voneinander zum selben Ergebnis, so kann von einer hohen Reliabilität ausgegangen werden [LFH10]. Die Einbeziehung von Experten des jeweiligen Gebiets scheint dabei wichtig für eine verlässliche Messung zu sein, da Laien eher inkonsistente Bewertungen abgeben [KBCS08]⁵. Diese Gutachtermethode wurde darüber hinaus zur Beurteilung der Qualität bzw. Reliabilität von konkreten Bewertungsskalen selber angewendet (z. B. bei Stimmprofilen [WCD⁺04]). Auch zur Bewertung kreativer Produkte, wie beispielsweise Gedichte [KBCS08] und Zeichnungen [CKH⁺02], findet diese Methode Anwendung. In einer durch die Autorin betreuten Arbeit [Sie13] wurde auf diese Weise zusätzlich zur objektiven Bewertung mentaler Karten nach Miao ([MW12], vgl. Abschnitt 5.1.2) die Ähnlichkeit von, durch blinde Menschen, nachgelegten Sternbild-Grafiken bewertet.

Zur *Visualisierung* der gewonnenen Daten einer Evaluation existieren ebenfalls zahlreiche Möglichkeiten (siehe z. B. [SM13a, Tel14]), auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden soll. Speziell zur Auswertung von Bewegungspfaden kann eine Art trajektorienbasierte Visualisierung, wie sie beispielsweise bei [MSM00] und [WSMS16] zu finden ist, hilfreich sein. Durch die Hinzunahme einer Farbkodierung wird dabei gleichzeitig zum Ortsverlauf auch der zeitliche Verlauf deutlich (vgl. Abbildung 5.1a). Die Häufigkeiten von Berührungen an bestimmten Positionen lassen sich wiederum gut mittels *Heatmaps* visualisieren (vgl. Abbildung 5.1b). Diese werden häufig zur Visualisierung von Blickbewegungsdaten verwendet. Beispielsweise können so Leseregionen auf dem Bildschirm analysiert [BBHD10] oder die Lesbarkeit von verschiedenen Graphenlayouts verglichen werden [PSD09]. Auch zur Analyse von Touchscreen Interaktionen ist diese Art der Visualisierung anwendbar [CSS13, MRMSE13].

5.4 Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Kapitel wurde ein kurzer Einblick in die Schwierigkeiten und Besonderheiten beim Durchführen von Untersuchungen mit blinden Benutzern gegeben. Hierbei wurde deutlich, dass gerade bei speziellen Zielgruppen die Einbeziehung zukünftiger Anwender in den Entwicklungsprozess eines Produkts sehr wichtig ist. Um die meist geringe Anzahl an Testpersonen optimal auszunutzen, können jedem Probanden mehrere Testbedingungen in variierender Reihenfolge zugewiesen werden (within-group design). In frühen Phasen können taktile Papierprototypen sowie Wizard-of-Oz-Experimente hilfreich sein, um Präsentationsformen und Interaktionsmöglichkeiten noch vor der Implementierung zu evaluieren und an die Bedürfnisse der Benutzer anzupassen. Im Gegensatz zu auditiven Systemen ist die Anwendung von Thinking Aloud

⁵ Die Studie von Kaufmann und seinen Kollegen bezieht sich auf die Bewertungen der Kreativität von Gedichten durch Experten und Laien. Dabei wurde deutlich, dass Laien andere Maßstäbe ansetzen und somit nicht den Expertenmeinungen entsprechen. Es ist davon auszugehen, dass auch in anderen Wissenschaftsbereichen ähnliche Diskrepanzen in den Bewertungen vorliegen würden.

Methoden bei taktilen Benutzungsoberflächen meist ohne größere Probleme möglich, um die Gedanken der Probanden während der Interaktion zu verfolgen.

Übliche Kriterien zur Gebrauchstauglichkeit von interaktiven Systemen können verwendet werden, um insbesondere die Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung taktiler Interaktionsformen zu bewerten. Dabei spielen häufig Zeitmessungen oder Fehleranalysen eine Rolle. Inwieweit mathematische Modelle, wie Fitt's Law, zur Beschreibung von Interaktionen auf der Stiftplatte geeignet sind, ist an dieser Stelle allerdings unklar.

Zum direkten Vergleich vorhandener Systeme im Rahmen einer summativen Evaluation, d. h. der abschließenden Beurteilung eines Produkts, scheint die Verwendung standardisierter Fragebögen ein geeigneter Ansatz zu sein. Zur formativen Evaluation, bei der eine Anwendung iterativ bewertet und entsprechend verbessert wird, eignen sich diese weniger. Hierfür sind stattdessen individuelle Fragebögen, welche auf konkrete Fragestellungen der Entwickler abzielen, zielführender, um geeignetes Feedback von den Probanden zu erhalten. Obwohl das eigenständige Ausfüllen des Fragebogens durch den Benutzer Vorteile in Bezug auf eine mögliche externe Beeinflussung bietet, bedeutet dies bei der Arbeit mit blinden Menschen auch einen erheblichen zeitlichen Mehraufwand für die Probanden. Zudem sind auf diese Weise kaum Rückfragen des Testleiters möglich, um konkrete Aspekte genauer zu diskutieren, was allerdings insbesondere für formative Evaluierungen wichtig ist.

Neben der Datenerfassung durch Fragebögen spielen bei der Auswertung von Benutzerstudien auch Logdatei- und Videoanalysen eine wichtige Rolle. Konkrete Beobachtungen sollten dabei unter Verwendung einheitlicher Kriterien sowie, bei Bedarf, durch mehrere Experten kodiert werden, um die Validität und Reliabilität der Daten zu gewährleisten. Signifikanztests sind bei Untersuchungen mit einer kleinen Probandenanzahl, wie es bei der Zielgruppe blinder Menschen üblich ist, zwar statistisch wenig aussagekräftig, können aber trotzdem Tendenzen aufzeigen und wichtige Hinweise beim Vergleich verschiedener Ansätze liefern. Zur Visualisierung der taktilen Interaktion, können beispielsweise Heatmaps oder trajektorienbasierte Methoden verwendet werden, um Handbewegungsmuster zu analysieren.

Ergonomie der Bedienelemente zur Eingabe auf flächigen Brailledisplays

Um eine effiziente Bedienung auf der Stiftplatte zu gewährleisten, ist es nicht nur notwendig, softwareseitige Aspekte zu untersuchen und an die Benutzerbedürfnisse anzupassen. Die Ergonomie der Hardware hat ebenso einen wichtigen Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit eines taktilen Flächendisplays. Dies wird beispielsweise beim Vergleich der verschiedenen Eingabemethoden in Abschnitt 7.4.2 deutlich. Zur Reduzierung der mentalen sowie physischen Belastung muss also nicht nur der Inhalt geeignet aufbereitet, sondern auch die Handhabung des Geräts optimiert werden. Beispielsweise sollten unnötige Handbewegungen zwischen Lese- und Eingabehandlungen, d. h. zwischen Brailleausgabe und der Tastatur, reduziert werden. Hierfür ist es sinnvoll, wenn das Gerät dem Benutzer die Möglichkeit der Gesteneingabe sowie eigene Hardwaretasten zur Verfügung stellt. Auf diese Weise können die wichtigsten Funktionalitäten direkt auf der Stiftplatte ausgelöst werden.

Bereits die ersten Untersuchungen zum taktilen Fenstersystem auf dem BrailleDis 9000 (vgl. Abschnitt 3.3) haben gezeigt, dass die Benutzer beim Lesen auf der Stiftplatte häufig versehentlich Brailleeingabetasten berühren und somit ungewollt Funktionen auslösen. Zudem kam bei einigen Probanden der Wunsch nach weiteren, frei konfigurierbaren Tasten auf. Um die BrailleDis Hardware an diese Anforderungen anzupassen, wurde eine Überarbeitung des Geräts notwendig. In diesem Zusammenhang spielt insbesondere die folgende Fragestellung eine Rolle: „Welche zusätzlichen Bedienelemente können ein ergonomisches und intuitives Arbeiten mit der taktilen Stiftplatte unterstützen?“.

Zur Beantwortung dieser Frage wurden in einem mehrstufigen Verfahren zuerst mögliche Bedienelemente entworfen und in Form von Low-fidelity Prototypen umgesetzt. Deren Eignung zur Realisierung von Zooming- und Panningoperationen wurde anschließend durch blinde Benutzer evaluiert. Basierend darauf wurden die vielversprechendsten Bedienelemente identifiziert und innerhalb eines ersten Gehäusedesigns zusammengefügt. Da auch das Zusammenspiel der Stiftplatte mit einer PC Tastatur für ein effizientes Arbeiten eine große Rolle spielt, wurden im nächsten Schritt mögliche Platzierungen beider Geräte zueinander untersucht. Als Ergebnis wurde ein überarbeitetes Design erstellt, auf welchem letztendlich das bereits beschriebene BrailleDis 7200 basiert. Die Inhalte dieses Kapitels wurden in ähnlicher Weise in [Pre14] veröffentlicht.

6.1 Entwurf zusätzlicher Bedienelemente für das BrailleDis

Zur Inspiration für den Entwurf eines neuen Stiftplattengehäuses wurden zunächst existierende Bedienelemente betrachtet, mit denen blinde Computerbenutzer vertraut sind. In Kapitel 2.3.4 wurden bereits verschiedene Eingabemöglichkeiten bei Standardbraillezeilen vorgestellt (u. a. Navigationsleiste zum Verschieben des aktuellen Ausschnitts sowie TASO Module zur zweidimensionalen Seitenorientierung).

Neben erweiterten Eingabemöglichkeiten auf Braillezeilen bieten auch allgemeine Standardeingabegeräte weitere Inspirationsquellen. So wird die Eingabe von Text auch auf Standardtastaturen um weitere Tasten ergänzt (z. B. Funktionstastenblocks oder Cursorkreuze). In der Welt der sehenden Menschen sind daneben auch Zeigegeräte, wie die Maus oder Touchpads, üblich, um ein effizientes Arbeiten mit GUIs zu ermöglichen. Gerade häufig genutzte Interaktionen, wie das Scrollen, werden durch spezielle Eingabemodalitäten, wie das Mausrad oder die Gestenbedienung, einfacher und intuitiver.

Existierende zweidimensionale taktile Displays, wie das GWP oder das DotView Grafikdisplay (vgl. Abschnitt 2.5.3), verwenden ebenfalls Cursortasten oder Joysticks zur Realisierung von Zoom- und Scrolloperationen. Diese Art von Eingabeelementen scheinen vor allem für die Erkundung von grafischen Oberflächen durchaus intuitiver zu sein als mehr oder weniger komplexe Tastenkombinationen. Für die Neugestaltung des BrailleDis gilt es also, Eingabeelemente zu verwenden, die es erlauben, besonders häufig ausgeführte Funktionen möglichst einfach und intuitiv auszuführen.

Basierend auf den oben genannten existierenden Bedienelementen bei herkömmlichen Brailledisplays oder Standardeingabegeräten wurden die folgenden Prototypen erstellt (siehe Abbildung 6.1):

1. Navigationsleiste vor der taktilen Ausgabefläche
2. TASO Module vor und rechts neben dem Gerät
3. Funktionstasten hinter dem Gerät
4. ein Cursorkreuz zwischen den Brailleingabetasten
5. Mausräder links und rechts neben der Anzeigefläche
6. Touch slider¹ vor und rechts neben der Anzeigefläche
7. Touchpad zur Gesteneingabe rechts neben der Anzeigefläche
8. Fingermaus²

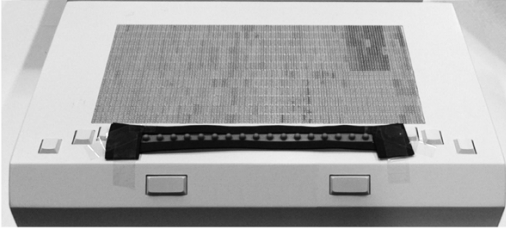
6.2 Evaluation der verschiedenen Bedienelemente

Es ist zwar vorstellbar, einige der Bedienelemente kombiniert zu verwenden, allerdings sind nicht alle Prototypen miteinander vereinbar. Zudem darf das Gerät am Ende nicht überladen sein, um dem blinden Benutzer ein schnelles Identifizieren der einzelnen Elemente zu ermöglichen. Aus diesem Grund musste in einem ersten Schritt eine Auswahl der vielversprechendsten und hilfreichsten Bedienelemente getroffen werden.

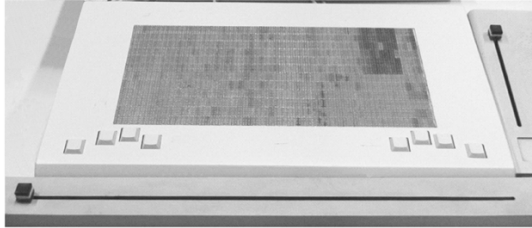
¹ Beispielsweise könnten SoftPot Potentiometersensoren der Firma Spectra Symbol (URL: <http://www.spectrasymbol.com/potentiometer/softpot>) verwendet werden, um ein intuitives Scrollen zu realisieren.

² Anstatt der Daumentasten des BrailleDis 9000 könnte eine Fingermaus dazu verwendet werden, die Gesteneingabe auszulösen.

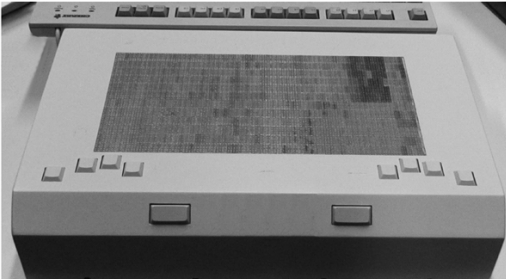
1 Navigationsleiste



2 TASSO Module



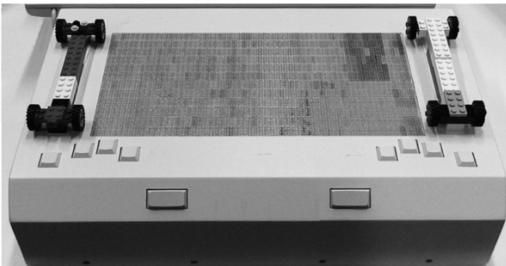
3 Funktionstasten



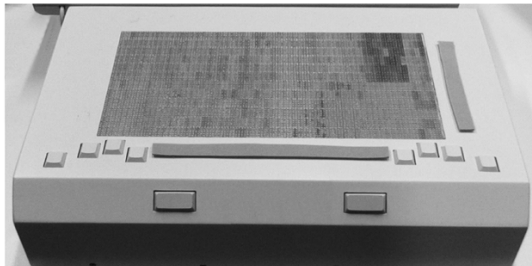
4 Cursorkreuz



5 Mausemäder



6 Touch slider



7 Touchpad



8 Fingermaus

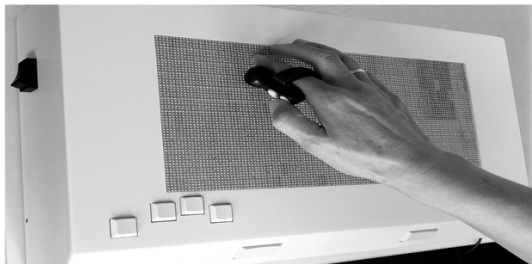


Abbildung 6.1: Stiftplatten Mock-ups zu verschiedenen Bedienelementen

6.2.1 Methodik

Im Folgenden wird eine entsprechende Untersuchung mit Low-fidelity Prototypen zu möglichen Eingabeelementen beschrieben.

6.2.1.1 Probanden

An der Studie nahmen sechs blinde Benutzer im Alter von 24 bis 47 Jahren (Durchschnittsalter: 34, drei Frauen) teil. Alle Probanden waren Braille-Leser, arbeiteten mehrere Stunden täglich am PC und hatten Erfahrung mit der Stiftplatte, da sie an früheren Studien teilgenommen hatten oder im HyperBraille Projekt tätig waren.

6.2.1.2 Material

Die Studie wurde mit den Prototypen aus Abbildung 6.1 durchgeführt. Die Stiftplatte BrailleDis 9000 wurde hierfür mit Nachbildungen der Bedienelemente (teilweise aus Moosgummi, Bausteinen oder Originalbauteilen) ergänzt. Die angebrachte Navigationsleiste ist etwa 21 cm lang. Als TASO Schieber wurden originale Module einer alten Braillezeile der Firma Baum verwendet. Der Funktionstastenblock einer herkömmlichen Tastatur wurde hinter die Stiftplatte gestellt, um mögliche Funktionstasten zu simulieren. Das Cursorkreuz besteht aus vier 2 x 1,7 cm großen Moosgummi-Tasten, welche jeweils im Abstand von ca. 0,5 cm zwischen den Daumentasten der Stiftplatte angebracht sind. Die aus Bausteinen zusammengesetzten Mausemulationen bestehen aus vier 0,7 x 2,5 cm großen Spielzeugrädern und sind insgesamt jeweils 15 x 4,5 cm groß. Zur Simulation von Touch slider Elementen wurden Moosgummi-Streifen in einer Größe von 20,5 x 1,3 cm für die horizontale und 1,4 x 12,5 cm für die vertikale Leiste verwendet. Ein 10,5 x 5 cm großes Moosgummi-Rechteck wurde als Touchpad benutzt. Die verwendete Fingermaus ist etwa 5,5 x 2 x 1,5 cm groß, besitzt zwei Eingabetasten und kann per Klettverschluss am Finger fixiert werden.

6.2.1.3 Aufgaben und Versuchsablauf

Die Studie bestand aus einer kurzen Einführung, einer Wizard-of-Oz Phase sowie einem abschließenden Fragebogen. In der Einführungsphase wurden die allgemeinen Funktionalitäten des HyperReaders vorgestellt, sodass die Teilnehmer diese bei der Bewertung der einzelnen Prototypen beachten konnten. Anschließend wurden nacheinander die erstellten Mock-ups (prototypische Nachbildungen der Bedienelemente) aus Abbildung 6.1 vorgelegt und ihre entsprechenden Bedienprinzipien erläutert. Die Probanden mussten dabei jeweils eine bestimmte Aufgabe mit dem aktuellen Bedienelement durchführen und ihre Gedanken dazu laut äußern (Thinking Aloud Methode).

Für die Mock-ups 1 bis 6 bestand die Aufgabe darin, ein Dialogfenster in Symbolansicht auf der Stiftplatte zu erkunden. Die Erkundung (Ausführung von Panningoperationen) sollte dabei von links nach rechts und von oben nach unten erfolgen. Auf diese Weise sollten die Teilnehmer ein Gefühl für die Verwendung der Bedienelemente bekommen. Mit den Mock-ups 3, 5, 7 und 8 sollten Zoomfunktionalitäten in der Originalansicht simuliert werden. Abhängig von der Benutzereingabe wurde der dargestellte Inhalt auf der Stiftplatte durch den Testleiter manuell erzeugt, indem vordefinierte Ausgaben präsentiert wurden. Das heißt, der Test wurde in Form eines Wizard-of-Oz-Experiments durchgeführt.

Nach jedem Mock-up wurden den Probanden einige Fragen zur Intuitivität und Positionierung des Bedienelements gestellt. Zudem sollte eine konkrete Bewertung auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut) abgegeben werden. Am Ende wurden allgemeine Fragen zu weiteren ergonomischen Aspekten gestellt – beispielsweise in Bezug auf die Brailleingabetasten, eine mögliche Neigung der Stiftplatte sowie zur Position der PC Tastatur. Für Letzteres wurde den Probanden auch ein Konzept vorgestellt, bei dem die Tastatur auf einem Schlitten platziert wird, welcher über der Stiftplatte leicht vor und zurück geschoben werden kann (vgl. Abbildung 6.2).



Abbildung 6.2: Prototyp eines bewegbaren Schlittens über der Stiftplatte, auf dem die PC Tastatur platziert werden kann

6.2.2 Ergebnisse

Die Probanden bewerteten für beide Aufgaben (Zooming und Panning) die vorgestellten Mock-ups zu den verschiedenen Bedienelementen sehr heterogen (vgl. Abbildungen 6.3 und 6.4). Lediglich die Navigationsleiste wurde von allen Benutzern akzeptiert, was an deren Verbreitung bei vielen Standardbraillezeilen liegt. Für Panningoperationen stellt sie somit das intuitivste Bedienelement dar. Vorteil der Navigationsleiste ist zudem, dass sie auch eine zweistufige Eingabe in alle vier Richtungen ermöglicht. Obwohl auch Cursorkreuze intuitiv nutzbar sind, sind sie jedoch nicht ausreichend als alleinige Panningmöglichkeit, da der HyperReader zwei verschiedene Panningstufen (Verschieben vs. Blättern, vgl. Abschnitt 3.2.2) anbietet.

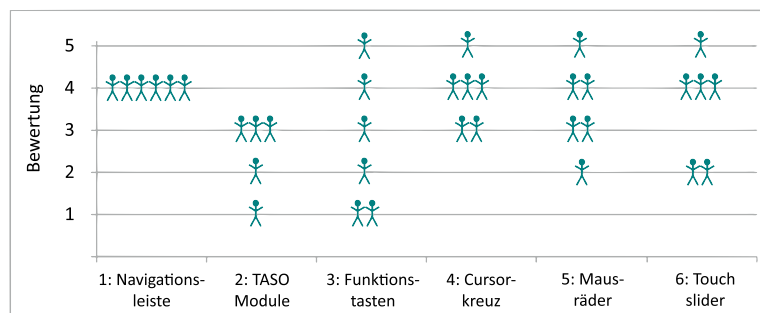


Abbildung 6.3: Bewertung der Bedienelemente zur Realisierung von Panningoperationen durch die sechs Probanden (Skala: 1 = sehr schlecht bis 5 = sehr gut)



Abbildung 6.4: Bewertung der Bedienelemente zur Realisierung von Zoomingoperationen durch die sechs Probanden (Skala: 1 = sehr schlecht bis 5 = sehr gut)

Funktionstasten scheinen zwar weder für Zooming- noch für Panningoperationen intuitiv nutzbar zu sein, allerdings wünschen sich die meisten der Probanden integrierte Funktionstasten zum schnellen Zugriff auf vorgelegte oder frei definierbare Kommandos. Nur drei Benutzer könnten sich eine Orientierung mittels TASSO Modulen vorstellen; den anderen war der Bezug zwischen Schieber und Größe der Inhaltsverschiebung unklar. Vier Teilnehmer empfanden vertikale Mäusräder als nicht intuitiv für Scrolloperationen, vor allem nicht für horizontales Scrollen.

Zur Umsetzung von Zoomoperationen würden die meisten Probanden eine Gesteneingabe mittels Touchpad präferieren. Die Fingermaus hingegen wurde nicht gut bewertet, da sie einerseits stark gewöhnungsbedürftig ist und andererseits die Hälfte der Benutzer beim Lesen gestört hat.

Bezogen auf die allgemeine Ergonomie der Stiftplatte würden fünf der sechs Probanden ein geneigtes Display bevorzugen, da dies als komfortabler beim Arbeiten erscheint. Die Hälfte der Benutzer bewertete den Tastenanschlag sowie den derzeit etwas größeren Abstand der äußeren Tasten des BrailleDis 9000 für die kleinen Finger als gut. Die anderen würden einen konsistenten Abstand zwischen den Tasten sowie einen andersartigen Tastenanschlag bevorzugen.

Bezüglich der Position der PC Tastatur wurde deutlich, dass diese für die Probanden ebenfalls wichtig für eine gute Ergonomie des Stiftplattenarbeitsplatzes ist. Generell präferieren die Teilnehmer eine auf den Benutzer zentrierte Positionierung. Aus diesem Grund könnten sie sich auch durchaus die Verwendung eines Schlittens entsprechend Abbildung 6.2 vorstellen. Weitere Vorschläge waren unter anderem die Möglichkeit einer aus der Gerätefront herausziehbaren Tastatur oder eine Teilung der Tastatur, wobei die beiden Teile links und rechts neben der Stiftplatte platziert werden sollten.

6.2.3 Diskussion

Basierend auf den Ergebnissen der Benutzerstudie können die geeignetsten Bedienelemente bestimmt werden, um damit die Stiftplatte zu erweitern. Die meisten der untersuchten Elemente erlauben eine intuitivere Eingabe als es mit den Brailleingabetasten möglich wäre. Die Tasten zur Eingabe von Braille sowie zusätzliche Funktionstasten sollten dennoch in das neue Design aufgenommen werden, da diese wichtig und von den Benutzern erwünscht sind, um Texte einzugeben bzw. schnell spezielle Funktionen aufzurufen.

Das Ziel der Überarbeitung sollte insbesondere die Vermeidung häufiger Wechsel zur PC Tastatur sein, um ein effizientes Arbeiten zu gewährleisten. Die wichtigsten Funktionalitäten, die im Umgang mit grafischen Oberflächen erforderlich sind, wie beispielsweise Panning, Zooming, Bewegung zum Fokus bzw. Caret sowie die Eingabe von Text, sollten somit direkt auf der Stiftplatte verfügbar sein.

Die Navigationsleiste stellt das intuitivste Werkzeug zur Realisierung von Panningoperationen dar. Da hierfür auch die Cursorkreuze gut bewertet wurden, können diese durchaus als Ergänzung dienen, um weitere Steuerungsoperationen durchzuführen (z. B. Bewegung des Carets oder Sprung an die Ränder eines Dokuments).

Zooming kann gut durch eine Gesteneingabe realisiert werden. Anstatt hierfür ein separates Touchpad zu verwenden, sollte jedoch direkt die integrierte Berührungssensitivität der Stiftplatte genutzt werden. Auf diese Weise bleibt nicht nur mehr Platz für weitere Bedienelemente, sondern es hat auch den Vorteil, dass der Benutzer taktile Referenzpunkte innerhalb der Anzeigefläche nutzen kann. Da die Gestenerkennung der Stiftplatte durch das Halten einer Taste gestartet werden muss, könnte ein einfacher Tastendruck oder das Scrollen eines Mäusrads in Situationen, wo kein Referenzpunkt nötig ist, effizienter sein. Die Berücksichtigung eines zusätzlichen Mäusrads im neuen Design erscheint somit ebenfalls als sinnvoll.

Neben der Integration neuer Bedienelemente sollte die Stiftplatte auch in ihrer Höhe reduziert sowie die Anzeigefläche in einem Winkel zwischen 10 und 15 Grad geneigt werden, um die Ergonomie weiter zu verbessern. Zur Vermeidung versehentlicher Tastendrucke beim

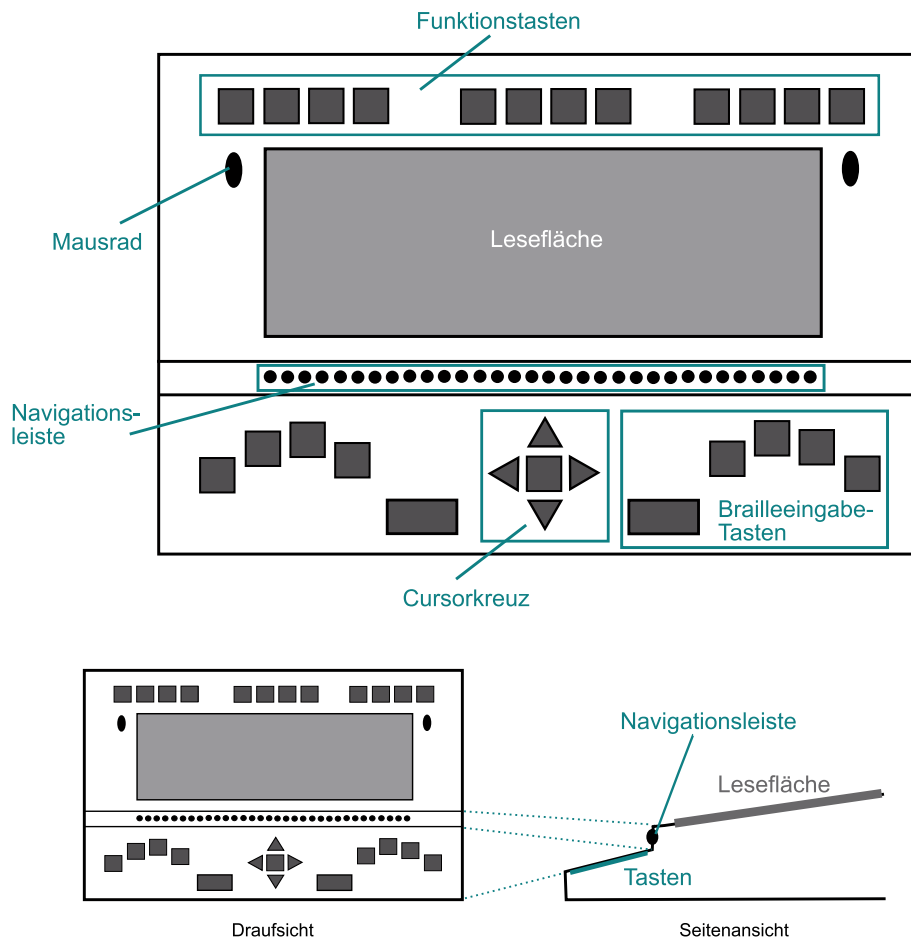


Abbildung 6.5: Design für einen neuen Stiftplattenprototypen basierend auf den Ergebnissen der ersten Benutzerstudie

Lesen sollten zudem die Tasten zur Brailleeingabe abgesenkt werden. Kombiniert man diese Anforderungen und Ideen, so könnte das neue BrailleDis wie in Abbildung 6.5 dargestellt aussehen.

6.3 Evaluation zur Platzierung der Bedienelemente

Prinzipiell sollte der neue Stiftplattenprototyp für das von einer PC Tastatur unabhängige Arbeiten entwickelt werden, um unnötige Wege für die Hände zu vermeiden. Dennoch wird es in einigen Situationen erforderlich sein, eine zusätzliche Tastatur zu verwenden. Beispielsweise sind nicht alle blinden Benutzer geübt im Umgang mit Brailletastaturen oder sie bevorzugen, vor allem für das Schreiben von längeren Texten, normale PC Tastaturen. Aus diesem Grund wurde eine zweite Benutzerstudie mit fünf der sechs vorherigen Teilnehmern durchgeführt.

6.3.1 Methodik

Die folgende Low-fidelity Untersuchung beschäftigt sich mit der Ergonomie des Stiftplattenarbeitsplatzes. Dazu wurde die Platzierung der Tastatur in verschiedenen Situationen evaluiert.

6.3.1.1 Material

Im Gegensatz zur ersten Untersuchung wurde nicht das BrailleDis 9000 Gerät verwendet, sondern papierbasierte Mock-ups des neuen Designs aus Abbildung 6.5. Das heißt, es wurde ein entsprechender Prototyp zusammengebaut, welcher aus den vorgeschlagenen Bedienelementen (Navigationsleiste, Mausemulator und Funktionstasten) sowie einer simulierten Anzeigefläche (taktile Ausdrücke der aktuellen Ausgabe) besteht. Dieses Stiftplattenmodul wurde in vier verschiedenen Szenarien S1 bis S4 wie folgt mit einer PC Tastatur und einer Brailletastatur kombiniert (vgl. Abbildung 6.6):

1. Brailletastatur vor der Stiftplatte (wie in Abbildung 6.5 vorgeschlagen) und PC Tastatur auf einem Schlitten über der Stiftplatte
2. Brailleeingabe integriert in den Funktionstasten, PC Tastatur vor der Stiftplatte
3. Brailletastatur geteilt (links und rechts neben der Stiftplatte), PC Tastatur hinter der Stiftplatte
4. Brailletastatur vor der Stiftplatte wie in Szenario 1, PC Tastatur rechts neben der Stiftplatte in Form eines Eckarbeitsplatzes

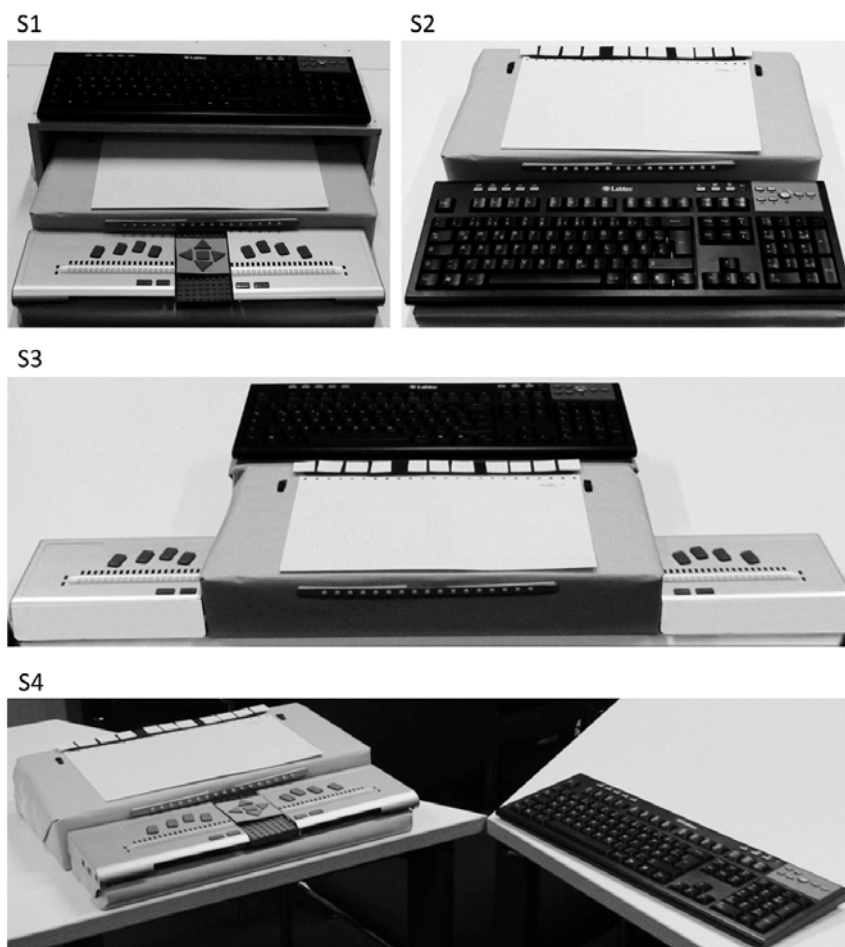


Abbildung 6.6: Vier verschiedene Mock-up Szenarien bestehend aus je einem Modul für Stiftplatte, Brailletastatur und PC Tastatur

6.3.1.2 Aufgaben und Versuchsablauf

Die Aufgabe der Probanden bestand darin, die folgenden drei Arbeitssituationen zu simulieren:

- a. Text überfliegen, Scrollen mittels Tastatureingabe
- b. Text schreiben mittels Tastatureingabe, Geschriebenes im Detailbereich überprüfen
- c. Stiftplatteninhalt in den verschiedenen Ansichtsarten erkunden, Eingaben mittels Brailletastatur und Gesten

Diese drei Aufgaben sollten die Teilnehmer für jedes der oben definierten Mock-up Szenarien durchführen. Die Probanden durften jeweils fünf Minuten die Bedienung ausprobieren und dabei ihre Gedanken insbesondere bzgl. der Ergonomie für die Arme und Hände beim Interagieren und Lesen laut äußern. Die Ausgabe des Stiftplatten Mock-ups wurde durch Auflegen verschiedener taktiler Ausdrücke durch den Testleiter simuliert (vergleichbar mit dem Wizard-of-Oz-Experiment der ersten Studie). Am Ende sollten die Teilnehmer die verschiedenen Positionen von PC Tastatur und Brailletastatur bzgl. Erreichbarkeit, Ergonomie und Bedienkomfort bewerten sowie ein paar Fragen zu konkreten Verwendungsmöglichkeiten der beiden Tastaturen beantworten (vgl. Tabelle 6.1).

6.3.2 Ergebnisse

Abbildung 6.7 zeigt, wie die verschiedenen Positionierungen der Tastatur von den Probanden bewertet wurden. In Abbildung 6.8 sind die entsprechenden Bewertungen für die Brailletastatur dargestellt. Beide Tastaturen wurden am besten bewertet, wenn sie sich vor der Stiftplatte befinden. Entsprechend schlecht wurde die Platzierung der Tastaturen hinter der Stiftplatte bewertet. Andererseits kritisierten die Teilnehmer auch eine große Distanz zur taktilen Anzeigefläche, wie es bei Szenario S2 der Fall war.

Da bereits vor der Studie klar war, dass Kompromisse in der Platzierung der Tastaturen gemacht werden müssen, sollten die Probanden ein paar weitere Fragen zum Umgang mit Braille- und PC Tastatur beantworten. Die Antworten auf diese Fragen sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Tabelle 6.1: Probandenmeinungen zu verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten von Braille- und PC Tastatur

Frage	Antwort	
	ja	nein
Könnten Sie sich vorstellen, eine Standardtastatur in die Stiftplatte zu integrieren?	2	3
Erachten Sie die Brailletastatur für notwendig?	1	4
Halten Sie eine geteilte Brailletastatur für akzeptabel?	3	2
Wäre für Sie die Belegung der Funktionstasten mit Kommandos zur Brailleingabe eine denkbare Alternative?	4	1

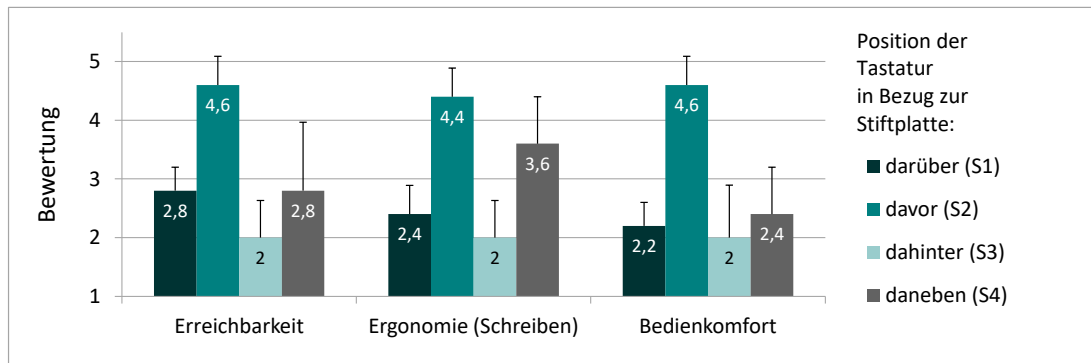


Abbildung 6.7: Bewertungen für die verschiedenen Platzierungen der PC Tastatur (Skala: 1 = sehr schlecht bis 5 = sehr gut; Mittelwerte und Standardabweichungen; $n = 5$)

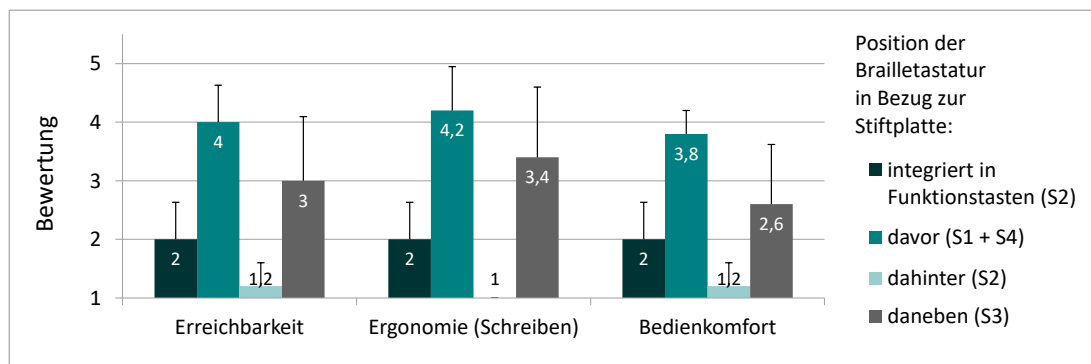


Abbildung 6.8: Bewertungen für die verschiedenen Platzierungen der Brailletastatur (Skala: 1 = sehr schlecht bis 5 = sehr gut; Mittelwerte und Standardabweichungen; $n = 5$)

6.3.3 Diskussion

Aufgrund der guten Erreichbarkeit sowie der kurzen Distanz wurde die Platzierung vor der Stiftplatte für beide Tastaturen am besten bewertet. Beim Schreiben von Text hat dies den Vorteil, dass sich das Eingabemedium (Tastatur) und das Ausgabemedium zum Prüfen des Geschriebenen (Detailbereich der Stiftplatte) in direkter Nähe zueinander befinden. Dies reduziert die Distanz für notwendige Handbewegungen des Benutzers und kann somit die Effizienz steigern. Wenn man allerdings beide Tastaturen vor der Anzeigefläche positionieren würde, dann wäre die taktile Ausgabe sehr weit weg vom Benutzer, was insbesondere für Erkundungsaufgaben nicht sehr komfortabel ist. Die Lösung hierfür kann sich aus dem Fakt ergeben, dass die meisten Probanden auf eine separate Brailletastatur verzichten könnten und stattdessen auch eine Eingabe von Text über die Funktionstasten akzeptieren würden.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein zweites Design für die neue Stiftplatte erarbeitet (siehe Abbildung 6.9). Um die Distanz zwischen dem Benutzer und der taktilen Anzeigefläche sowie den daneben bzw. dahinter platzierten Bedienelementen zu verkürzen, wurde in diesem Design auf die Integration zusätzlicher Brailleeingabetasten verzichtet. Stattdessen ist eine ergonomische Handauflagefläche vor der Navigationsleiste vorgesehen, um dem Benutzer eine komfortablere Bedienung zu ermöglichen. Falls eine Tastatur benötigt wird, beispielsweise zum Schreiben langer Texte, dann kann diese entweder vor der Stiftplatte oder an einer beliebigen anderen Position aufgestellt werden. Für Erkundungsaufgaben ist die Nutzung einer PC Tastatur nicht notwendig, da hierfür ausreichend Bedienelemente direkt auf der Stiftplatte angebracht werden können. Neben der Navigationsleiste sind dabei Mausembleer sowie Funktions-, Cursor- und Gestentasten zu berücksichtigen. Auf diese Weise ist der Arbeitsplatz deutlich besser individualisierbar als es beim alten BrailleDis 9000 der Fall war.

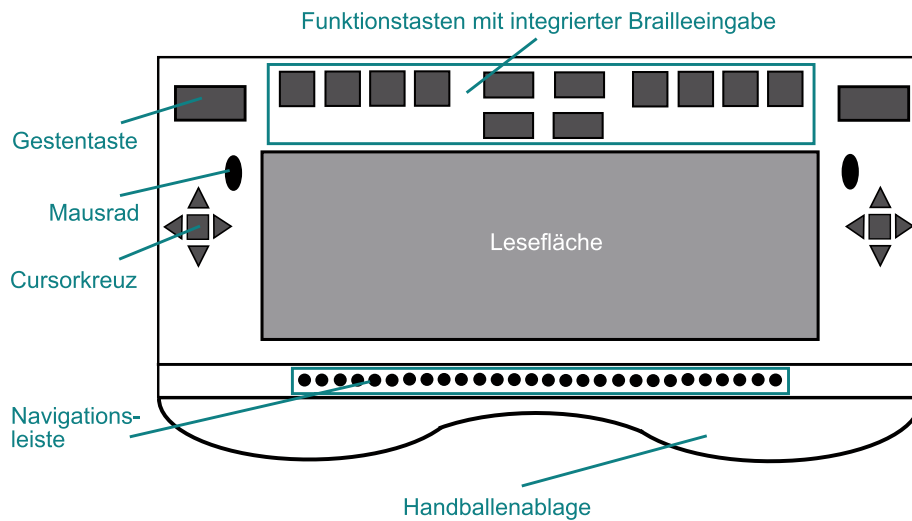


Abbildung 6.9: Design für einen neuen Stiftplattenprototypen basierend auf den Ergebnissen der zweiten Benutzerstudie (Draufsicht)

6.4 Bewertung des neuen Designs

Das vorgeschlagene Design aus Abbildung 6.9 wurde als Grundlage zur Entwicklung eines neuen Stiftplattenprototypen durch die Metec AG verwendet. In Abbildung 6.10 ist der entsprechende Gehäuseentwurf dargestellt. Alle grundlegenden Ideen wurden bei der Realisierung des neuen BrailleDis 7200 berücksichtigt. Lediglich die Mausräder wurden durch zwei Wippschalter ersetzt, welche jedoch den Grundgedanken von Zoomoperationen ebenfalls ermöglichen. Dem Wunsch der Benutzer bzgl. einer geneigten Lesefläche wurde insofern entgegengekommen, dass links und rechts am Gehäuse kleine Kunststofffüße, wie man sie zum Aufrichten von PC Tastaturen kennt, eingebaut wurden. Auf diese Weise ist eine Neigung der Stiftplatte um etwa sechs Grad möglich. Eine ausführliche Beschreibung des BrailleDis 7200 befindet sich in Abschnitt 2.5.4.

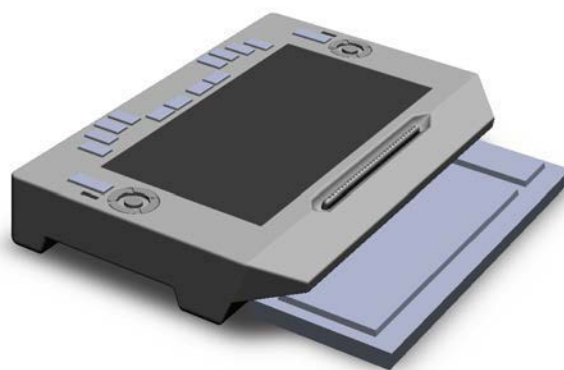


Abbildung 6.10: Designentwurf für das Gehäuse des BrailleDis 7200 (Bildquelle: Metec AG)

Auf Grundlage der neuen Bedienelemente wurde ein intuitiveres Bedienkonzept für den HyperReader entwickelt. Dieses wurde in den Benutzerstudien, die mit dem BrailleDis 7200 durchgeführt wurden, verwendet (z. B. Zoom- und PDF-Studien, siehe Abschnitt 7.4). Das neue Bedienkonzept ermöglicht unter anderem, die Navigationsleiste zum Scrollen, die Wippschalter zum Zoomen und eines der Cursorkreuze zur Emulation der Standard-Cursorstasten zu benutzen. Im Rahmen der PDF-Studie (vgl. Abschnitt 7.4.2) wurden zwölf blinde Teilnehmer gebeten, die Bedienung und das Design der neuen Stiftplatte BrailleDis 7200 zu bewerten. Die Fragen wurden

dabei von den Probanden selber auf der Stiftplatte beantwortet, d.h. der PDF Fragebogen wurde direkt in der Symbolansicht ausgefüllt. Im Folgenden werden die Antworten kurz zusammengefasst.

Sieben der Teilnehmer empfanden die Höhe des BrailleDis 7200 als angemessen, für die anderen fünf erschien das Gerät noch immer als zu hoch. Die Form des Gehäuses gefiel zehn der zwölf Probanden gut, lediglich zwei Personen beurteilten sie als zu klobig. Die Anordnung der Funktionstasten wurde im Durchschnitt als gut bewertet, wobei es vor allem bei der Lage und der Ergonomie leichte Abstriche gab. Alle außer einem Teilnehmer empfanden keines der Bedienelemente als überflüssig. Besagter Teilnehmer könnte auf die in den Funktionstasten integrierten Brailletasten (äußere 4er-Blöcke) verzichten. Die Eingabe mittels Navigationsleiste (4,9 von 5), Cursorkreuz (4,7 von 5) und Wippschalter (4,7 von 5) wurde als leicht empfunden³. Lediglich die Eingabe mit den Funktionstasten wurde als etwas umständlicher bewertet (3,5 von 5).

6.5 Empfehlungen zur Ergonomie einer Stiftplatte

Die folgenden Empfehlungen leiten sich einerseits aus den Untersuchungen zum neuen Stiftplattendesign ab, andererseits ergeben sie sich aus den allgemeinen Beobachtungen der Probanden im Rahmen der anderen Benutzerstudien. Dieser Abschnitt soll zukünftigen Entwicklern von taktilen Flächendisplays Hinweise dazu geben, was beim Design eines ergonomischen und intuitiven Geräts beachtet werden sollte.

Zur Unterstützung der Lernförderlichkeit sowie zur Steigerung der Effizienz ist die Integration intuitiver Bedienelemente in das Anzeigegerät empfehlenswert. Besonders häufig benötigte Kommandos zur Erkundung der Inhalte auf einem taktilen Display profitieren von geeigneten Eingabemöglichkeiten. Zur Realisierung von Panningoperationen können insbesondere Cursorkreuze oder Joysticks (hierunter zählt auch die Navigationsleiste) aufgrund ihrer hohen Affordanz eine intuitive Bedienung unterstützen. Zum Zoomen bieten sich beispielsweise Mausemäuler oder Wippschalter an. Solche speziellen Bedienelemente können dem Benutzer selber Hinweise auf ihre Bedienweise liefern und sollten deshalb der Verwendung einheitlicher Tasten in strukturloser Anordnung auf einem taktilen Flächdisplay vorgezogen werden.

Um dem Benutzer ein ergonomisches Arbeiten auf dem Flächendisplay zu erlauben, sollte nicht nur eine möglichst geringe Bauhöhe angestrebt, sondern auch das Ablegen der Hände beim Lesen ermöglicht werden, ohne dass dabei ein erhöhtes Risiko für versehentliches Auslösen von Eingabeelementen besteht. Hierfür sollte auf die Platzierung von Bedienelementen vor der Ausgabefläche verzichtet werden. Ansonsten sollten die Bedienelemente zumindest abgesenkt werden und nicht zu leicht auslösbar sein. Eine integrierte Tastatur ist nur zu empfehlen, wenn sie den anderen Anforderungen an ein ergonomisches und intuitives Gerät nicht entgegensteht. Ansonsten sollte eine separate PC Tastatur verwendet werden, sodass sich der Benutzer seinen Arbeitsplatz entsprechend individualisieren kann. Der Ein-/Ausschalter des Geräts sollte entsprechend ISO 24503 durch einen taktilen Punkt gekennzeichnet werden [ISO11a].

³ Bewertungsskala: von 1 (umständlich) bis 5 (leicht)

Interaktionstechniken auf einem flächigen Brailledisplay

Wie die vorherigen Kapitel zeigen konnten, stehen blinden Benutzern verschiedenartige Interaktionsmöglichkeiten beim Zugang zu grafischen Benutzungsoberflächen zur Verfügung. Die taktile Modalität stellt dabei einen wichtigen Ersatz für den visuellen Sinn dar. Abhängig vom gewählten Gerät ist die Vermittlung von Informationen über den taktilen Sinneskanal auf sehr unterschiedliche Weise möglich. Dies wiederum führt dazu, dass sich für jede Art von taktilen Display andere Interaktionstechniken eignen und die Benutzer entsprechende Strategien entwickeln müssen, um ein effizientes Arbeiten zu gewährleisten.

Wie bereits erwähnt, beschäftigt sich diese Arbeit im Speziellen mit der Interaktion auf den grafisch-taktilen Displays der Firma Metec (BrailleDis 9000 und BrailleDis 7200). Die großflächige Ausgabe in Form einer taktilen Punktmatrix unterstützt den Anwender dabei insbesondere beim aktiven Erkunden mit beiden Händen. Um die vergleichsweise hohe Informationsdichte für blinde Menschen beherrschbar zu machen, wurde das in Kapitel 3.2 beschriebene taktile Fenstersystem entwickelt. In Kapitel 3.3 konnte bereits gezeigt werden, dass das Fenstersystem die Bedienung zweidimensionaler Oberflächen grundsätzlich ermöglicht. Allerdings konnten im Rahmen dieser ersten Studie weder die einzelnen taktilen Elementaraufgaben (vgl. Abschnitt 4.2.1) noch die dafür zur Verfügung stehenden Interaktionstechniken im Detail untersucht werden.

Zur Überprüfung der Hypothese, ob *„die effektive und effiziente Bedienung von grafischen Benutzungsoberflächen auf einem flächigen Brailledisplay möglich ist“*, sind somit weitere Untersuchungen notwendig. In diesem Kapitel werden deshalb zunächst relevante Forschungsfragen formuliert, die sich von der allgemeinen Hypothese ableiten lassen. Anschließend werden die einzelnen Fragen im Rahmen mehrerer Studien mit blinden Probanden genauer untersucht. Aus den dabei gewonnenen Ergebnissen lassen sich abschließend konkrete Empfehlungen ableiten, die beim Entwurf von taktilen Benutzungsoberflächen für flächige Brailledisplays beachtet werden sollten.

7.1 Forschungsfragen

Basierend auf der in Kapitel 4.2 erarbeiteten Taxonomie zur taktilen Interaktion lassen sich mehrere Aspekte identifizieren, die im Rahmen von Benutzerstudien untersucht werden müssen.

Neben Ein- und Ausgabetechniken auf der Stiftplatte sind dies insbesondere die einzelnen Elementaraufgaben sowie die interpretierbaren Handbewegungen des Benutzers. Die reinen Bewegungsabläufe der Hände und deren zeitliche Relationen sollen an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden. Diese lassen sich weniger in den Bereich der Mensch-Computer Interaktion, sondern mehr in die Haptik und Wahrnehmungspsychologie einordnen, und würden somit weit über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen.

In Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit der Interaktion mit der Stiftplatte ergeben sich zunächst folgende allgemeine Forschungsfragen:

Forschungsfrage 1

Unterstützen die verschiedenen Ansichtsarten ein effektives und effizientes Arbeiten auf der Stiftplatte?

Forschungsfrage 2

Welche Erkundungsstrategien und Eingabemethoden eignen sich für die zweidimensionale Ausgabe der Stiftplatte?

Forschungsfrage 3

Welche Interaktionstechniken können die Effizienz beim Arbeiten auf der Stiftplatte steigern?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden mehrere empirische Untersuchungen mit blinden und teilweise auch sehenden Benutzern durchgeführt. Anhand konkreter Anwendungsbeispiele wurden jeweils einzelne Aspekte der Forschungsfragen näher betrachtet. Die Anwendungsbeispiele basieren auf den grundlegenden Einsatzgebieten, welche für die Arbeit mit einer taktilen Stiftplatte von Bedeutung sind (vgl. auch Abschnitt 3.1), und lassen sich somit in folgende allgemeine Aufgaben unterteilen:

- Lesen von Texten
- Arbeiten mit Grafiken
- Zugang zu GUIs (allgemeine Screenreaderfunktionalität)

Besonderes Augenmerk beim Zugang zu GUIs wird dabei auf die Orientierung in der dargestellten grafischen Oberfläche gelegt. Unabhängig vom konkreten Anwendungsszenario ist dieser Aspekt gerade für neuartige zweidimensionale Screenreader, wie den HyperReader, essentiell. Aus den konkreten Einsatzgebieten sowie den drei allgemeinen Forschungsfragen lassen sich die folgenden spezielleren Fragen ableiten:

1. Fragen zu den Ansichtsarten

- (a) Sind die vier Ansichtsarten notwendig, um in verschiedenen Situationen ein effizientes Arbeiten zu ermöglichen?
- (b) Welche Vor- und Nachteile weisen die Ansichtsarten beim Identifizieren verschiedenartiger Elemente einer GUI auf?
- (c) Unterstützt die Arbeitsansicht das effiziente Lesen?
- (d) Unterstützt die Originalansicht den Zugang zu Schwarzschrift-Texten sowie das Erkennen von grafischen Formatierungen in Dokumenten?
- (e) Unterstützt die Originalansicht ein effektives Arbeiten mit taktilen Grafiken?

- (f) Unterstützt die räumliche Anordnung der Bedienelemente in der Symbolansicht die Zuordnung von zusammengehörigen Objekten, z. B. Beschriftung und Formularelement?
- (g) Kann die Überblicksansicht ein Verständnis über den visuellen Aufbau einer grafischen Benutzungsoberfläche schaffen?

2. Fragen zu Erkundungsstrategien und Eingabemethoden

- (a) Hat die Eingabemethode einen Einfluss auf die Effektivität und Effizienz der Interaktion?
- (b) Welche Lesestrategien können beim Verwenden verschiedener Eingabemethoden beobachtet werden?
- (c) Welche Erkundungsstrategien verwenden blinde Benutzer, um spezielle Interaktionsobjekte innerhalb einer Anwendung zu finden?
- (d) Ist die zweihändige Interaktion, wie von Schiewe et al. [SKNW09] angenommen, effizienter als das einhändige Arbeiten auf der Stiftplatte?
- (e) Unterstützen die Bereiche das zweihändige Bedienen?

3. Fragen zur Effizienz der Interaktionstechniken

- (a) Kann die Minimap die Effizienz und Genauigkeit beim Lokalisieren von Elementen im Vergleich zum Scrollbalken erhöhen?
- (b) Als wie hilfreich erweist sich die Strukturleiste beim Finden spezieller Interaktionsobjekte innerhalb einer Anwendung?
- (c) Wie lässt sich das nicht-visuelle Zoomen auf der Stiftplatte effizienter und weniger beanspruchend gestalten?
- (d) Kann die Interaktion auf der Stiftplatte die gleiche Effizienz erreichen wie die herkömmlichen Hilfsmittel blinder Menschen?

Entsprechend der Taxonomie ist neben dem Benutzer und dessen Interaktion auch das Gerät ein wichtiger Einflussfaktor. Das heißt, für eine effiziente Bedienung auf der Stiftplatte ist die softwareseitige Umsetzung unter anderem auch von der zur Verfügung stehenden Hardware abhängig. Eine Betrachtung der Bedienmöglichkeiten des Geräts zur Eingabe ist für die ergonomische Interaktion somit ebenfalls einzubeziehen. Die Eigenschaften des verwendeten Geräts, in diesem Fall der taktilen Stiftplatte, sind vorgegeben und demzufolge kein Teil dieser Arbeit. Allerdings wurden im Rahmen einer Ergonomie-Studie bereits die physischen Bedienelemente zur Eingabe untersucht und anhand der Ergebnisse ein neues Design für die Stiftplatte entwickelt (siehe Kapitel 6).

Tabelle 7.1 zeigt einen Überblick über die durchgeführten Studien und der dabei untersuchten Forschungsfragen. Im Folgenden werden die durchgeführten Benutzerstudien zu verschiedenen Interaktionsmöglichkeiten und deren Ergebnisse sowie daraus resultierende Empfehlungen vorgestellt. Für eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Interaktionstechniken sei auf Kapitel 3.2 verwiesen.

7.2 Lesen von Braille-Inhalten

Wie in Kapitel 2.5.4 angesprochen, ist es zur kontinuierlichen Präsentation von grafischen Inhalten notwendig, dass jeder Punkt den gleichen Abstand zu seinen benachbarten Punkten besitzt. Aufgrund dieser Äquidistanz zwischen den einzelnen Punkten müssen zwei Braillezeichen auf der Stiftplatte durch eine vertikale sowie horizontale Reihe gesenkter Stifte voneinander getrennt werden, um lesbar zu sein. Somit wird jedem Zeichen eine 3x5-Punkt-Matrix zugeordnet wie es bereits Schweikhardt [Sch85b] vorgeschlagen hatte. Daraus ergibt sich ein Abstand von 5 mm zwischen zwei Braillezeichen (vgl. Abbildung 7.1). Im Folgenden wird diese Brailleschrift als

Tabelle 7.1: Überblick über die untersuchten Forschungsfragen und analysierten Aspekte der taktilen Interaktion sowie der Usability in den einzelnen Benutzerstudien

Benutzerstudie		untersuchte Aspekte		
Name	Kapitel	Forschungsfrage(n)	taktile Interaktion	Usability
PowerPoint-Studie	3.2.4	1a, 1g	Intention, Ausgabe (Ansichtsarten)	Effektivität
Bewertung taktilen Fenstersystem	3.3	2e	Handbewegung (Geste), Ausgabe (Bereiche, Ansichtsarten)	Effektivität
Braille-Lesestudie	7.2.1	1c	Intention (Identifizieren), Ausgabe (Schrift/Text)	Effektivität, Effizienz (Zeit)
Studie zur taktilen Schwarzschrift	7.2.2	1d	Intention (Identifizieren), Ausgabe (Schrift/Text)	Effektivität
taktiler Grafikeditor	7.3.1	1e	Intention (Navigieren, Identifizieren, Auswählen, Manipulieren), Ausgabe (Filterung/Aufbereitung, Fokusblinken)	Effektivität
Studie zu taktilen Füllmustern	7.3.2	1e	Intention (Identifizieren), Ausgabe (Objekteigenschaften)	Effektivität, Konsistenz
Studie zu Orientierungshilfen (Lokalisierungsstudie)	7.4.1	1a, 1b, 2c, 3a, 3b	Intention (Suchen, Orientieren, Navigieren, Identifizieren), Handbewegung (Lesestrategie), Ausgabe (Ansichtsarten)	Effektivität, Effizienz (Zeit, Orientierung)
PDF-Studie zu Eingabemethoden	7.4.2	1f, 2a, 2b, 2d	Intention (Identifizieren, Auswählen), Eingabe (Modalität), Handbewegung (Geste, Tastendruck, Gerätewechsel, Lesestrategie)	Effektivität (Fehler), Effizienz (Homingzeit/-weg, Intuitivität)
PDF-Studie zum Effizienzvergleich	7.4.3	1f, 2d, 3d	Intention (Identifizieren, Auswählen), Eingabe (Modalität), Handbewegung (Lesestrategie)	Effektivität (Fehler), Effizienz (Zeit)
Zoom-Studie	7.4.4	3c	Intention (Bezugssystem manipulieren), Ausgabe (Aufbereitung, Fokusblinken)	Effizienz (Zeit, allgemeine Beanspruchung), Zufriedenheit
Studie zur Hardware-Ergonomie	6	-	Gerät (Eingabe), Eingabe (Modalität)	Ergonomie, Intuitivität

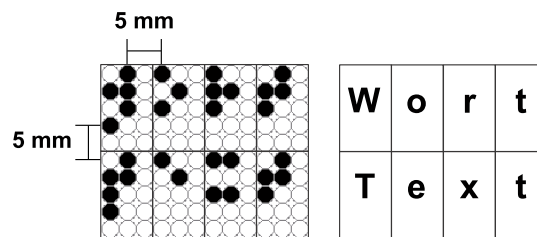


Abbildung 7.1: 3x5-Punkt-Matrix der äquidistanten Brailleschrift

„äquidistantes Braille“ bezeichnet. Im Vergleich zur herkömmlichen Brailleschrift (vgl. [DIN07]) auf einzeiligen Braillezeilen ist der Abstand zwischen äquidistanten Braillezeichen um 1,5 mm größer.

Da insbesondere das Lesen von Brailleschrift eine essentielle Aufgabe auf taktilen Brailledisplays darstellt, muss geprüft werden, inwieweit die Ausgabemöglichkeiten der Stiftplatte ein effizientes Lesen ermöglichen. In den folgenden Studien werden dazu die Forschungsfragen 1c (Unterstützt die Arbeitsansicht das effiziente Lesen?) und 1d (Unterstützt die Originalansicht den Zugang zu Schwarzschrift-Texten?) untersucht.

7.2.1 Studien zum Lesen von äquidistantem Braille auf der Stiftplatte

Der Einfluss der Lesbarkeit von Braille bei veränderten Abständen wurde bereits von Meyers et al. untersucht (siehe [MEA58]). Die Ergebnisse zeigen allerdings sowohl beim Punktabstand als auch beim Zeilenabstand einen Vorteil bei den bisherigen Maßen. Lediglich beim horizontalen Abstand zwischen zwei Braillezellen konnte ein kleinerer Abstand die Leserate etwas erhöhen. Die Resultate von Meyers et al. könnten darauf hindeuten, dass der Zeichenabstand eine Funktion des zurückgelegten Wegs beim Lesen darstellt. Ein größerer Abstand zwischen den einzelnen Braillezeichen, wie dies beim äquidistanten Braille der Fall ist, hätte somit einen negativen Einfluss auf die Lesegeschwindigkeit.

Um dem Benutzer ein äquivalentes Lesen auf der Stiftplatte zu gewährleisten, darf die äquidistante Schrift jedoch die Lesegeschwindigkeit nicht wesentlich reduzieren. Dies ist insofern wichtig, da Braille-Leser ohnehin deutlich langsamer lesen als sehende Menschen (vgl. Abschnitt 2.2.1). Aus diesem Grund wurde eine Untersuchung zur Lesbarkeit von äquidistantem Braille durchgeführt. Diese wurde in ähnlicher Fassung in [PNW10] veröffentlicht.

7.2.1.1 Methodik

Brailleschrift wird normalerweise entweder flächig auf Papier oder einzeilig auf herkömmlichen Braillezeilen gelesen. Im Experiment wird deshalb sowohl das mehrzeilige als auch das einzeilige Lesen von äquidistantem Braille auf der Stiftplatte untersucht. Insgesamt gibt es somit die folgenden vier Testbedingungen (im Folgenden auch als Lesemedien bezeichnet):

1. Gedrucktes Standardbraille auf Papier (23 Zeilen á 38 Zeichen)
2. Standardbraille auf einer 40er Braillezeile der Firma Papenmeier
3. Mehrzeiliges äquidistantes Braille auf der gesamten Anzeigefläche der Stiftplatte (12 Zeilen á 38 Zeichen, Arbeitsansicht)
4. Einzeiliges äquidistantes Braille im Detailbereich der Stiftplatte

Die Studie wurde mit 20 blinden Personen im Alter zwischen 27 und 68 Jahren (Durchschnittsalter: 40, elf Frauen) durchgeführt. Darunter befanden sich 17 geburts- bzw. früherblindete¹ und drei späterblindete Menschen. Alle Probanden benutzten täglich die Brailleschrift, wobei sich zwei Teilnehmer als durchschnittliche Braille-Leser einschätzten und die anderen als geübte Leser.

Vor dem eigentlichem Lesevergleich durfte sich jeder Teilnehmer etwa 10 Minuten auf der Stiftplatte einlesen, um sich mit der äquidistanten Brailleausgabe vertraut zu machen. Als Gerät zur Ausgabe der beiden äquidistanten Lesekonditionen wurde das BrailleDis 9000 verwendet. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde in jeder Testbedingung 8-Punkt-Eurobraille verwendet.

Die Aufgabe der Probanden bestand anschließend darin, jeweils einen von vier verschiedenen Texten auf den vier Lesemedien laut vorzulesen. Jeder Teilnehmer führte die Aufgabe dabei auf jedem Medium aus (within-group Design). Um Lern-, Reihenfolgen- und Ermüdungseffekte auszuschließen, wurden sowohl die Texte als auch die Lesemedien gleichmäßig auf die vier Leseaufgaben verteilt. Auf jedem Lesemedium hatten die Probanden fünf Minuten Zeit, um so viel Text wie möglich zu lesen. Basierend auf der zuletzt gelesenen Wortgruppe wurde die Anzahl an gelesenen Wörtern bestimmt und entsprechend die Lesegeschwindigkeit in Wörtern pro Minute (wpm) für jedes Lesemedium ausgerechnet.

7.2.1.2 Ergebnis

Die durchschnittlichen Lesegeschwindigkeiten unter den vier Lesebedingungen sowie die entsprechende Benutzervariabilität sind in Abbildung 7.2 dargestellt. Die hohe Abweichung ergibt sich aus der Heterogenität bzgl. der Lesefähigkeiten der einzelnen Probanden.

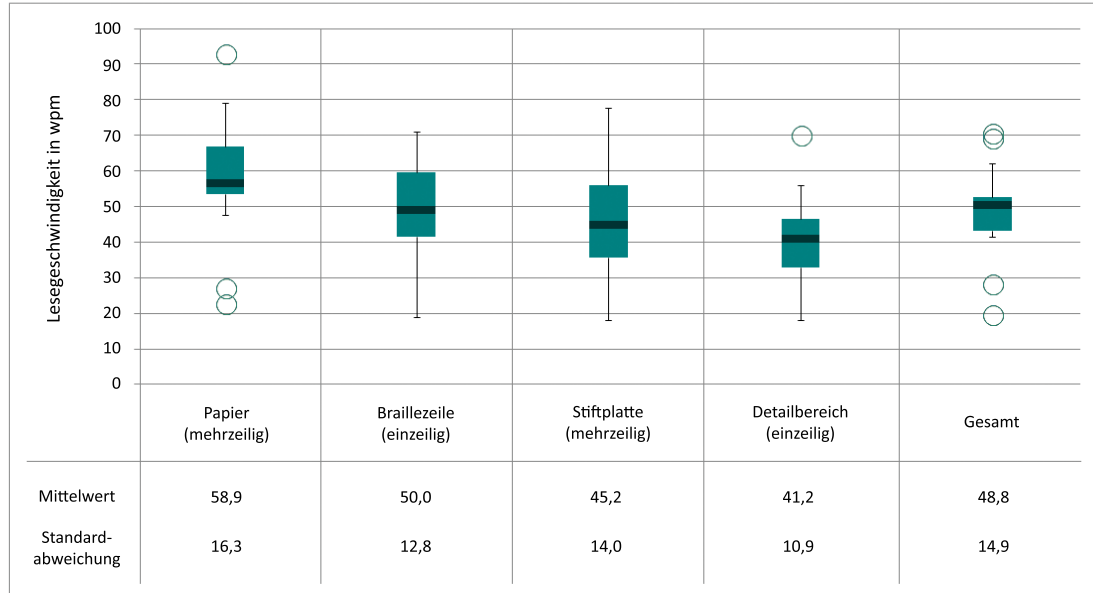


Abbildung 7.2: Leseraten der Probanden unter den vier Lesebedingungen (Boxplot-Diagramme, Kreise markieren Ausreißer; $n = 20$)

Insgesamt zeigt sich ein signifikanter Einfluss des Lesemediums auf die Lesegeschwindigkeit ($F_{3,76} = 6,206$; $p < 0,001$). Zweiseitige t-Tests zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen Standardbraillezeile und mehrzeiliger Stiftplattenausgabe ($t = 2,035$; $df = 19$; $p = 0,056$) sowie zwischen mehrzeiliger und einzeiliger Stiftplattenausgabe ($t = 1,932$; $df = 19$; $p = 0,068$).

¹ Der Begriff „früherblindet“ wird in dieser Arbeit für einen Erblindungszeitpunkt vor der Einschulung, d. h. bis zu einem Alter von etwa 6 Jahren, verwendet.

Im Vergleich zur klassischen Brailleschrift wurde die äquidistante Darstellung von 18 der 20 Probanden als gewöhnungsbedürftig aber machbar empfunden. Lediglich ein Proband empfand das äquidistante Braille als beschwerlich. Ein weiterer Proband empfand es hingegen als angenehm zu lesen. Vier Teilnehmer sehen generelle Vorteile der äquidistanten Schrift. Neben der Darstellbarkeit von Grafiken wird der größere Abstand als günstiger für Leseanfänger erachtet. Sieben Probanden sehen allerdings auch generelle Nachteile. Beispielsweise erscheint das Lesen anstrengender und ermüdender. Insbesondere gute Punktsschrift-Leser bemängeln die größere Fläche, welche zum Erfassen von Wörtern aufgrund des größeren Abstands notwendig ist, da die Erkennung dadurch erschwert und das Lesetempo entsprechend reduziert wird.

7.2.1.3 Diskussion

Die Untersuchung hat gezeigt, dass das Lesen von äquidistantem Braille auf der Stiftplatte nicht deutlich langsamer ist als das Lesen von Standardbraille auf einer einzeiligen Braillezeile. Insbesondere die Lesegeschwindigkeiten der zwei langsamsten Leser (siehe Ausreißer in Abbildung 7.2) zeigen nur minimale Unterschiede auf den vier untersuchten Lesemedien. Dies unterstützt die Vermutung, dass Braille-Anfänger von einem größeren Abstand zwischen zwei Buchstaben profitieren könnten.

Allerdings wies der verwendete BrailleDis 9000 Prototyp einige defekte Stifte auf, welche als Störfaktoren das Lesen unter den beiden Stiftplattenbedingungen teilweise erschwerten. Entsprechend der Forschung von Millar [Mil88b], bei der einige Probanden sehr viel Zeit über „entarteten“ Wörtern verbrachten, könnten diese falschen Stifte zu einer Minderung der Lesegeschwindigkeit von mehr als 10 % führen. Um genauere Resultate zum Lesen von äquidistantem Braille zu erlangen, erscheint die Durchführung einer Nachfolgestudie notwendig, in welcher der Faktor „Äquidistanz“ isoliert betrachtet wird.

7.2.1.4 Methodik der Nachfolgestudie

Die Nachfolgestudie wurde in Form einer Pilotuntersuchung mit vier blinden Probanden, darunter zwei geburtsblinde Frauen (Alter: 37 und 49 Jahre) und zwei Männer (Alter: 32 und 36 Jahre, einer geburts- und einer späterblindet) durchgeführt. Alle Teilnehmer schätzten sich selber als geübte Braille-Leser ein, wobei zwei von ihnen zum Zeitpunkt der Untersuchung noch keine Erfahrung mit äquidistantem Braille besaßen. Die beiden anderen Probanden hatten bereits seit über einem halben Jahr Erfahrung mit der Stiftplatte und deren Brailleausgabe, da sie an der Entwicklung beteiligt waren.

Die Vergleichbarkeit der Lesematerialien ist in dieser Studie sichergestellt, indem beide Schriftvarianten in 8-Punkt-Eurobraille auf Papier gedruckt wurden. Nach einer kurzen Einlesephase erhielten die Probanden insgesamt vier Leseproben bestehend aus jeweils zwei gedruckten Seiten (23 Zeilen á max. 32 Zeichen) aus „Oliver Twist“ von Charles Dickens, die sie laut vorlesen sollten. Die zwei Seiten einer Leseprobe wurden dabei abwechselnd in normalem und in äquidistantem Braille vorgelegt. Zwei Probanden haben dabei mit der normalen und die anderen beiden mit der äquidistanten Leseprobe begonnen. In allen vier Lesephasen wurde die benötigte Zeit gemessen und daraus die Lesegeschwindigkeit berechnet.

7.2.1.5 Ergebnis der Nachfolgestudie

In Tabelle 7.2 sind die Lesegeschwindigkeiten der vier Probanden dargestellt. Die beiden in Bezug auf die Äquidistanz unerfahrenen Leser erreichten im Durchschnitt eine Leserate von 84 wpm für normales und 74,7 wpm für äquidistantes Braille. Der Unterschied zwischen den beiden Brailleschriften fällt bei den erfahrenen Lesern deutlich geringer aus (70,1 wpm für normales und 71,9 wpm für äquidistantes Braille). Insgesamt scheint das Lesen von äquidistantem Braille somit nicht nennenswert langsamer zu sein.

Tabelle 7.2: Leseraten bei Standard- und äquidistantem Braille

Proband – Erfahrung mit äquid. Braille	Leserate (in wpm)	
	Standardbraille	Äquidistantes Braille
1 – unerfahren	126,1	109,4
2 – unerfahren	41,9	40,0
3 – erfahren	68,9	70,6
4 – erfahren	71,3	73,3
Durchschnitt aller Probanden	77,0	73,3

7.2.1.6 Diskussion der Nachfolgestudie

Der direkte Vergleich von äquidistantem und herkömmlichem Braille hat gezeigt, dass ein erfahrener Äquidistanz-Leser sogar minimal höhere Leseraten beim äquidistantem Braille erreichen kann. Es wird somit deutlich, dass sich Braille-Leser durchaus an die veränderte Brailledarstellung auf der Stiftplatte gewöhnen können. Außerdem bestätigen die Ergebnisse die Vermutung, dass schlechtere Braille-Leser (wie Proband 2) vom größeren Buchstabenabstand profitieren können.

Im Gegensatz dazu ist Proband 1 ein sehr geübter und schneller Leser, der entsprechend mehr Zeit für die äquidistante Darstellung benötigt. Dies lässt sich einerseits dadurch erklären, dass etwas mehr Zeit zum Abtasten der größeren Strecke beim äquidistanten Braille benötigt wird. Andererseits nehmen besonders geübte Leser nicht Buchstabe für Buchstabe auf, sondern fassen größere Informationseinheiten zusammen [SH98]. Das leicht abweichende Wortbild im äquidistanten Braille und die damit verbundene erschwerte Verarbeitung könnte somit ebenfalls zur Verlangsamung führen.

Aufgrund der begrenzten Anzahl an Probanden kann das Ergebnis der Nachfolgestudie nicht verallgemeinert werden. Allerdings bestätigt es die Vermutung des ersten Lesevergleichs, dass insbesondere bei Braille-Anfängern keine Effizienzeinbußen beim äquidistanten Braille zu erwarten sind. Die Ergebnisse können somit zumindest als erste Tendenz verstanden werden und konnten zusammen mit der Hauptstudie zeigen, dass ein effektives Lesen von Braille auf der Stiftplatte möglich ist.

7.2.2 Studie zur taktilen Schwarzschrift

Neben der Ausgabe von Braille erlaubt die Stiftplatte auch die Anzeige taktiler Schwarzschrift (Originalansicht, siehe Abschnitt 3.2.1.2). Dabei werden die Buchstaben direkt in ihrer pixelbasierten Form auf der Stiftplatte ausgegeben (vgl. Abbildung 7.3). Gerade für ehemalige Leser von Printmedien und ältere Menschen kann dies eine alternative Lesemöglichkeit darstellen, da diese Personen häufig Schwierigkeiten beim Lernen von Brailleschrift haben (vgl. Abschnitt 2.2.1). Außerdem erlaubt diese Form der Ausgabe auch den Zugang zu grafischen Inhalten, die ein herkömmlicher Screenreader nicht ohne Weiteres bereitstellen kann. Beispielsweise kann mit Hilfe der verfügbaren Zoomfunktionen auch Text, welcher sich innerhalb von Pixelgrafiken befindet, in verschiedenen Größen erkundet werden.

Die folgende Studie wurde in [PNW10] veröffentlicht. Ziel war es, die Nützlichkeit und Anwendbarkeit der pixelgetreuen und somit layouterhaltenden Originalansicht sowie der dort dargestellten taktilen Schwarzschriftzeichen zu untersuchen (Forschungsfrage 1d). Ein mögliches Anwendungsszenario hierfür besteht darin, Formatierungen in elektronischen Dokumenten zu überprüfen. Beispielsweise treten in Dokumenten häufig Schriftwechsel auf, die jedoch von blinden Benutzern oft nicht entdeckt werden [DKEB02].



Abbildung 7.3: Originalansicht mit taktiler Schwarzschrift



Abbildung 7.4: Darstellung serifenloser Schrift (oben) und Serifenschrift (unten) in der Originalansicht

7.2.2.1 Methodik

An der Studie nahmen 12 blinde Probanden im Alter zwischen 27 und 68 Jahren (Durchschnittsalter: 40, sechs Frauen) teil, von denen die Hälfte gute oder zumindest mittelmäßige Kenntnisse zu Schwarzschrift in taktiler Form aufwies. Zwei Benutzer hatten laut eigenen Angaben bisher noch keine Erfahrung mit taktiler Schwarzschrift².

Die Aufgabe der Probanden bestand darin, einen Geschäftsbrief in Microsoft Word, im Konkreten eine Rechnung, zu erkunden. Der Inhalt wurde auf dem BrailleDis 9000 in der Originalansicht präsentiert. Die Interaktion wurde durch den HyperReader bereitgestellt, wobei zur Eingabe die Hardware-Tasten des Geräts genutzt wurden.

Vier Probanden erhielten nach dem Erkunden des Dokuments eine zusätzliche Aufgabe. Ihnen wurde das gleiche Dokument mit mehreren Formatierungs- sowie Layoutfehlern angezeigt, die sie finden sollten. Neben uneinheitlichen Textformatierungen (z. B. Fettschrift vs. Standardfont) innerhalb eines Wortes oder einer anderen semantischen Einheit wurden insbesondere auch Textausrichtungen (z. B. Einzug bei ansonsten linksbündigen Elementen) verändert.

7.2.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Originalansicht stellt für 10 der 12 Probanden eine sinnvolle Ergänzung zur textbasierten Arbeitsansicht dar. Taktile Buchstaben konnten oft schon ab einer Größe von sechs bis sieben Stiften, was in etwa 15 mm entspricht, gut identifiziert werden. Die individuelle Erkennungsleistung ist jedoch nicht nur von den taktilen Fähigkeiten und Schwarzschrift-Kenntnissen des Benutzers abhängig, sondern auch in hohem Maße vom Buchstaben und seiner Formatierung. Beispielsweise lassen sich Großbuchstaben oft schneller identifizieren als Kleinbuchstaben³ und serifenlose Fonts leichter als Serifenschriften (siehe auch Abbildung 7.4). Texte mit zusätzlichen Schriftformatierungen, wie Kursiv- oder Fettdruck, sind aufgrund der niedrigen Auflösung der Stiftplatte ebenfalls meist schwieriger zu lesen, da dicke und schräge Linien schnell dazu führen, dass einzelne Buchstaben ineinander verschwimmen.

² Im Test hatte dies jedoch im Vergleich zu den anderen Teilnehmern keinen Einfluss auf die Ergebnisse.

³ Ein Grund hierfür liegt auch darin, dass nicht alle blinden Menschen Kleinbuchstaben kennen. Das Erlernen von serifenlosen Großbuchstaben ist oft verbreiteter.

Die zweidimensionale Präsentation erlaubte es allen Probanden, räumliche Beziehungen innerhalb des Dokuments zu erkennen. Zwei Teilnehmer bewerteten die Erfassbarkeit räumlicher Zusammenhänge dabei mit „sehr gut“, drei Teilnehmer mit „gut“, sechs Teilnehmer mit „angemessen“ und nur ein Teilnehmer mit „schlecht“. Bei neun Probanden traten Orientierungsprobleme auf (2x minimale, 5x mittelschwere und 2x schwerwiegende). Diese basierten nicht nur auf Schwierigkeiten beim eigenständigen Navigieren (3 Benutzer), beim Auffinden der Elemente in der 1:1-Darstellung⁴ (2) oder dem Erkunden der Tabelle (2), sondern sind laut drei der Probanden auch darauf zurückzuführen, dass zunächst eine umfassende Einarbeitung sowie etwas Übung mit der Stiftplatte erforderlich ist.

In der Zusatzaufgabe, welche von vier Probanden bearbeitet wurde, konnten zahlreiche Formatierungsfehler identifiziert werden. Insbesondere das Erkennen von falschen Textbündigkeiten oder inkonsistenter Fettschreibung war leicht möglich. Die flächige Darstellung hat sich dabei bei allen vier Probanden als große Hilfe erwiesen. Fehlende Unterstreichungen und Inhaltsblöcke wurden hingegen nicht entdeckt. Letztere sind dabei mehr vom Lesen und Verstehen des Textes abhängig, sodass herkömmliche Methoden (Braille lesen) dafür geeigneter scheinen. Insgesamt kann die Erkundung großer Dokumente jedoch sehr zeitaufwendig sein. Zudem wird vom Benutzer ein gewisser Grad an Orientierungsfähigkeit und räumlichen Vorstellungsvermögen vorausgesetzt, um eine sinnvolle Nutzung der Originalansicht sowie ein effektives Lesen taktiler Schwarzschrift zu gewährleisten.

7.2.3 Zusammenfassung

Die Studien zum Lesen von Text auf der Stiftplatte haben gezeigt, dass Benutzer sich an äquidistantes Braille gewöhnen und dann auch eine zu herkömmlichen Braillezeilen vergleichbare Leserate erreichen können. Der vergrößerte Abstand zwischen zwei Zeichen kann vor allem für Braille-Anfänger von Vorteil sein, da auf diese Weise ein schnelleres Erkennen der einzelnen Buchstaben ermöglicht wird (siehe auch [PPP94]). Insgesamt lässt sich *Forschungsfrage 1c* somit positiv beantworten.

Darüber hinaus kann die Anzeige taktiler Schwarzschrift vollkommen neue Möglichkeiten eröffnen. Insbesondere Menschen, die in einem höheren Alter erblinden und damit normalerweise keine Braillekenntnisse besitzen, dafür aber gute Schwarzschriftkenntnisse aufweisen, können auf diese Weise neben der auditiven auch die taktilen Modalität zur digitalen Informationsaufnahme nutzen. Bezogen auf *Forschungsfrage 1d* lassen sich zudem folgende Ergebnisse zusammenfassen: Die Originalansicht ermöglicht den Zugang zu Schwarzschrift-Texten und kann darüber hinaus auch das grundlegende Erkennen von einigen grafischen Formatierungen unterstützen.

7.2.4 Empfehlungen zur Anzeige von textuellen Inhalten

Prinzipiell sollten taktile Flächendisplays die Eigenschaften von Standardbraille weitestgehend einhalten, um dem Leser einen einfachen Wechsel zwischen verschiedenen Anzeigegeräten zu ermöglichen. Dennoch sind leichte Modifikationen, beispielsweise ein vergrößerter Abstand zwischen einzelnen Buchstaben, problemlos möglich. Das Prinzip der Äquidistanz, wie es zur Anzeige von grafischen Inhalten notwendig ist, stellt somit kein Problem beim Lesen von Braille dar und kann zur effektiven Ausgabe von Text auf flächigen Brailledisplays genutzt werden.

Taktile Schwarzschrift ist nicht effizient und damit nicht als alleinige Textausgabe sinnvoll. Als Notlösung für ansonsten unzugängliche Inhalte ist sie jedoch nutzbar – vorausgesetzt der Leser hat entsprechende Vorkenntnisse und das Anzeigegerät ermöglicht eine Einstellung der Textgröße (z. B. Zoomfunktionalitäten). Beim Erstellen von Inhalten, die mit Hilfe der Originalansicht auf der Stiftplatte dargestellt werden sollen, sollten Autoren möglichst einfache serifenlose Schriften in nicht zu kleinen Schriftgrößen verwenden, um blinden Benutzern die Wahrnehmung der Inhalte zu erleichtern.

⁴ ein Stift entspricht einem Pixel

7.3 Erkundung taktiler Grafiken

Taktile Grafiken und Diagramme stellen eines der wichtigsten Anwendungsgebiete der taktilen Stiftplatte dar (vgl. Abschnitt 3.1.1). Im Gegensatz zu papierbasierten Ausgabemedien kann blinden Benutzern auf diese Weise der interaktive Zugang zu grafischen Inhalten erleichtert werden. Durch die schnellen Bildsetzraten auf der Stiftplatte ist es nicht nur möglich, Änderungen sofort nachzuvollziehen, sondern auch eigene Modifikationen an der Darstellung vorzunehmen. Da der Umgang blinder Menschen mit taktilen Grafiken ein sehr umfangreiches Gebiet darstellt, werden im Folgenden zwei konkrete Fallbeispiele herangezogen, um die Nutzung der Stiftplatte in diesem Bereich zu verdeutlichen. Zunächst wird in Abschnitt 7.3.1 die Umsetzung des Fenstersystems am Beispiel eines taktilen Grafikeditors vorgestellt. Dabei soll vor allem die Nutzung des BrailleDis 7200 als Interaktionsmedium genauer betrachtet werden. In Abschnitt 7.3.2 wird anschließend die Verwendung taktiler Füllmuster auf der Stiftplatte untersucht.

7.3.1 Fallbeispiel 1: Taktiler Grafikeditor

Die im Folgenden vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) geförderten Tangram Projekts durchgeführt. Ziel des Projekts war es, die Erstellung taktiler Fachbuch-Grafiken zu unterstützen. Einerseits wurden dazu entsprechende Hilfsmittel für sehende Grafikproduzenten entwickelt. Dies beinhaltet unter anderem die in Abschnitt 2.2.2.3 zusammengefassten Richtlinien zur Umsetzung taktiler Grafiken sowie die Entwicklung einer Toolbar mit speziellen Unterstützungsfunktionen für die Open Source Grafikedatoren Libre bzw. Open Office Draw (siehe auch [BPW15b]). Andererseits wurden geeignete Methoden untersucht, um blinden Benutzern mit Hilfe der Stiftplatte nicht nur den interaktiven Zugang zu Grafiken zu erleichtern, sondern sie auch aktiv in den Erstellungsprozess taktiler Grafiken einzubeziehen. Dazu wurde ein kollaborativer Zeichenarbeitsplatz entwickelt, welcher an dieser Stelle kurz vorgestellt wird.

Die Grundidee des Zeichenarbeitsplatzes besteht darin, einen blinden Benutzer bereits bei der Erstellung taktiler Grafiken mitwirken zu lassen. Die Stiftplatte bietet hierfür gute Voraussetzungen, da sie blinden Menschen im Gegensatz zu papierbasierten taktilen Materialien einen hochgradig interaktiven Zugang zu grafischen Informationen gewährleistet. Die Interaktivität besteht dabei nicht nur im Abrufen von vorhandenen Informationen, sondern auch im Nachvollziehen von Änderungen an der Grafik zur Laufzeit. Dies lässt vielfältige Interaktionsmöglichkeiten zwischen sehendem Zeichner und blindem Leser zu, wie beispielsweise das Äußern von Änderungswünschen durch den blinden Benutzer sowie das anschließende Bearbeiten durch den sehenden Partner und das unmittelbare Nachvollziehen der Änderungen auf der Stiftplatte. Der Tangram Zeichenarbeitsplatz geht jedoch noch einen Schritt weiter, indem er dem blinden Benutzer nicht nur das Erkunden, sondern auch das eigenständige Bearbeiten von Grafikelementen ermöglicht. Auf technische Details soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden, diese finden sich in diversen Veröffentlichungen (siehe [BP14, BPW15b, BPW15a]). Im Folgenden werden die Interaktionsmöglichkeiten des blinden Anwenders auf dem BrailleDis 7200 bei der Arbeit mit taktilen Grafiken innerhalb des Tangram Systems beschrieben. Diese wurden in ähnlicher Weise auch in den oben genannten Veröffentlichungen publiziert.

7.3.1.1 Taktile Benutzungsoberfläche des Tangram Systems

Die Besonderheit des Tangram Arbeitsplatzes besteht in der Kollaboration mit einem sehenden Partner, wobei beide Parteien auf dem gleichen Grafikdokument am gleichen Rechner arbeiten⁵. Die Interaktion des blinden Benutzers findet aus diesem Grund ausschließlich auf der Stiftplatte statt. Die PC Tastatur bleibt dem sehenden Benutzer für seine Eingaben vorbehalten.

⁵ Die genauere Betrachtung der Kollaboration ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Nähere Informationen dazu finden sich bei Bornschein et al. [BPW15a].

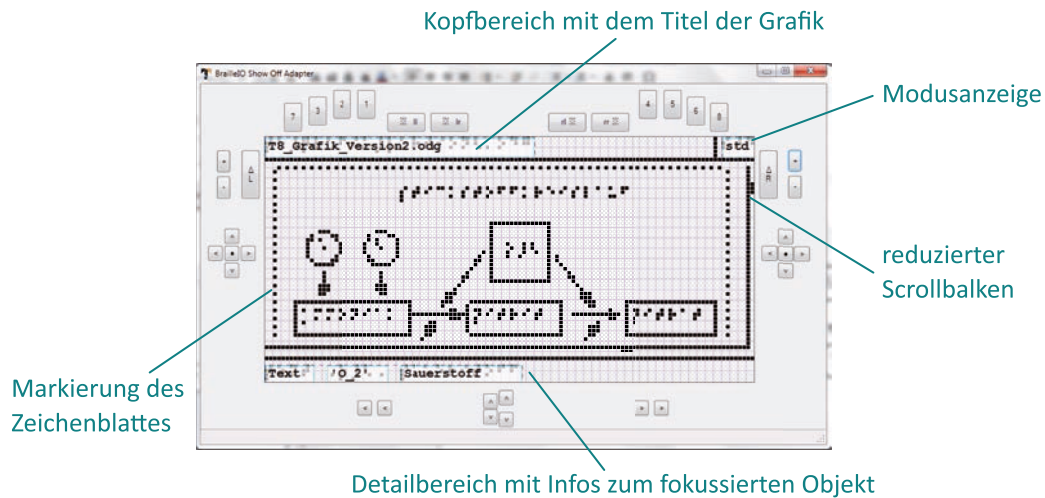


Abbildung 7.5: Taktile Benutzungsoberfläche des Tangram Zeichenarbeitsplatzes im Druckzoom

Die taktile Benutzungsoberfläche des Tangram Arbeitsplatzes auf der Stiftplatte (im Folgenden auch als taktiles Grafikeditor bezeichnet, vgl. Abbildung 7.5) basiert auf dem in Kapitel 3 vorgestellten Fenstersystem. Um der Ausgabe der Grafik auf der Stiftplatte mehr Platz zur Verfügung zu stellen, wurde allerdings eine vereinfachte Variante des Bereichskonzepts umgesetzt. Das heißt, auf die Strukturleiste sowie die Fenstertitel-Leiste wurde in diesem System verzichtet, da diese vor allem für Interaktionen mit textuellen Inhalten und GUI-Elementen bzw. für die parallele Arbeit mit mehreren GUI-Fenstern relevant sind. Die Umsetzung der taktilen Ausgabe durch das BrailleIO-Framework von Bornschein [Bor14] erlaubt jedoch prinzipiell auch die Definition weiterer Bereiche.

Wie auch beim HyperBraille System beinhaltet der *Kopfbereich* den Titel des aktuellen Dokuments, in diesem Fall den Titel der Grafik, in Brailleschrift. Da der Tangram Arbeitsplatz bisher allerdings nur die Originalansicht zur Ausgabe der Grafiken im Darstellungsbereich unterstützt⁶, wurde auf die Anzeige der Ansichtsartenliste verzichtet. Stattdessen wird der aktuelle Interaktionsmodus⁷ als Abkürzung angezeigt. Im *Detailbereich* werden Informationen zum fokussierten Element bzw. Statusmeldungen ebenfalls in Brailleschrift ausgegeben. Der *Darstellungsbereich* enthält das Zeichenblatt der GUI von Libre bzw. Open Office Draw, wobei die Grenzen des Zeichenblattes mit Hilfe einer gepunkteten Linie markiert sind (vgl. Abbildung 7.5). Andere Elemente der grafischen Oberfläche, wie beispielsweise die Menüleiste, werden dem blinden Benutzer nicht auf der Stiftplatte präsentiert. Auf diese Weise kann die taktile Ausgabe auf die wesentlichen Informationen beschränkt und damit eine übersichtlichere Darstellung gewährleistet werden. Zudem werden nur stark vereinfachte Scrollbalken angezeigt, sodass den Grafikobjekten möglichst viel Platz zur Verfügung steht.

Um dem Benutzer eine grundlegende Anpassung der dargestellten Grafik zu ermöglichen, kann die Ausgabe im Darstellungsbereich invertiert sowie anhand eines Schwellwerts in ihrer Helligkeit modifiziert werden. Alle Pixel, die dunkler als der *Schwellwert* sind, werden als erhabene Stifte dargestellt, alle anderen als gesenkte Stifte. Auf diese Weise können durch Erhöhung des Schwellwerts auch besonders feine Linien sichtbar werden, wohingegen das Reduzieren des Schwellwerts das Verschwinden von Konturen mindern kann. Aufgrund der relativ geringen Auflösung der Stiftplatte von 10 dpi können allerdings dennoch einzelne Linien verschwinden, wenn sie nicht in das Anzeigeraster fallen.

⁶ Eine Ausnahme stellen zusätzliche Dialogfenster der Zeichenanwendung dar, wie beispielsweise ein Metadatendialog. Diese werden analog zur Arbeitsansicht in Brailleschrift im Darstellungsbereich ausgegeben, da es um die textuelle Vermittlung der Informationen geht. An dieser Stelle soll jedoch nicht weiter auf diese Dialoge eingegangen werden.

⁷ Eine Erläuterung zu den einzelnen Interaktionsmodi findet sich weiter unten in diesem Abschnitt.

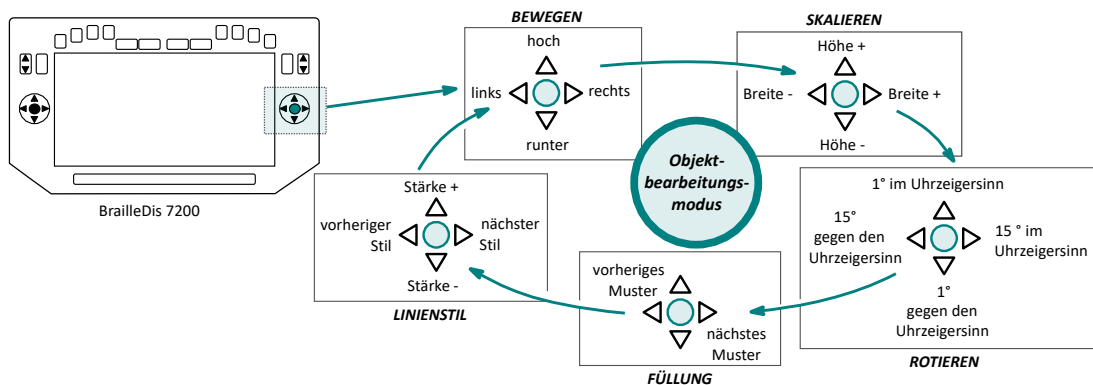


Abbildung 7.6: Verwendung der Tasten des rechten Cursorkreuzes bei den verschiedenen Editiermodi des taktilen Grafikeditors

Analog zum HyperReader sind zur Erkundung von Grafiken auf der Stiftplatte insbesondere Zooming- und Panningoperationen wichtig. Neben den bisherigen Funktionen (vgl. Abschnitt 3.2.2) stellt der Grafikeditor auch einen so genannten *Druckzoom* bereit. Dieser zoomt das Zeichenblatt auf der Stiftplatte auf die Größe des A4 Formats⁸. Im Kontext der Bewertung von taktilen Grafiken, die später als Schwellpapier- oder Brailleausdruck verteilt werden sollen, ist dies wichtig für den blinden Benutzer, um Größen und Abstände auf den finalen Produktionsmedien einschätzen zu können. Zudem ist es in dieser Zoomstufe möglich, die textuellen Inhalte der Grafik in Brailleschrift auszugeben (vgl. auch Abbildung 7.5), da Braille hier in seiner korrekten Größe darstellbar ist. Auf diese Weise kann der blinde Benutzer auf einfache Weise Text innerhalb der Grafik überprüfen.

Zur *Selektion* einzelner Grafikelemente bietet die Stiftplatte zwei Möglichkeiten an: 1) Klickgesten und 2) Durchtabben mittels entsprechender Tastenkommandos. Während Klickgesten mit der rechten Gestentaste die direkte Auswahl von Objekten erlauben, können mit der linken Gestentaste zusätzliche Informationen (Titel und Beschreibung des entsprechenden Elements) abgerufen werden. Die Informationen werden dabei einerseits per Sprachausgabe, andererseits im Detailbereich präsentiert. Selektierte Grafikobjekte werden taktil durch einen blinkenden Rahmen markiert.

Möchte der Benutzer das gewählte Element editieren, so kann er dies mit Hilfe der bereitgestellten *Bearbeitungsfunktionen* direkt auf der Stiftplatte realisieren. Um eine möglichst intuitive Eingabe zu gewährleisten, wurde dazu ein entsprechendes Konzept entwickelt, welches auf den Tasten des rechten Cursorkreuzes sowie verschiedenen Editiermodi basiert. Zunächst kann der Benutzer durch Betätigen der mittleren Taste die Bearbeitung aktivieren. Der blinkende Rahmen wird dabei ausgeblendet, sodass die Verfolgung von Konturen und die Wahrnehmung weiterer Objekteigenschaften nicht behindert wird. Zudem wird automatisch der erste Bearbeitungsmodus, das Verschieben des Objekts auf dem Zeichenblatt, aktiviert. Mit Hilfe der vier äußeren Tasten des Cursorkreuzes kann das Element in die entsprechenden Richtungen verschoben werden. Ein weiteres Betätigen der mittleren Taste führt zum nächsten Bearbeitungsmodus und so weiter. In Abbildung 7.6 sind die einzelnen Modi sowie die entsprechenden Funktionalitäten der äußeren Cursorkreuztasten dargestellt.

Damit jeder einzelne Bearbeitungsschritt für den Benutzer taktil wahrnehmbar ist, muss unabhängig von der aktuellen Zoomstufe eine Änderung von mindestens einem oder zwei Stiften hervorgerufen werden. Dies wurde durch eine von der Zoomstufe abhängigen Berechnung der Schrittweite gelöst (vgl. [BP14]). Zusätzlich wird ein kurzer Ton ausgegeben, um Änderungen auch auditiv zu vermitteln.

⁸ Im Gegensatz zum HyperReader entspricht die Zoomstufe „100 %“ im Tangram Arbeitsplatz nicht der 1:1-Darstellung, in welcher ein Stift einem Pixel entspricht, sondern diesem Druckzoom. Es hat sich herausgestellt, dass dies für blinde Menschen intuitiver verständlich ist.

Für die Umsetzung taktiler Materialien kann neben einer geeigneten Darstellung auch die Angabe zusätzlicher textueller Beschreibungen hilfreich sein. Aus diesem Grund erlaubt der Grafikeditor dem blinden Anwender nicht nur das Ändern des Aussehens von Grafikobjekten, sondern auch das *Hinzufügen von Titeln und Beschreibungstexten*. Da die Tastatur dem blinden Benutzer zur Eingabe von Text nicht zur Verfügung steht, müssen auch hierfür die Tasten des BrailleDis verwendet werden. Um trotz der hohen Anzahl an notwendigen Eingabekommandos auf sehr schwer memorierbare und komplexe Eingaben zu verzichten, war es notwendig weitere *Interaktionsmodi* einzuführen. Auf diese Weise können Tastenkombinationen abhängig vom aktuellen Modus interpretiert und bei verschiedenen Aufgaben wiederverwendet werden.

Neben dem *Standardmodus*, welcher die oben beschriebenen Funktionalitäten zum Erkunden und Editieren von Grafikobjekten bereitstellt, gibt es auch den *Brailleschreibemodus*. Dieser muss zum Schreiben von Text aktiviert sein, da er anstatt der üblichen Eingabekommandos die Nutzung der Brailleeingabetasten des BrailleDis 7200⁹ zur Erzeugung einzelner Braillebuchstaben erlaubt, wie dies von herkömmlichen Brailletastaturen oder -schreibmaschinen bekannt ist. Die Ausgabe im Darstellungsbereich ist nicht zwangsläufig von einer Modusänderung betroffen. Beispielsweise werden Titel und Beschreibung direkt im Detailbereich angezeigt und bearbeitet, sodass der Benutzer weiterhin die Möglichkeit hat, beim Formulieren der Texte das entsprechende Grafikobjekt zu erkunden. Aus diesem Grund hat die Modusänderung insbesondere keinen Einfluss auf die Navigationsleiste, sodass auch im Braillemodus Panningoperationen möglich sind.

Wie bereits angedeutet, werden selektierte bzw. fokussierte Grafikelemente mit einem blinkenden Rahmen markiert. Vor allem wenn sich das entsprechende Objekt nicht im sichtbaren Ausschnitt auf der Stiftplatte befindet, kann das Aufsuchen sehr zeitaufwendig sein. Aus diesem Grund kann der Benutzer jederzeit zum fokussierten Element springen. Zudem kann der so genannte *Braillefokus-Verfolgungsmodus* aktiviert werden, bei dem der sichtbare Ausschnitt dem Braillefokus folgt. Wenn der blinde Benutzer beispielsweise durch die einzelnen Grafikelemente tabbt, so wird automatisch das aktuell gewählte Objekt mittig im Darstellungsbereich platziert. Analog dazu kann auch der *Mausfokus-Verfolgungsmodus* verwendet werden. Dabei wird nach jedem Fokuswechsel in der GUI das durch den sehenden Benutzer selektierte Grafikelement mittig im Darstellungsbereich platziert. Dieser Modus kann dem blinden Benutzer dabei helfen, die Arbeitsschritte seines sehenden Partners mitzuverfolgen. Zur Beseitigung von Unsicherheiten über den aktuell gewählten Interaktionsmodus, wurde wie oben beschrieben anstatt der Ansichtsartenliste eine Modusanzeige in den Kopfbereich integriert, welche in Form einer Abkürzung Auskunft über den aktuellen Modus gibt¹⁰.

Um die Konsistenz der verschiedenen Stiftplattenanwendungen zu gewährleisten, basiert das umgesetzte Tastenkonzept auf dem des HyperReaders (vgl. Anhang A). Beispielsweise werden auch beim Tangram System die Navigationsleiste sowie das linke Cursorkreuz für Panningkommandos und die Wippschalter sowie der linke Brailleeingabe-Tastenblock für Zoomingoperationen genutzt. Dies hat den Vorteil, dass mit dem HyperBraille System vertraute Anwender nicht alle Kommandos neu erlernen müssen. Die spezifischen Kommandos des Tangram Systems wurden basierend auf der Wichtigkeit der einzelnen Funktionalitäten sowie deren Verwendung in den unterschiedlichen Interaktionsmodi (Erkundung vs. Braille schreiben) zugewiesen. Die Verwendung der BrailleDis 7200 Tasten für die einfachen Kommandos im Standardmodus ist in Abbildung 7.7 dargestellt.

7.3.1.2 Bewertung der Interaktion mit der Stiftplatte beim Umgang mit Grafiken

Im Rahmen eines kollaborativen Grafikumsetzungsszenarios wurde der Tangram Arbeitsplatz mit acht Paaren aus jeweils einem sehenden und einem blinden Benutzer getestet. In einer ersten Phase musste der sehende Proband zunächst eigenständig eine schematische Darstellung in

⁹ Angelehnt an die entsprechenden Braillepunkte werden diese als Tasten „1“ bis „8“ bezeichnet (vgl. Abbildung 7.7).

¹⁰ In der Modusanzeige werden die folgenden Abkürzungen verwendet: „std“ = Standardmodus, „bsm“ = Brailleschreibemodus, „bff“ = Braillefokus-Verfolgungsmodus, „mff“ = Mausfokus-Verfolgungsmodus.

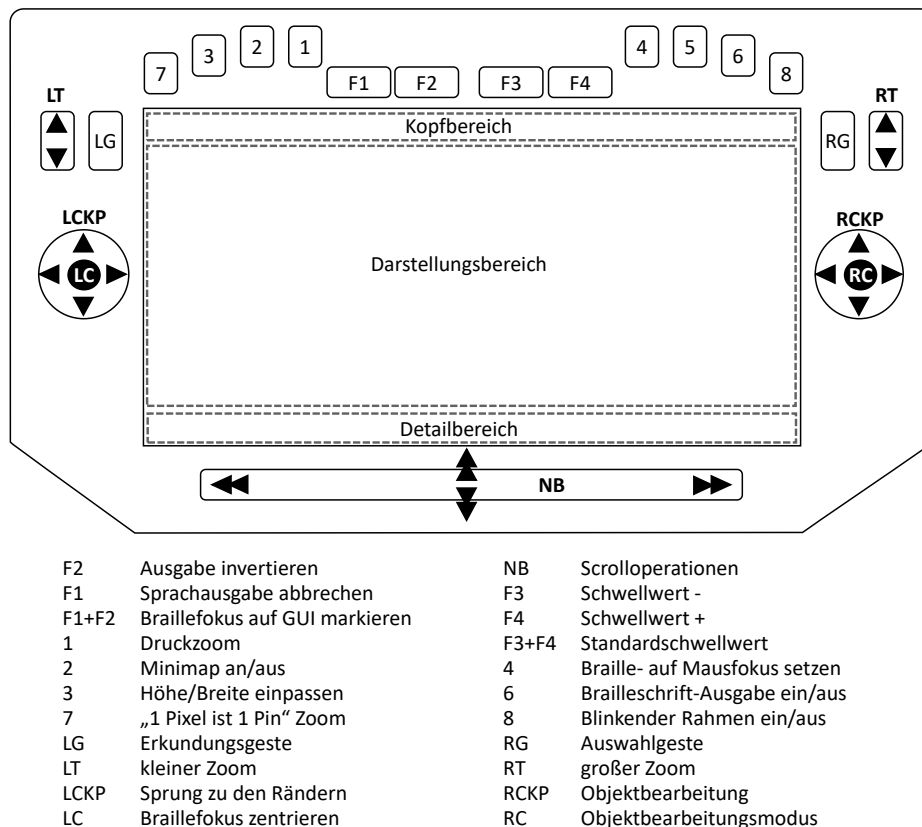


Abbildung 7.7: Schematische Darstellung des Tastenkonzepts auf dem BrailleDis 7200 für den Zeichenmodus

eine taktiler Grafikvorlage umsetzen. Im zweiten Schritt sollte die Grafik unter Verwendung der Möglichkeiten des Tangram Systems zusammen mit einem blinden Partner weiter verbessert werden. Die Untersuchung und deren Ergebnisse wurden zusammen mit Bornschein in [BPW15a] veröffentlicht. An dieser Stelle soll keine ausführliche Beschreibung des Testszenarios erfolgen, da für diese Arbeit lediglich die taktilen Interaktionen des blinden Benutzers auf der Stiftplatte relevant sind. Die folgenden Erkenntnisse bezüglich des taktilen Zeichenarbeitsplatzes basieren auf den Beobachtungen und Bewertungen der blinden Probanden innerhalb der kollaborativen Phase. Ein besonderes Augenmerk beim Beurteilen des taktilen Grafikeditors soll dabei entsprechend Forschungsfrage 1e darauf gerichtet werden, inwieweit die Originalansicht ein effektives Arbeiten mit taktilen Grafiken ermöglicht.

Die acht blinden Studienteilnehmer waren alle geübte Braille-Leser und im Alter zwischen 27 und 59 Jahren (Durchschnittsalter: 43, zwei Frauen). Die Erfahrungen der einzelnen Probanden sind in Tabelle 7.3 zusammengefasst. Die Erfahrungen beim Erstellen eigener grafischer Materialien basieren meist auf manuellen Methoden, wie das Verwenden spezieller Folien, auf denen Kugelschreiber-Linien fühlbar sind, oder das Stecken von Nadeln und Spannen von Gummibändern. Selbst erfahrene Teilnehmer hatten bisher kaum Umgang mit digitalen Methoden, wie Braillezeichen-Grafiken (vgl. Abschnitt 2.3.4), spezieller Brailledruck-Software oder Kommandosprachen.

Wie auch schon beim HyperBraille System gefiel den Probanden vor allem die Auswahl einzelner Objekte mittels Zeigegeste sowie die resultierende Audioausgabe sehr, da auf diese Weise die Grafikerkundung unterstützt werden kann ohne viel zu lesen. Auch die Erlernbarkeit wurde mit 4,4 von 5 möglichen Punkten als gut bewertet, obwohl sehr viele Tastenkommandos erlernt werden mussten und ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen beim Benutzer erforderlich ist. Insbesondere die intuitiven Bedienelemente zum Zooming und Panning sind jedoch zur einfachen Erkundung von Grafiken sehr hilfreich.

Tabelle 7.3: Erfahrungen der Probanden

#	Seheinschränkung	taktile Grafik- erkundung	taktile Grafikerstellung	Stiftplatte
1	geburtsblind	hoch	durchschnittlich	hoch
2	geburtsblind	sehr hoch	hoch	sehr hoch
3	späterblindet	durchschnittlich	niedrig	sehr niedrig
4	späterblindet	niedrig	sehr niedrig	sehr niedrig
5	geburtsblind	sehr hoch	durchschnittlich	hoch
6	geburtsblind	sehr hoch	hoch	durchschnittlich
7	späterblindet	hoch	niedrig	durchschnittlich
8	späterblindet	sehr hoch	durchschnittlich	hoch

Auch die Editiermöglichkeiten unter Verwendung des rechten Cursorkreuzes wurden als sehr intuitiv, effektiv, effizient und zufriedenstellend bewertet (vgl. Abbildung 7.8). Dabei wurde vor allem das direkte taktile Feedback sehr gut angenommen von den Probanden. Lediglich zwei Teilnehmer kritisierten die reduzierte Effizienz aufgrund des linearen Wechsels zwischen den einzelnen Modi. Der Vorschlag eines Probanden, die aktuellen Werte beim Betreten der einzelnen Editiermodi zu präsentieren, wurde bereits im System integriert. So werden beispielsweise beim Aktivieren des Verschieben-Modus die konkreten x- und y-Positionen des selektierten Objekts per Sprache sowie über den Detailbereich ausgegeben. Zwei Benutzer wünschten sich zudem zusätzliche Hilfetexte, um die Erlernbarkeit des Systems zu unterstützen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zwar kein Hilfesystem konzipiert, allerdings ist die Nutzung des Detailbereichs auch hierfür vorstellbar. Neben der Lösung durch Quickinfos, welche nach kurzer Zeit wieder verschwinden (vgl. Abschnitt 3.2.1.1), sollten diese Texte zum Zwecke der Steuerbarkeit auch jederzeit manuell abrufbar sein.

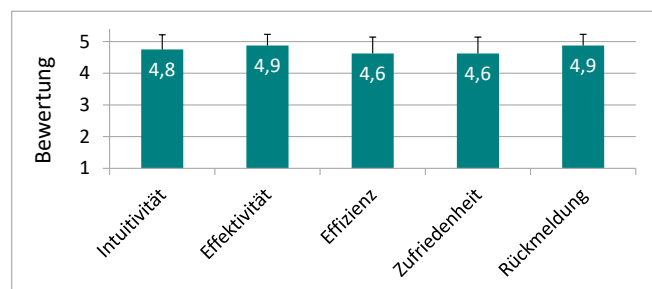


Abbildung 7.8: Bewertung der Editiermöglichkeiten für Grafikobjekte auf der Stiftplatte (Skala: 1 = sehr schlecht bis 5 = sehr gut; Mittelwerte und Standardabweichungen; $n = 8$)

Eine Bewertung der wichtigsten Konzepte und Funktionen der taktilen Benutzungsoberfläche im Tangram System durch die Probanden ist in Abbildung 7.9 dargestellt. Insgesamt wird deutlich, dass die im Rahmen der Ergonomie-Studie (vgl. Kapitel 6) getroffene Wahl der Bedienelemente (z.B. Navigationsleiste) einen positiven Einfluss auf die Intuitivität und Bedienbarkeit hat. Auch die hinter der Anzeigefläche liegenden Brailleingabetasten konnten im Rahmen des Brailleschreibemodus erfolgreich zur Eingabe von kurzen Texten (Titel und Beschreibung von Grafikobjekten) verwendet werden, was ebenfalls die entsprechende Designentscheidung stützt.

Obwohl insbesondere die Zooming- und Panningoperationen als sehr hilfreich bewertet wurden, trat bei den Probanden teilweise ein gewisser Kontextverlust auf. Beispielsweise verwechselten selbst erfahrene Stiftplattenbenutzer manchmal die Panningmetapher (vgl. Abschnitt 3.2.2),

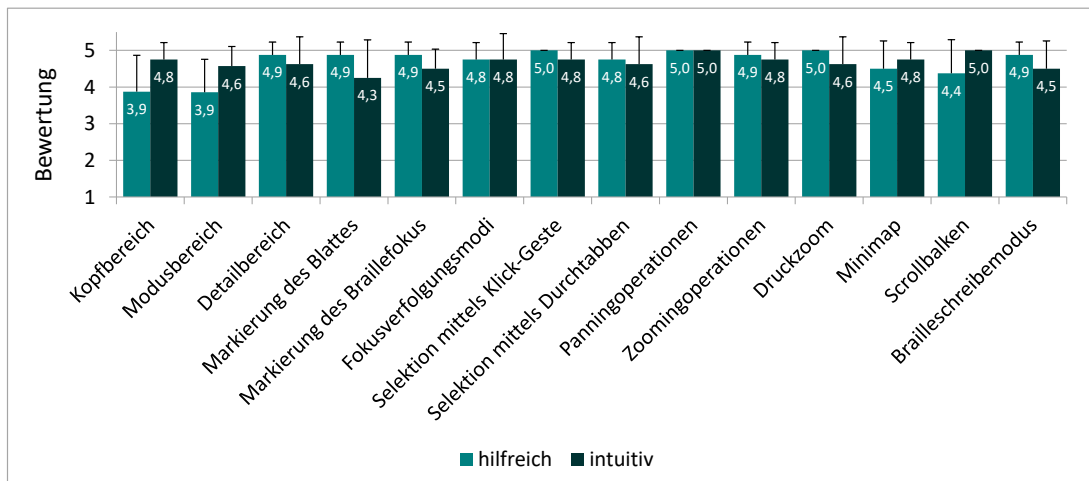


Abbildung 7.9: Bewertung wichtiger Konzepte und Funktionen des taktilen Grafikeditors (Skala: 1 = nicht hilfreich bzw. intuitiv bis 5 = sehr hilfreich bzw. intuitiv; Mittelwerte und Standardabweichungen; $n = 8$)

sodass der Inhalt zunächst in die falsche Richtung bewegt wurde. Häufig wurde der Fehler jedoch schnell bemerkt und korrigiert, sodass die Lösung eher in einer geeigneten Schulung der Konzepte zu suchen ist. Größere Probleme hat der verwendete Mittelpunktzoom verursacht, da Objekte, die sich am Rand der Darstellungsfläche befinden, nach einer Zoomoperation teilweise abgeschnitten wurden oder komplett aus dem sichtbaren Bereich verschwunden sind. Abhilfe hierfür kann eine angepasste Zooming-Metapher, der in Abschnitt 7.4.4 vorgestellte Fokuszoom, schaffen.

Die verwendete Blinkrate zur Hervorhebung des fokussierten Elements in Höhe von 1,25 Hz wurde als zu langsam bewertet. Die Probanden gaben an, dass sie derartige Markierungen als Referenzpunkt nutzen würden und aus diesem Grund nicht zu lange auf ein erneutes Anheben der Stifte warten möchten. Zudem ist ein langsames Blinken kaum hörbar und somit nicht als auditiver Hinweis wahrnehmbar. Gerade dies sind viele Benutzer allerdings von ihrer herkömmlichen Braillezeile gewohnt, da diese ebenfalls mechanische Blink-Geräusche erzeugt. Auf der anderen Seite kann ein blinkender Rahmen die Formwahrnehmung stören. Um die Konturen des fokussierten Objekts besser verfolgen zu können, haben die Teilnehmer diesen häufig deaktiviert, nachdem sie das Element gefunden hatten. Im Test mussten sie dazu über den Umweg des Editiermodus gehen. Aus diesem Grund wurde dem System die zusätzliche Funktionalität hinzugefügt, den blinkenden Rahmen per Tastendruck ein- und auszublenden.

7.3.1.3 Zusammenfassung und Diskussion

Insgesamt hat sich gezeigt, dass die taktile Benutzungsoberfläche des Tangram Systems eine effektive Interaktion mit Grafiken auf der Stiftplatte ermöglicht. *Forschungsfrage 1e* kann somit positiv beantwortet werden. Insbesondere die unmittelbare taktile Rückmeldung beim Editieren von einzelnen Objekten bietet blinden Benutzern neue Möglichkeiten im interaktiven Umgang mit grafischen Informationen. Nichtsdestotrotz ergeben sich durch die, im Vergleich zu papierbasierten taktilen Medien, geringe Auflösung gewisse Grenzen in der Darstellbarkeit. Beispielsweise lassen sich Details zwar in hohen Zoomstufen erkunden, allerdings können vor allem in niedrigen Zoomstufen Interpolationsprobleme in Form von nicht dargestellten Linien auftreten. Dadurch ist es für den Anwender oft schwierig, einen vollständigen Überblick über die Gesamtgrafik zu erhalten. Neben verbesserten Renderingalgorithmen für die Stiftplatte können zukünftig auch höher auflösende taktile Displays zu einer Lösung dieser Problematik beitragen.

7.3.2 Fallbeispiel 2: Taktile Füllmuster

In Abschnitt 2.2.2.3 wurde bereits ein Überblick über besondere Anforderungen an taktile Darstellungen gegeben. Insbesondere das bei visuellen Abbildungen wichtige Thema „Farbe“ ist nicht für die taktile Ausgabe übertragbar. Um Farbinformationen geeignet zu vermitteln, müssen entsprechende Alternativen bereitgestellt werden. Für die taktile Wahrnehmung lässt sich dies beispielsweise durch die Verwendung unterschiedlicher Oberflächenstrukturen umsetzen. Während bei analogen tastbaren Grafiken, wie Collagen oder dreidimensionalen Modellen, verschiedene Materialien und Höhenstufen verwendet werden können [Edm92], müssen unterschiedliche Oberflächenstrukturen bei der Ausgabe über eine Punktmatrix simuliert werden. Hierfür stellen taktil unterscheidbare Texturen einen möglichen Ansatz dar. Im Vergleich zu hoch auflösenden taktilen Ausgabemedien, wie z. B. Schwellkopien oder 20 dpi Brailleausdrucken, ist die Auflösung der Stiftplatte gering. Für das effektive Arbeiten mit taktilen Grafiken (Forschungsfrage 1e) stellt das Erkennen und Unterscheiden von Texturen jedoch ebenfalls einen wichtigen Aspekt dar. Im Folgenden wird deshalb die Verwendbarkeit taktiler Texturen auf der Stiftplatte untersucht.¹¹

Über die Anwendung taktiler Füllmuster bzw. Texturen existieren zahlreiche Studien, wobei insbesondere deren Unterscheidbarkeit adressiert wird (z. B. [CS63, NM71, JG75]). Der visuelle Eindruck von verschiedenen Texturen gibt dabei häufig keinen ausreichenden Anhaltspunkt über die taktile Unterscheidbarkeit (vgl. [Edm92]). Wichtig beim Erstellen geeigneter Muster ist es deshalb, die Eigenschaften der taktilen Wahrnehmung mit einzubeziehen sowie deren taktile Eignung zu überprüfen. Im Rahmen des ATMAPS Projekts [PCK⁺16] werden beispielsweise umfangreiche Studien mit blinden Benutzern durchgeführt, um die Standardisierung von Symbolen und Texturen in taktilen Karten voranzutreiben. Eine besondere Betrachtung der Eignung der Ergebnisse für taktile Flächendisplays scheint dabei allerdings nicht vorgesehen zu sein. Insgesamt sollte ein Set nicht aus zu vielen Texturen bestehen – entsprechende Studien sprechen von maximal acht bis zehn [NM71] bzw. elf [CS63] Mustern in einem Set.

Werden taktile Texturen als Farbersatz verwendet, um einzelne Grafikelemente damit zu versehen, so kann neben der leichten Erkenn- und Unterscheidbarkeit auch eine konsistente Verwendung dieser Muster hilfreich sein. Um die Effizienz sowie die Kollaboration mit anderen Personen zu unterstützen, sollte dies nicht nur die Konsistenz über mehrere Grafiken einschließen, sondern auch eine konsistente Anwendung auf verschiedenen Ausgabemedien beinhalten. Dabei kann unter Umständen die Anpassung einzelner Texturen notwendig sein, um die spezifischen Charakteristiken verschiedener Medien zu berücksichtigen. Nichtsdestotrotz sollte jedes Muster und seine Bedeutung über mehrere Medien hinweg als ein und dasselbe erkennbar bleiben.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Tangram Projekts eine mehrstufige Untersuchung durchgeführt. Ziel dabei war es, ein Set an Füllmustern zu definieren, welches nicht nur unerfahrene sehende Grafikproduzenten beim Erstellen guter taktiler Grafiken unterstützt, sondern auch die Konsistenz der Muster über verschiedenartige Medien hinweg sicherstellt. In dieser Arbeit werden neben der Stiftplatte auch Schwellpapier sowie Punktstift-Ausdrucke¹² als Medien adressiert. Vorteil dieser drei Verfahren ist, dass theoretisch für alle die selbe digitale Vorlage verwendet werden kann. Eine umgesetzte taktile Grafik kann somit über mehrere Distributionswege an blinde Benutzer verteilt werden. Auf diese Weise kann deren Wiederverwendbarkeit für verschiedene Einsatzzwecke sowie bei verschiedenen Institutionen sichergestellt werden.

7.3.2.1 Entwurf taktiler Füllmuster für die Stiftplatte

Mit einer Auflösung von 10 dpi besitzt die Stiftplatte die niedrigste Interpolationsmatrix der gewählten Produktionsmedien. Für scharfe und gut erkennbare taktile Strukturen sollten die

¹¹ Eine Veröffentlichung der Inhalte als Journal-Beitrag befindet sich in Vorbereitung (siehe [PBW16]).

¹² Die taktilen Ausdrücke wurden in diesem Fall mit einem Tiger Embosser produziert, welcher eine Auflösung von 20 dpi besitzt. Prinzipiell sind mit der Wahl der Produktionsmedien allerdings auch äquidistante Brailledrucker mit einer Auflösung von 10 dpi als Medien abgedeckt, da die Ausgabe in etwa der der taktilen Stiftplatte entspricht.

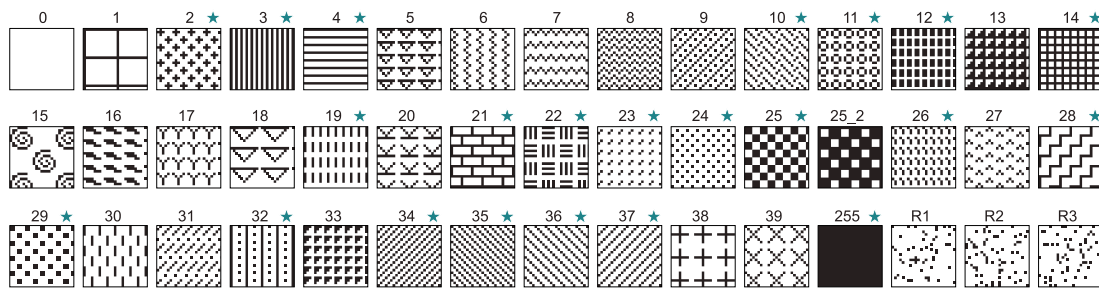


Abbildung 7.10: Für die Stiftplatte entworfene taktile Füllmuster (schwarze Pixel entsprechen einem erhabenen Punkt; die mit einem Stern markierten Muster wurden als geeignet für die Nutzung auf der Stiftplatte bewertet)

grafischen Texturen der digitalen Vorlage möglichst optimal in die Interpolationsmatrix passen. Aus diesem Grund werden die zu untersuchenden Muster zunächst für eine Auflösung von 10 dpi optimiert. Taras [Tar11] hat zwar bereits mögliche Füllmuster speziell für die Stiftplatte vorgeschlagen (u. a. auch aus Braillebuchstaben bestehende Muster), allerdings wurde deren Eignung in keiner strukturierten Weise mit blinden Probanden überprüft. Inspiriert durch existierende taktile Texturpaletten (u. a. [Edm92, Sch02, Her07, CBA10]) wurden deshalb in einem ersten Schritt verschiedenartige Muster für die Stiftplatte entworfen.

Die meisten der existierenden Sets scheinen jedoch speziell für Schwellpapier entwickelt worden zu sein. Teilweise sind die Strukturen und Objekte innerhalb der Muster entsprechend dünn, sodass hochauflösende Produktionsmedien notwendig sind, um die Wahrnehmbarkeit zu gewährleisten. Für die Stiftplatte sind aufgrund der niedrigen Auflösung allerdings zu detaillierte Strukturen nicht nutzbar. Aus diesem Grund mussten Anpassungen an den Mustern, die von der oben genannten Literatur vorgeschlagen wurden, vorgenommen werden. Am Ende wurden insgesamt 45 verschiedene Muster erstellt (vgl. Abbildung 7.10).

7.3.2.2 Vorauswahl geeigneter Füllmuster

Um die entworfenen Muster auf deren Eignung für die Stiftplatte zu testen, wurde eine Bewertung der einzelnen Texturen durch drei blinde Benutzer (zwei geburtsblinde Frauen im Alter von 30 und 51 Jahren sowie ein späterblindeter Mann im Alter von 28 Jahren) vorgenommen. Alle Teilnehmer waren Braille-Leser und hatten bereits sehr viel Erfahrung mit der Stiftplatte sowie mit taktilen Grafiken.

Die in Abbildung 7.10 dargestellten Muster wurden jeweils separat und in zufälliger Reihenfolge auf der Stiftplatte gezeigt, wobei jede Textur den gesamten Ausgabebereich gefüllt hat. Die Probanden mussten die einzelnen Muster erkunden und eine spontane Bewertung auf einer Skala von 0 (nicht geeignet) bis 5 (sehr gut geeignet) abgeben.

Insgesamt erhielten 24 der Texturen eine durchschnittliche Wertung von über 3 (siehe die mit einem Stern markierten Muster in Abbildung 7.10). Wie zu erwarten, wurden vor allem sehr einfache Texturen mit einer klaren Richtung oder Form (u. a. auch Muster, die aus Braillebuchstaben bestanden) besonders gut bewertet. Anders als bei Pappas et al. [PTS⁺09] wurden zufällige Muster (R1 bis R3 in Abbildung 7.10) sehr schlecht bewertet. Aufgrund der fehlenden Konsistenz innerhalb derartiger Texturen scheint das Identifizieren als Muster sowie das Zuordnen zu einem Legendeneintrag ohnehin als zu schwierig für die Nutzung in taktilen Grafiken. Außerdem wurden auch kurvige sowie sehr figurale Muster (z. B. Muster 15 bis 18 in Abbildung 7.10) von den Probanden abgelehnt, da sie entweder nicht geeignet für die geringe Auflösung der Stiftplatte oder zu groß dimensioniert für die Verwendung als Füllmuster sind.

Für die folgenden Untersuchungen wurden zwei der 24 als gut bewerteten Muster aussortiert. Dies ist zum Einen das leere Muster (weiße Füllung, Muster 0 in Abbildung 7.10), da dies streng genommen keiner Füllung entspricht, sondern für Objekte ohne Füllung verwendet werden kann.

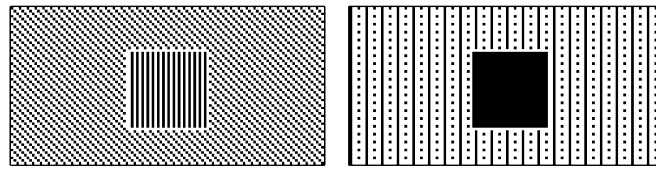


Abbildung 7.11: Beispiele von Musterkombinationen wie sie beim Bewerten der Unterscheidbarkeit auf der Stiftplatte gezeigt wurden

Zum Anderen wurde auch das großmaschige Gitter (Muster 1 in Abbildung 7.10) entfernt, da dies leicht mit Gitterstrukturen, wie sie beispielsweise bei mathematischen Graphen vorkommen, verwechselt werden kann.

7.3.2.3 Bewertung der Unterscheidbarkeit auf der Stiftplatte

Im nächsten Schritt wurde die Unterscheidbarkeit der 22 vorausgewählten Texturen auf der Stiftplatte untersucht, da dies eine weitere Voraussetzung für eine geeignete Palette an Füllmustern darstellt.

Methodik Dazu wurde eine Studie mit 15 sehenden und zwei blinden Probanden im Alter zwischen 21 und 38 Jahren (Durchschnittsalter: 29, acht Frauen) durchgeführt. Alle Teilnehmer waren Rechtshänder. Unter den blinden Probanden befand sich eine geburtsblinde Frau sowie ein späterblindeter Mann. Den sehenden Teilnehmern wurden die Augen verbunden. Ihre taktilen Fähigkeiten sind normalerweise schlechter ausgebildet bzw. untrainierter als die von blinden Menschen [GK03], sodass davon auszugehen ist, dass Texturen, die für sehende Probanden unterscheidbar sind, einen ausreichend hohen Kontrast aufweisen.

Den Probanden wurden je zwei taktile Muster gleichzeitig auf der Stiftplatte präsentiert. Wie in Abbildung 7.11 dargestellt, kann dabei das äußere Muster als Hintergrund und das innere als gefülltes rechteckiges Objekt angesehen werden. Die beiden Texturen stoßen nicht direkt aufeinander, sondern sind durch eine Reihe gesenkter Stifte (weißer Rahmen) voneinander getrennt. Das innere Quadrat hatte in jeder Testbedingung dieselbe Größe (20 x 20 Stifte) und Position. Jedes Muster wurde mit den anderen Mustern in allen Objekt-Hintergrund-Kombinationen präsentiert. Im Vergleich zur Paarvergleich-Methode von Nolan und Morris [NM71] sollten die Probanden nicht nur sagen, ob sie zwei Texturen als gleich wahrnehmen, sondern sie sollten den Grad der Ähnlichkeit (Kontrast) bewerten. Dazu wurde eine Skala von 0 (Muster sind nicht unterscheidbar) bis 5 (Muster sind sehr gut unterscheidbar) verwendet.

Vor dem Testlauf gab es eine kurze Trainingsphase, in der den Probanden drei Beispiele vorgelegt wurden. Beim ersten Beispiel handelte es sich um eine sehr hochkontrastige Kombination, da eine leere (weiße) und eine volle (schwarze) Füllung verwendet wurden. Das zweite Beispiel war eine Kombination ohne Kontrast, da sowohl das innere als auch das äußere Muster gleich war. Das dritte Beispiel waren zwei verschiedene Muster, die im späteren Testlauf nicht verwendet wurden. Um die Probanden mit der Methode des Paarvergleichs vertraut zu machen, musste das dritte Beispiel bewertet werden. Anschließend wurde der Testlauf gestartet. Dabei wurden die einzelnen Kombinationen nacheinander und in zufälliger Reihenfolge auf der Stiftplatte präsentiert. Die Bewertungen wurden durch den Testleiter protokolliert.

Ergebnisse Aus den Bewertungen für jede Musterkombination wurde der Durchschnitt über alle Probanden gebildet und als Kontrastmaß für die jeweiligen Musterpaare verwendet. Texturen, die zu den anderen Mustern im Durchschnitt kleinere Kontrastwerte als 3 (neutrale Bewertung) aufwiesen, wurden für die nähere Auswahl nicht weiter betrachtet (Muster 2, 10, 22 und 26 in Abbildung 7.10). Die übrigen Texturen, in diesem Fall 18 von 22 Mustern, wurden entsprechend der

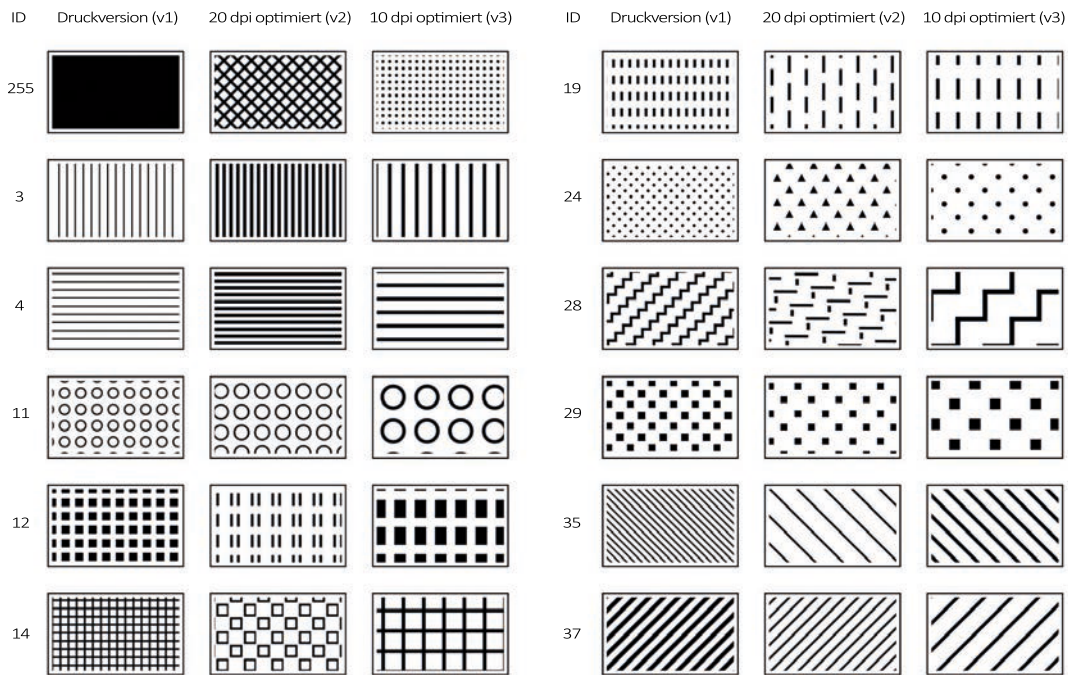


Abbildung 7.12: Untersuchte Varianten der taktilen Muster beim Vergleich auf den verschiedenen Medien

Gutachtermethode (vgl. Abschnitt 5.3) durch zwei weitere blinde und zwei sehende Personen¹³ anhand ihrer taktilen Eigenschaften in acht disjunkte Gruppen eingeordnet. Die resultierende Klassifizierung basiert auf der taktilen Wahrnehmung der Basiselemente, welche jeweils ein Muster bilden: 1) horizontale Linien (Muster 4 und 21), 2) vertikale Linien (Muster 3, 19 und 32), 3) diagonale Linien von links oben nach rechts unten (Muster 35 und 36), 4) diagonale Linien von rechts oben nach links unten (Muster 34 und 37), 5) kleine Punkte (Muster 23 und 24), 6) große Punkte (Muster 12 und 29), 7) netzartige Gebilde (Muster 11, 14 und 25) und 8) sonstige (Muster 28 und 255). Basierend auf diesen Gruppen wurden die jeweils kontrastreichsten Muster für den nächsten Iterationsschritt vorgesehen. Insgesamt wurden 12 Texturen ausgewählt (siehe 10 dpi Versionen in Abbildung 7.12), wobei aus jeder Gruppe höchstens zwei Muster stammen.

7.3.2.4 Vergleich der taktilen Füllmuster auf verschiedenen Medien

Als Ergebnis der Vorstudien wurden 12 Texturen ausgewählt, die auf der Stiftplatte gut darstellbar und voneinander unterscheidbar sind. Um diese, für eine Auflösung von 10 dpi optimierten, Muster auf anderen Produktionsmedien in äquivalenter Weise zu verwenden, sind unter Umständen einige Anpassungen notwendig. In einer weiteren Studie wurde deshalb untersucht, ob und welche Art von Modifikationen notwendig sind bzw., in Hinblick auf die medienunabhängige Ähnlichkeit einer Textur, akzeptiert werden.

Methodik Die Studie wurde mit acht blinden und einem hochgradig sehbehinderten Probanden im Alter zwischen 21 und 51 Jahren (Durchschnittsalter: 34, zwei Frauen) durchgeführt. Weitere demografische Daten sind in Tabelle 7.4 zusammengefasst.

Für jedes der 12 Muster wurden drei verschiedene Varianten erzeugt (vgl. Abbildung 7.12). Die erste Version ist für Medien optimiert, die eine Auflösung von deutlich mehr als 20 dpi zulassen

¹³ Bei den Gutachtern handelte es sich um Stiftplatten-Experten, die bereits seit mehreren Jahren mit den BrailleDis Geräten arbeiten bzw. Anwendungen für diese entwickeln. Den sehenden Gutachtern wurden die Augen verbunden.

Tabelle 7.4: Demografische Daten der Probanden

#	Sehein-schränkung	Braille-Kenntnis	Kenntnis zu taktilen Texturen	Vorstellung über Farben
1	hochgradig sehbehindert	Anfänger	durchschnittlich	visuell
2	geburtsblind	geübt	viel	keine
3	geburtsblind	durchschnittlich	durchschnittlich	keine
4	geburtsblind	geübt	viel	eigene Phantasie
5	späterblindet	geübt	durchschnittlich	früher visuell
6	geburtsblind	geübt	durchschnittlich	Begriffsassoziationen
7	geburtsblind	geübt	durchschnittlich	nur hell/dunkel
8	späterblindet	durchschnittlich	keine	Lichtwahrnehmung
9	späterblindet	geübt	durchschnittlich	Lichtwahrnehmung

(z. B. Schwellpapier). Diese wird im Folgenden *Druckversion* genannt, da sie für normale Drucker und nicht für Brailledrucker vorgesehen ist. In den Richtlinien der BANA [CBA10] werden bereits Texturen für die Schwellpapier-Nutzung vorgeschlagen. Die Druckversion der einzelnen Muster entspricht deshalb weitestgehend den originalen BANA Vorlagen. Für Muster, die keine Entsprechung in der BANA Palette haben, wurde eine verfeinerte Variante der Textur¹⁴ umgesetzt. Die zweite Version wurde für eine Auflösung von *20 dpi optimiert*, wie sie für hochauflösende Brailledrucker üblich ist. In dieser Version wurden zudem kleinere Modifikationen bezüglich Abstand, Linienstärke, Größe, Verschiebung oder Form vorgenommen, um zu überprüfen inwieweit diese von den Benutzern akzeptiert werden, ohne zwei Muster als verschieden anzusehen. Die letzte Version ist die *10 dpi optimierte* Variante, welche bereits in den Vorstudien auf der Stiftplatte untersucht wurde.

Die einzelnen Muster wurden den Probanden innerhalb einer rechteckigen Form präsentiert. Auf der Stiftplatte waren die gefüllten Rechtecke 35 x 35 Stifte groß (entspricht einer Seitenlänge von etwa 8,7 cm). Aufgrund der geringen Auflösung und der damit verbundenen Interpolationsprobleme bei feineren Strukturen, wurden auf diesem Ausgabemedium lediglich die 10 dpi Varianten (vgl. Version 3 in Abbildung 7.12) dargestellt. Auf den beiden anderen Ausgabemedien (Schwellpapier und 20 dpi Brailledruck) wurden alle drei Varianten, also insgesamt 36 Proben (vgl. Abbildung 7.12), erzeugt. Hierfür wurde für jedes Einzelmuster eine entsprechende Karte mit einem 9 x 6 cm großen mit der Textur gefüllten Rechteck bedruckt.

Insgesamt wurden 12 Proben für die Stiftplatte und jeweils 36 Proben für Schwellpapier und hochauflösenden Brailledrucker vorbereitet. Zudem wurde für jedes Ausgabemedium eine Übersicht mit allen verfügbaren Texturvarianten vorbereitet (*Übersichtspalette*), wobei die einzelnen Muster in zufälliger Reihenfolge auf zwei Seiten verteilt wurden (vgl. Abbildung 7.13). Auf der Stiftplatte wurden auf diese Weise jeweils sechs Muster in einer Größe von 36 x 27 Stiften (8,9 x 6,7 cm) dargestellt. Die Schwellpapier- und Brailleausdrucke im A4-Format (hochkant) bestanden aus jeweils 18 Mustern (je 5,1 x 3,1 cm groß), die in drei Spalten und sechs Reihen angeordnet waren.

Der Testlauf begann mit einer kurzen Einführung, in welcher der Ablauf an einem einfachen Beispiel demonstriert wurde. Jeder Proband erhielt anschließend ein festgelegtes Texturenset als Referenzmuster für die Testsitzung. Das heißt, 12 Muster einer Variante auf einem bestimmten Medium, zum Beispiel alle 10 dpi Texturen auf Schwellpapier, wurden den Probanden einzeln

¹⁴ Dazu wurden Größe und Abstände der charakteristischen Eigenschaften der Textur verkleinert.



Abbildung 7.13: Beispiel eines Referenzmusters auf der Stiftplatte und Übersichtspaletten mit allen Texturvarianten als Schwellpapier- und Brailleausdruck

nacheinander und in zufälliger Reihenfolge vorgelegt. Nach der Erkundung des aktuellen Musters sollten die Probanden die folgenden Fragen beantworten:

1. Welche Texturen der beiden anderen Medien würden Sie mit der aktuellen Textur gleichsetzen?
2. Wie würden Sie die Textur jemand anderem beschreiben?
3. Mit welcher Farbe assoziieren Sie diese Textur am ehesten?
4. Wie gut gefällt Ihnen die Textur auf einer Skala von 0 (gar nicht) bis 5 (sehr gut)?¹⁵

Um die erste Frage zu beantworten, wurden den Probanden alle Texturvarianten auf den anderen beiden Medien in Form der Übersichtspaletten vorgelegt. Ein Beispiel soll den Ablauf verdeutlichen: Muster 1 (Referenzmuster) wurde auf der Stiftplatte (Medium A) präsentiert (siehe auch Abbildung 7.13). Anschließend wurden dem Probanden zwei A4-Ausdrucke mit allen 36 Mustervarianten als hochauflösender Brilledruck vorgelegt (Kontrollmuster auf Medium B). Von diesen sollte der Proband alle Muster identifizieren, die er als gleichwertig bzw. äquivalent zu Muster 1 auf der Stiftplatte identifizieren würde¹⁶. Danach erhielt der Proband die entsprechenden Ausdrücke mit allen 36 Mustern auf Schwellpapier (Kontrollmuster auf Medium C), wo er ebenfalls die gleichwertigen Texturen identifizieren sollte. Nach dem Beantworten der Fragen 2 bis 4 für das erste Muster, wurde die gesamte Prozedur für die restlichen elf Muster wiederholt.

Ergebnisse Zur Auswertung wurde eine Verwechslungsmatrix mit der Anzahl der Gleichwertigkeitsbewertungen aufgestellt. In Abbildung 7.14 sind die entsprechenden Korrekturklassifikationsraten (Treffergenauigkeiten) beim Bewerten der Gleichartigkeit der verschiedenen Mustervarianten dargestellt. Alle von der Autorin als gleichwertig vorgesehenen Texturen konnten mit einer Sicherheit von mehr als 90 % korrekt zugeordnet werden. Dies lässt darauf schließen, dass einerseits die gewählten Varianten auf den verschiedenen Medien von den Probanden als äquivalent angesehen wurden und andererseits die unterschiedlichen Muster einen ausreichend hohen Kontrast zueinander aufweisen.

¹⁵ Die Teilnehmer sollten eine subjektive Bewertung abgeben wie gut ihnen die taktile Anmutung (das Look and Feel) des Musters gefällt.

¹⁶ Folgende Erklärung wurde den Probanden in der Einführungsphase gegeben: „Gleichwertig bedeutet nicht zwangsläufig, dass die beiden Texturen auch hundertprozentig übereinstimmen müssen. Zum Beispiel können auch unterschiedliche Abstände, Größenverhältnisse oder Formen als gleichwertig angesehen werden. Sie sollten also die Texturen auswählen, welche Sie persönlich als gleichwertig empfinden. Wenn Sie keine Textur des anderen Mediums als gleichwertig empfinden, dann können Sie dies ebenfalls sagen.“

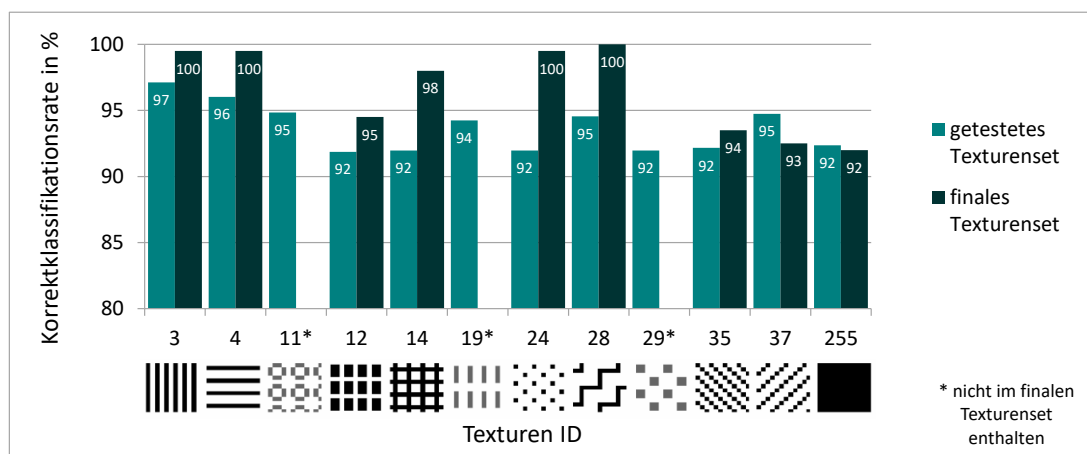


Abbildung 7.14: Korrektklassifikationsraten für die einzelnen Texturen. Das Diagramm zeigt den prozentualen Anteil der korrekten Zuordnung der verschiedenen Kontrollmuster-Varianten zu den entsprechenden Referenzmustern. Die zweite Balkengruppe zeigt die zu erwartenden Korrektklassifikationsraten für das finale Texturenset, in welchem Muster 11, 19 und 29 nicht mehr enthalten sind.

Bezogen auf die verschiedenen Modifikationsarten wurden vor allem Variationen in der Linienstärke und dem Abstand toleriert (vgl. Abbildung 7.15). Abweichungen in Form und Verschiebung wurden nur toleriert, wenn diese nicht zu groß sind. Variationen in der Größe wurden am wenigsten akzeptiert.

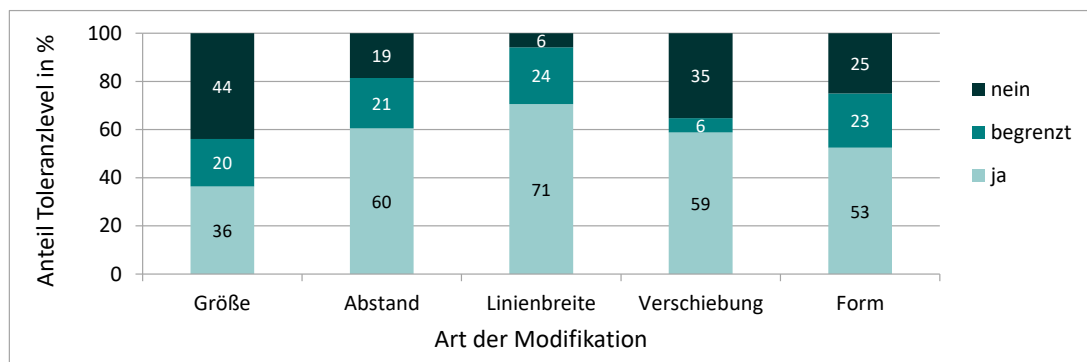


Abbildung 7.15: Toleranz der neun Probanden gegenüber verschiedenartigen Modifikationen

Ein Ziel dieser Studie bestand unter anderem darin, ein effektives Texturenset für die taktile Stiftplatte zu finden. Aus diesem Grund ist vor allem interessant, welche Texturvarianten auf den beiden traditionellen Ausgabemedien am ehesten den 10 dpi Mustern auf der Stiftplatte entsprechen. In Abbildung 7.16 ist deshalb dargestellt, wie oft die Probanden die verschiedenen Mustervarianten als gleichwertig zu den Stiftplattentexturen bewertet haben und in wie vielen Fällen die Stiftplattenmuster als gleichwertig zu den Varianten auf den anderen Medien bewertet wurden.

Das Zuordnen von Stiftplattentexturen und den entsprechenden hochauflösenden Mustern (Druckversionen auf Schwellpapier bzw. Brailledruck) war mit einer durchschnittlichen Erfolgsrate von 39,4 % am schwierigsten. Der Grund dafür scheint in der höheren Frequenz¹⁷ innerhalb der Muster zu liegen, was von den meisten Probanden nicht als äquivalent betrachtet wurde. Wie zu erwarten, war die Erfolgsrate beim Zuordnen der 10 dpi Versionen unabhängig vom Ausgabemedium mit 84,1 % am höchsten. In den meisten Fällen hatten auch die 20 dpi Versionen eine akzeptable Erfolgsrate (62,0 %).

¹⁷ Anzahl der Wiederholungen der charakteristischen Merkmale einer Textur in den beiden Dimensionen bei einer definierten Objektgröße

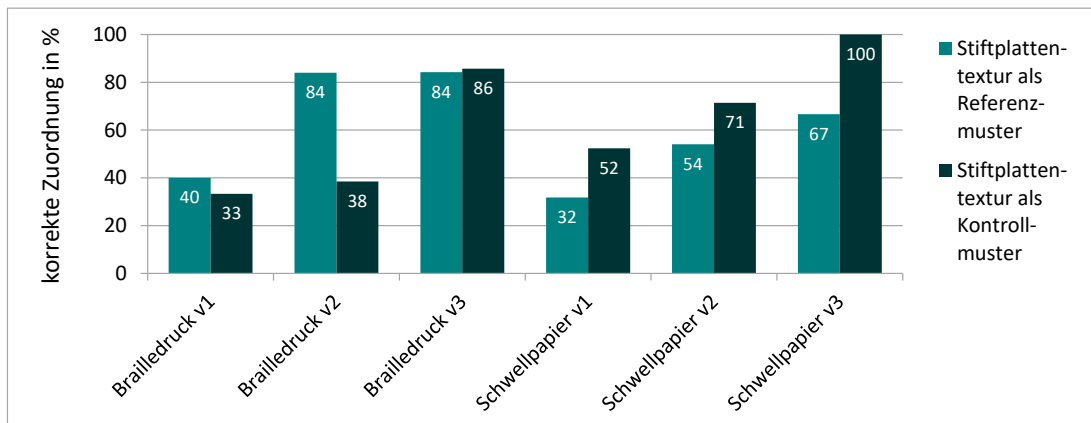


Abbildung 7.16: Prozentualer Anteil der korrekten Zuordnung zwischen Stiftplattentexturen und den Varianten auf Schwellpapier bzw. Brailleausdruck

Obwohl die Assoziationen der Probanden zu den einzelnen Mustern teilweise auf verschiedensten Gebrauchsgegenständen basierten (z. B. Gardine oder Zaun für Muster 3), waren die *Beschreibungen* der Texturen (Frage 2) häufig sehr ähnlich. Die vorgeschlagenen Beschreibungen können somit sehr gut als Alternativtexte bzw. als Titel für die Texturdefinitionen verwendet werden (vgl. Name der Textur in Anhang F).

Ähnlich wie die Assoziationen zu den Mustern selber waren auch die *Farbassoziationen* (Frage 3) der Benutzer sehr heterogen. Muster 35 wurde beispielsweise mit blau, rot, „dunkel“ und grau in Zusammenhang gebracht, während die fünf anderen Probanden keine Assoziation damit hatten. Aus diesem Grund scheint eine Empfehlung zur Verwendung konkreter Texturen als Ersatz für bestimmte Farben an dieser Stelle nicht möglich. Stattdessen sollte der Verwendungskontext bei der Wahl einer bestimmten Textur berücksichtigt werden.

Die subjektive *Bewertung der Muster* (Frage 4) ist in Abbildung 7.17 dargestellt. Alle taktilen Muster wurden im Durchschnitt mit mindestens 3,1 bewertet, sodass keines von den Probanden komplett abgelehnt wurde. Mit durchschnittlich 3,7 von 5 Punkten wurden die Muster auf dem Brailleausdruck am besten bewertet, gefolgt von den Varianten auf Schwellpapier (3,6) und den Stiftplattenmustern (3,5).

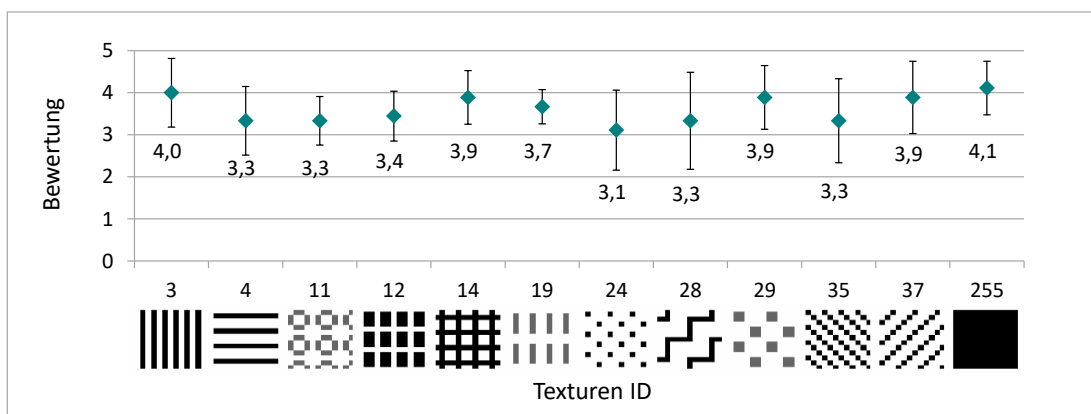


Abbildung 7.17: Subjektive Bewertung der taktilen Muster durch die Probanden (Skala: 0 = „ich mag es überhaupt nicht“ bis 5 = „mir gefällt es sehr gut“; Mittelwerte und Standardabweichungen; n = 9)

7.3.2.5 Bestimmung des finalen Füllmuster Sets

Um ein geeignetes Set an Mustern für die Stiftplatte zu bestimmen, wurden die verbliebenen 12 Texturen einem weiteren Kontrasttest unterzogen. Auf diese Weise soll die grundlegende

deutlich, dass blinde Benutzer leichte Modifikationen taktiler Muster akzeptieren. Um eine bessere Anpassung an die spezifischen Charakteristiken der Produktionsmedien zu erzielen, scheint ein komplett einheitliches Set ungeeignet. Um es dennoch möglichst einfach zu halten, sollten die 10 dpi Versionen bevorzugt werden, falls diese Variante für die höher auflösenden Medien geeignet ist. Ist dies nicht der Fall, so sollten zumindest Brailleausdruck und Schwellpapier die gleiche Version einer Textur erhalten. Eine Ausnahme stellt das Muster 255 (schwarze Füllung) dar. Dieses ist für die Ausgabe auf Schwellpapier weniger geeignet, da es zu taktil einheitlichen Oberflächen führt, was insbesondere auf großen Flächen nicht zielführend ist. Im Gegensatz dazu entspricht der taktile Eindruck solcher Muster bei matrixbasierten Produktionsmedien eher einzelnen dicht aneinander liegenden Punkten. Aus diesem Grund sollte für Schwellpapier die 10 dpi Version der schwarzen Füllung verwendet werden.

Das finale Texturenset ist in Anhang F zusammengefasst. Die Diskussion mit zwei blinden Benutzern, welche bereits in den Entwicklungsprozess der Texturen involviert waren, lässt auf eine äquivalente Nutzbarkeit und Unterscheidbarkeit der einzelnen Muster auf den untersuchten Medien schließen. Die hypothetischen Korrekturklassifikationsraten für das finale Texturenset finden sich in Abbildung 7.14. Zukünftige Untersuchungen sollten die tatsächlichen Zuordnungsfehler sowie die Eignung der einzelnen Texturen des Sets als Füllmuster für taktile Grafiken auf unterschiedlichen Produktionsmedien jedoch noch genauer überprüfen.

7.3.2.6 Anwendungsmöglichkeiten und Diskussion der taktilen Füllmuster

Anwendbar sind die Texturen insbesondere als Füllmuster für Objekte in taktilen Grafiken. Zur Verwendung der Muster als pattern Element innerhalb von SVG-Grafiken finden sich entsprechende Definitionen in Anhang F. Wichtig dabei ist, dass SVG-Objekte nicht transformiert werden sollten, da dies ebenfalls Einfluss auf das Füllmuster hat. Skalierte Texturen führen dazu, dass sie einerseits nicht mehr in die Interpolationsmatrix des Ausgabemediums passen würden, andererseits kein einheitliches Aussehen gewährleistet wäre.

Das Texturenset wurde speziell für die Verwendung im Tangram Arbeitsplatz (vgl. Abschnitt 7.3.1) entwickelt, um einerseits unerfahrene sehende Grafikersteller zu unterstützen, andererseits blinden Benutzern eine Vorauswahl an geeigneten Texturen auf der Stiftplatte zur Verfügung zu stellen. Die Definition der Muster als SVG pattern hat dabei den Vorteil, dass nicht nur die Dateien, sondern auch die Texturdefinitionen selber leicht ausgetauscht und an konkrete Bedürfnisse angepasst werden können. SVG-Dateien können zudem auf verschiedenen Medien ausgegeben werden, wobei mit Hilfe von Cascading Style Sheets (CSS) die Darstellung automatisch an das Zielmedium angepasst werden kann. Während für die Bildschirmausgabe die 10 dpi optimierte Texturvariante verwendet wird, um sie korrekt auf der Stiftplatte darzustellen, kann zum Ausdruck die zweite Variante geladen werden, welche für Schwellpapier und hochauflösende Brilledrucker besser geeignet ist (vgl. Abbildung 7.19).

Der vorgestellte Ansatz, ein geeignetes Set taktiler Texturen zu ermitteln, basiert auf einem Gerät mit niedriger Auflösung. Wenn ein solches Gerät nicht als Zielmedium betrachtet werden soll, so könnten die Untersuchungen in einem anderen Set resultieren. Besonders die Größen (Frequenzen) der gewählten Muster sind stark abhängig von der Auflösung des Mediums, was wiederum Einfluss auf die Größe der zu füllenden Objekte hat. Das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Texturenset wurde speziell für Ausgabemedien mit einer Auflösung von 10 oder mehr dpi entwickelt. Höhere Auflösungen lassen entsprechend höhere Frequenzen zu, wobei nach oben hin die menschlichen Wahrnehmungsfähigkeiten eine Grenze setzen. Der Nachteil der Stiftplatten-zentrierten Herangehensweise liegt darin, dass für die vergleichsweise niedrige Auflösung generell eher grobe Texturen in Frage kommen. Insbesondere die 10 dpi optimierten Muster des evaluierten Sets lassen somit kaum die Füllung von sehr kleinen Objekten zu. Um die Konsistenz bei den verschiedenen Medien zu wahren, enthält das Set auch für die hoch auflösenderen Verfahren keine zu feinen Strukturen, wie sie zur Füllung kleiner Objekte benötigt werden. Auf der anderen Seite sollte ohnehin eine Mindestgröße für Grafikelemente eingehalten werden, um die taktile Wahrnehmbarkeit zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang ist die Wahl geeigneter Füllmuster für bestimmte Objektgrößen ein interessanter Forschungsansatz, welcher zukünftig untersucht werden sollte.

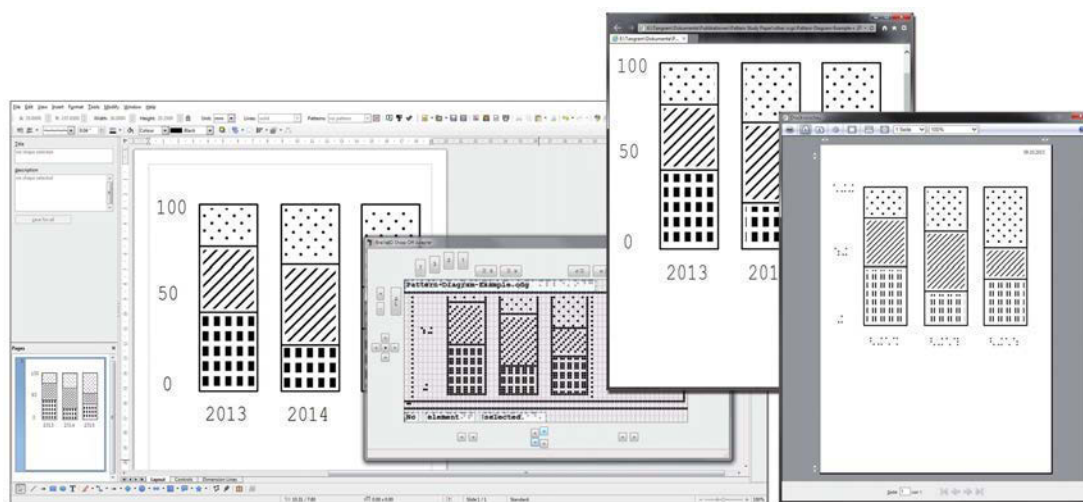


Abbildung 7.19: Verwendung der verschiedenen Texturversionen innerhalb des Tangram Arbeitsplatzes. Der Screenshot im Hintergrund zeigt die Zeichenanwendung LibreOffice Draw mit einem Beispieldiagramm, in dem einige Texturen als Farbersatz benutzt werden. Der darüber liegende Screenshot repräsentiert die Ausgabe der Grafik auf dem BrailleDis 7200. Die beiden Screenshots auf der rechten Seite zeigen die Bildschirmversion der exportierten SVG-Datei in einem Webbrowser (links) sowie die Druckvorschau zur Ausgabe auf einem hochauflösenden Brailledrucker (rechts).

7.3.3 Zusammenfassung

Zur Beantwortung der Frage, inwieweit die Originalansicht ein effektives Arbeiten mit taktilen Grafiken unterstützt (*Forschungsfrage 1e*), wurden zwei konkrete Fallbeispiele vorgestellt. Dabei konnte gezeigt werden, dass der auf dem taktilen Fenstersystem basierende Grafikeditor blinden Benutzern das Erkunden und Bearbeiten taktiler Grafikobjekte auf der Stiftplatte ermöglicht. Für einen effektiven Umgang mit grafischen Inhalten müssen darüber hinaus auch wichtige visuelle Darstellungseigenschaften, wie Farben, geeignet übermittle werden. Dazu wurden im zweiten Fallbeispiel taktile Füllmuster als geeignetes Äquivalent untersucht. Dabei konnten erfolgreich Texturen identifiziert werden, welche sich zur Darstellung auf der Stiftplatte eignen. Darüber hinaus ist das gewählte Texturenset auch für höher auflösende Medien, wie Schwellpapier oder Brailleausdrucke, auf konsistente Weise nutzbar. Die beiden Fallbeispiele konnten somit letztendlich zeigen, dass ein effektives Arbeiten mit taktilen Grafiken in der pixelbasierten Originalansicht möglich ist.

7.3.4 Empfehlungen zur Darstellung und Interaktion mit grafischen Inhalten auf der taktilen Stiftplatte

Um die Interaktion mit grafischen Inhalten auf der Stiftplatte zu unterstützen, sollten insbesondere die audio-taktilen Ausgabe- sowie die berührungsempfindlichen Eingabemöglichkeiten einbezogen werden. Das heißt, als grundlegende Funktionalität ist die direkte Selektion von einzelnen Grafikelementen mittels Fingerzeig anzubieten. Zudem empfiehlt sich auch die Bereitstellung einer deterministischen Möglichkeit der Objektauswahl (z. B. Durchtabben per Tastenkombi). Als zusätzliche Hilfe bei der Erkundung sollten textuelle Informationen, wie zum Beispiel Titel und Beschreibung, für jedes Objekt hinterlegt werden. Diese sollten ebenfalls möglichst einfach und direkt per Zeigegeste abrufbar sein. Neben der Ausgabe dieser Informationen über Sprache kann die Umsetzung einer zusätzlichen Brailleausgabe in Form des Detailbereichs die Steuerbarkeit durch den Benutzer ermöglichen.

Die Bearbeitung von Elementeigenschaften lässt sich auf Geräten mit schnellen Bildsetzraten ähnlich der direkten Manipulation in GUIs umsetzen. Um die Änderungen taktil nachvollziehbar

zu gestalten, empfiehlt sich eine schrittweise Modifikation der entsprechenden Eigenschaft. Dabei sollte jeder Schritt eine Änderung der Stiftplattenausgabe um mindestens eine Stiftbreite auslösen. Zusätzlich können Töne oder textuelle Rückmeldungen, im Idealfall per Sprachausgabe und in Braille, den Benutzer beim Editieren unterstützen.

Eine Anzeigefläche von 120 x 60 Punkten ist normalerweise nicht ausreichend für die Darstellung detaillierter Grafiken. Damit sowohl ein Überblick als auch Details erkundet werden können, sind Zooming- und Panningoperationen notwendig. Konkrete Empfehlungen zu deren Umsetzung werden in Abschnitt 7.4.5 diskutiert. Interpolationsprobleme bei der Darstellung können, bis zu einem gewissen Grad, durch die Bereitstellung manueller Einstellungsmöglichkeiten des Schwellwerts vermindert werden. Zudem empfiehlt sich auch eine Funktion zur Invertierung des Inhalts. Auf diese Weise lassen sich kleine Vertiefungen als erhabene Punkte darstellen, was deren Wahrnehmbarkeit erhöht.

Zur Kennzeichnung von Elementen können diese beispielsweise durch einen blinkenden Rahmen markiert werden. Dieser sollte eine relativ hohe Blinkrate aufweisen (mindestens 1,7 Hz), da einerseits das Blink-Geräusch beim Auffinden helfen kann, andererseits die Zeit zwischen Verschwinden und Erscheinen der blinkenden Stifte reduziert werden kann. Das Blinken des Rahmens kann zwar für kleine Elemente mit einer großen Boundingbox, wie beispielsweise diagonale Linien, dazu führen, dass der eigentliche Inhalt schwer auffindbar ist, allerdings würde eine blinkende Form die Wahrnehmung dieser erschweren¹⁸.

Prinzipiell sollten die in Abschnitt 2.2.2.3 vorgestellten Richtlinien beim Entwurf grafischer Darstellungen für die Stiftplatte beachtet werden. Aufgrund der geringen Auflösung von 10 dpi sind feine Abstufungen in der Linienbreite nicht unterscheidbar, sodass für die Ausgabe auf der Stiftplatte nur zwischen zwei Linienstärken (1 Stift vs. 2 Stifte) unterschieden werden kann. Die Erfahrung hat gezeigt, dass Linien ab 2,5 mm Breite bei den meisten Schwellwerten als 2 Stift breite Linie dargestellt werden. Als weiteres Unterscheidungsmerkmal können auch gestrichelte und gepunktete Linien verwendet werden, wobei diese 2 mm dick sein sollten.¹⁹ Für gestrichelte Linien empfiehlt sich dabei ein 10 – 5 – 10 Muster (10 mm Linie, 5 mm Lücke, 10 mm Linie usw.). Für gepunktete Linien hat sich die Verwendung von 5 Punkten auf 25 mm Länge als sinnvoll herausgestellt. Pfeile sind auf der Stiftplatte besonders gut erkennbar, wenn der Kopf einen Winkel von 45° besitzt und nicht ausgefüllt ist. Der Pfeilschaft sollte 2 mm dick sein, um auch bei niedrigeren Schwellwerten wahrnehmbar zu sein.

Große Flächen sollten mit einer Textur gefüllt werden, wobei ein kleiner Abstand von 1 bis 2 mm zwischen Textur und Kontur die Linienverfolgung erleichtern kann. Um die Unterscheidbarkeit der einzelnen Texturen zu gewährleisten, sollten bereits evaluierte Mustersets verwendet werden. Für die Stiftplatte sind die in Anhang F definierten Texturen empfehlenswert.

7.4 Orientierung in grafischen Oberflächen

Zweidimensionale Brailledisplays können blinden Benutzern deutlich mehr Informationen auf einmal zur Verfügung stellen als es bei herkömmlichen Braillezeilen der Fall ist. Gerade die räumliche Präsentation von Informationen kann einen großen Einfluss auf das mentale Modell eines Anwenders haben, welches er sich über eine grafische Benutzungsoberfläche bildet. Um die Bildung eines adäquaten mentalen Modells zu unterstützen und somit die Kommunikation mit sehenden Menschen zu erleichtern, ist es wichtig, geeignete Orientierungshilfen auf der Stiftplatte bereitzustellen.

Um die Komplexität der flächigen Ausgabe auf der taktilen Stiftplatte beherrschbar zu machen, nahmen Schiewe et al. [SKNW09], wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, eine Unterteilung der

¹⁸ Für die passive Formwahrnehmung ist die Blinkfrequenz auf der Stiftplatte zu gering.

¹⁹ Im Gegensatz zu 20 dpi Brailleausrucken und Schwellpapier sollten auf der Stiftplatte keine zwei verschieden breite Strich- oder Punktlinien verwendet werden.

Ausgabefläche in unterschiedliche Bereiche vor und entwickelten vier verschiedene taktile Ansichtsarten. Zur Unterstützung der Orientierung in diesen besonderen Informationsvisualisierungen wurden bereits in einer früheren Arbeit der Autorin weitere Hilfsmittel, wie taktile Scrollbalken sowie die Minimap, eingeführt (vgl. [Pre09] sowie Abschnitt 3.2.1).

Bezogen auf ein effizientes Orientieren auf der Stiftplatte sind mehrere der bereits formulierten Forschungsfragen relevant (vgl. Abschnitt 7.1). Insbesondere spielen die Möglichkeiten und Grenzen der vier Ansichtsarten (Forschungsfragen 1a und 1b) sowie der Interaktionstechniken, die das Erhalten eines Überblicks unterstützen, d. h. Minimap, Scrollbalken, Strukturleiste und Zoomfunktionalitäten (Forschungsfragen 3a bis c), eine Rolle. Des Weiteren sind in diesem Zusammenhang auch Strategien zur Erkundung und zur Eingabe (Forschungsfragen 2a bis d) sowie die Effizienz des Gesamtsystems im Vergleich zu herkömmlichen Hilfsmitteln (Forschungsfrage 3d) wichtig. Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden mehrere empirische Untersuchungen durchgeführt, die sich jeweils mit einigen Teilaspekten der Interaktion sowie dem Orientieren auf der Stiftplatte beschäftigen. Im Folgenden werden die Studien näher beschrieben.

7.4.1 Studie zu Orientierungshilfen auf flächigen Brailledisplays

Das Auffinden verschiedenartiger Interaktionsobjekte innerhalb einer grafischen Anwendung, im Folgenden als Widgets bezeichnet, stellt eine elementare Aufgabe beim Bedienen von GUIs dar. Ein derartiges Szenario ist somit gut geeignet, um einige Aspekte des taktilen Orientierens auf der Stiftplatte zu analysieren. Im Konkreten zielt die folgende Studie auf die Beantwortung der Forschungsfragen 1a und 1b (Notwendigkeit sowie Vor- und Nachteile der Ansichtsarten), 2c (angewandte Erkundungsstrategien) sowie 3a (Effizienz der Minimap) und 3b (Nutzen der Strukturleiste) ab. Demzufolge wird am Beispiel von Lokalisierungsaufgaben einerseits der Einfluss der taktilen Ansichten auf die benötigte Zeit sowie das mentale Modell des Benutzers untersucht, andererseits die Verwendung konkreter Hilfsmittel, welche die Stiftplatte zur Verfügung stellt, näher betrachtet. Die hier beschriebene Untersuchung wurde in ähnlicher Fassung in [PW16b] veröffentlicht.

7.4.1.1 Methodik

Probanden An der Studie nahmen elf blinde sowie zwei hochgradig sehbehinderte Menschen im Alter von 21 bis 51 Jahren (Durchschnittsalter: 32, sieben Frauen) teil. Alle Teilnehmer waren gute oder zumindest durchschnittliche Anwender der Brailleschrift und nutzten täglich einen Computer zum Arbeiten. Sechs Personen hatten noch keine Erfahrung mit der taktilen Stiftplatte, fünf hatten bereits an früheren Tests teilgenommen und somit ein wenig Erfahrung, zwei Teilnehmer waren erfahrene Anwender, da sie bereits seit zwei Jahren Umgang mit dem Gerät hatten.

Material und Versuchsaufbau Für den Test wurden vier vergleichbare GUI-Dialoge bestehend aus Überschriften, Textabsätzen, Formularelementen, Schaltern, Grafiken und anderen Standardbedienelementen vorbereitet (vgl. Abbildung 7.20). Für jeden Dialog wurden zudem vier Suchaufgaben definiert, wobei jeweils eines der folgenden Ziel-Widgets gefunden werden sollte:

- A. aktivierter Radiobutton
- B. Grafik, die zu einer bestimmten verbalen Beschreibung passt, z. B. „Modellflugzeug (dunkler Flieger auf hellem Hintergrund)“²⁰
- C. Baumeintrag mit einem bestimmten Namen
- D. Label der Gruppierungsbox, in welcher sich der „Abbrechen“-Schalter befindet

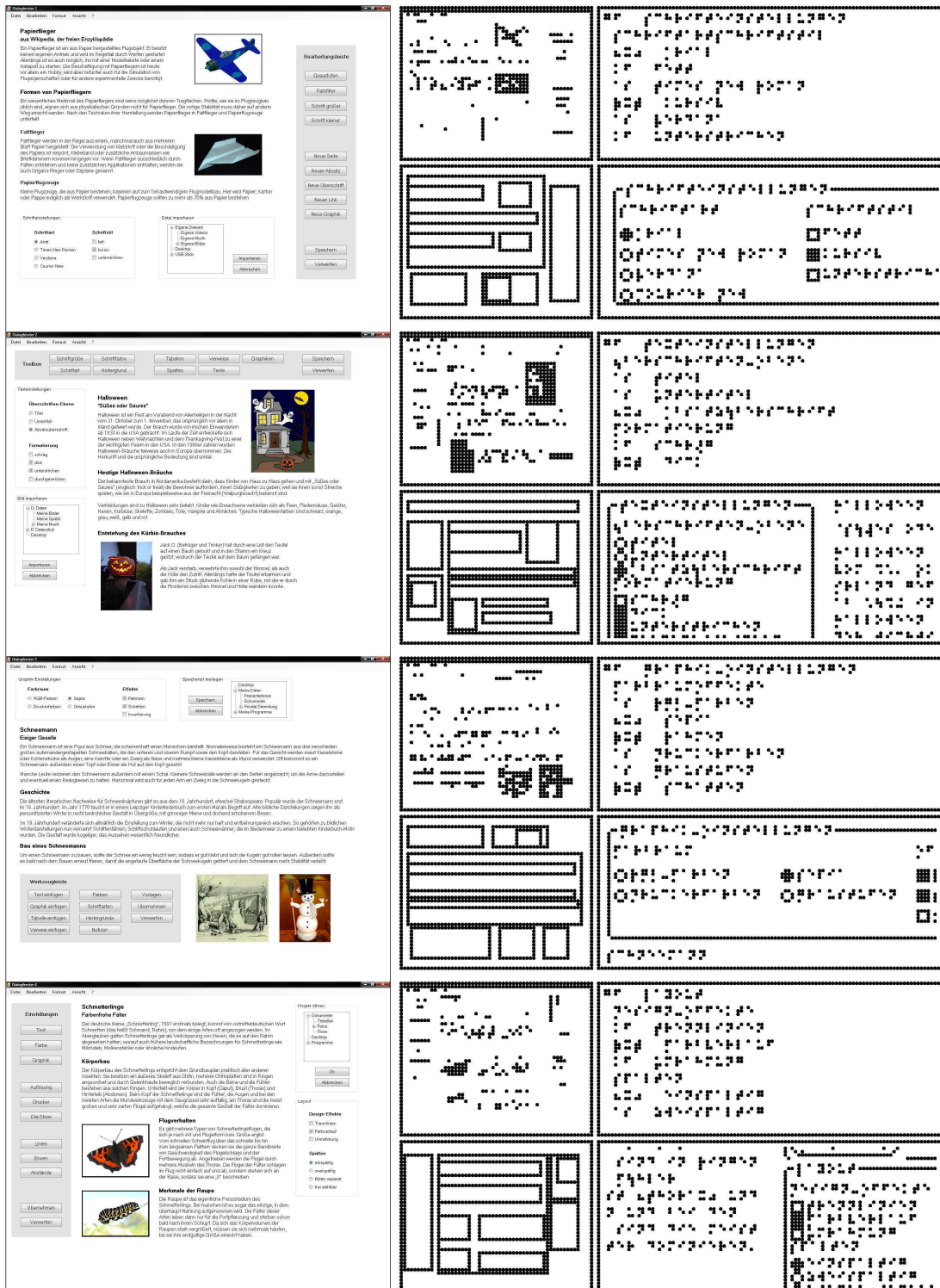


Abbildung 7.20: Original GUI-Dialoge (links) und deren Ausgabe auf der Stiftplatte nach der Filterung. Original- und Überblicksansicht sind in diesem Beispiel in der kleinsten Zoomstufe dargestellt, sodass sie einen Überblick über den ganzen Dialog geben (mittlere Spalte). In der Arbeits- und Symbolansicht (rechts) ist jeweils nur ein kleiner Teil der Dialoge sichtbar.

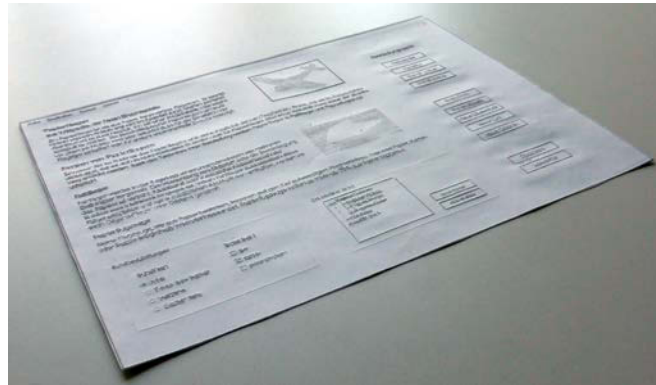


Abbildung 7.21: Taktile Ausdruck für einen der Dialoge aus Abbildung 7.20

Als Ein- und Ausgabegerät wurde das BrailleDis 7200 verwendet. Die Dialoge wurden dabei jeweils in einer der vier Ansichtsarten (Arbeitsansicht, Symbolansicht, Originalansicht und Überblicksansicht, vgl. auch Abschnitt 3.2.1.2) ausgegeben. Außerdem wurde von jedem Dialog ein taktile Ausdruck in der Größe 42,5 cm x 33,0 cm hergestellt (vgl. Abbildung 7.21). Als Drucker wurde hierfür ein Tiger Embosser verwendet. Dieser ermöglicht einen hochauflösenden (20 dpi) taktilen Grafikdruck, welcher weitestgehend vergleichbar mit der Originalansicht ist.

Insgesamt betrachtet der Versuchsaufbau drei unabhängige Variablen (vier Dialoge, vier Ansichtsarten und vier Widgets). Die Kombination dieser Variablen ergibt 64 verschiedene Versuchsbedingungen. Um Ermüdungseffekte bei den Probanden zu vermeiden, wurden die Bedingungen so verteilt, dass eine Sitzung aus acht verschiedenen Aufgaben besteht (vgl. Tabelle 7.5). Drei Probanden nahmen an zwei Sitzungen teil, die anderen an jeweils einer Sitzung. Die Reihenfolge der Versuchsbedingungen war insgesamt ausbalanciert. Jeder Teilnehmer einer Sitzung hatte dabei jeden Dialog in zwei verschiedenen Ansichtsarten und musste jedes Widget insgesamt zweimal finden.

Versuchsablauf Der Test war in die folgenden vier Phasen unterteilt: 1) Training, 2) Suchaufgabe (Widget auf der Stiftplatte finden), 3) Prüfung des mentalen Modells (Widget in globalen Kontext einordnen, taktile Ausdruck), und 4) Fragebogen.

In der Trainingsphase wurden zuerst die Eigenschaften der vier Ansichtsarten und der Bereiche auf der Stiftplatte sowie die Verwendung der erforderlichen Interaktionstechniken (insbesondere Zooming, Panning und Minimap) erläutert. Anschließend wurden alle für den Test relevanten GUI-Elemente und deren Aussehen in den verschiedenen Ansichtsarten vorgestellt. Als wichtige Hilfe für den anschließenden Test wurde vor allem auch die Strukturleiste im Detail erklärt. Das heißt, den Teilnehmern wurden die dort auftretenden Abkürzungen und deren Bedeutung beigebracht, zum Beispiel dass der Buchstabe „r“ auf einen Radiobutton in der entsprechenden Zeile auf der Stiftplatte hinweist. Als Vorbereitung auf Phase 3 des Tests wurde außerdem das Orientieren auf einem taktilen Ausdruck an einem Beispiel geübt.

Nach dem Training wurden iterativ die Phasen 2 und 3 wie folgt durchgeführt. Entsprechend dem in Tabelle 7.5 dargestellten Testplan wurden die GUI-Dialoge nacheinander und jeweils in einer der vier Ansichtsarten auf dem BrailleDis 7200 angezeigt. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, ein definiertes Widget (Suchaufgabe) innerhalb des aktuell angezeigten Dialogs im Darstellungsbereich der Stiftplatte möglichst schnell zu finden (Phase 2). Zur Erkundung durften insbesondere die verfügbaren Zooming- und Panningfunktionen sowie die Strukturleiste verwendet werden. Darüber hinaus konnten die Probanden mit Hilfe von Klickgesten die

²⁰ Die jeweilige Beschreibung wurde den Probanden zu Beginn der Suchaufgabe vorgelesen. In jedem Dialog befinden sich zwei Grafiken, beide ohne Alternativtext. Basierend auf der gegebenen Beschreibung sollten die Probanden versuchen, die richtige Grafik zu identifizieren.

Tabelle 7.5: Aufteilung der Versuchsbedingungen auf die Testsitzungen

Sitzung	Aufgabe							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	A1+a	B2+o	C3+ü	D4+s	A2-ü	B1-s	C4-a	D3-o
2	A3-s	B4-ü	C1-o	D2-a	A4+o	B3+a	C2+s	D1+ü
3	D3+ü	C4+s	B1+a	A2+o	D4-a	C3-o	B2-ü	A1-s
4	D1-o	C2-a	B3-s	A4-ü	D2+s	C1+ü	B4+o	A3+a
5	B2+s	A1+ü	D4+o	C3+a	B1-o	A2-a	D3-s	C4-ü
6	B4-a	A3-o	D2-ü	C1-s	B3+ü	A4+s	D1+a	C2+o
7	C4+o	D3+a	A2+s	B1+ü	C3-s	D4-ü	A1-o	B2-a
8	C2-ü	D1-s	A4-a	B3-o	C1+a	D2+o	A3+ü	B4+s
9	A2+ü	B1+s	C4+a	D3+o	A1-a	B2-o	C3-ü	D4-s
10	A4-o	B3-a	C2-s	D1-ü	A3+s	B4+ü	C1+o	D2+a
11	D4+a	C3+o	B2+ü	A1+s	D3-ü	C4-s	B1-a	A2-o
12	D2-s	C1-ü	B4-o	A3-a	D1+o	C2+a	B3+s	A4+ü
13	B1+o	A2+a	D3+s	C4+ü	B2-s	A1-ü	D4-o	C3-a
14	B3-ü	A4-s	D1-a	C2-o	B4+a	A3+o	D2+ü	C1+s
15	C3+s	D4+ü	A1+o	B2+a	C4-o	D3-a	A2-s	B1-ü
16	C1-a	D2-o	A3-ü	B4-s	C2+ü	D1+s	A4+a	B3+o

Suchaufgaben: A = Radiobutton, B = Grafik, C = Baumeintrag, D = Gruppierungslabel

GUI-Dialoge: 1 = Papierflieger, 2 = Halloween, 3 = Schneemann, 4 = Schmetterlinge

Hilfsmittel für Phase 3: + = mit Minimap, - = ohne Minimap

Ansichtsart: a = Arbeitsansicht, s = Symbolansicht, o = Originalansicht, ü = Überblicksansicht

einzelnen Elemente auch audio-taktil erkunden. Ein Wechsel der Ansichtsart war hingegen nicht erlaubt.

Wenn das Widget erfolgreich gefunden wurde, wurde den Probanden anschließend ein taktiler Ausdruck des aktuellen Dialogs vorgelegt (vgl. Abbildung 7.21). Die Aufgabe bestand nun darin, das Widget innerhalb des Gesamtdialogs zu lokalisieren (Phase 3). Hierfür sollten die Probanden mit ihrem Finger auf die obere linke Ecke des Widgets zeigen. Um den aktuell auf der Stiftplatte dargestellten Ausschnitt in Beziehung zum GUI-Fenster zu setzen, konnten die Probanden entweder nur die Scrollbalken oder zusätzlich dazu auch die Minimap nutzen. Um später Aussagen zur Minimap-Nutzung machen zu können, war es nur in der Hälfte der Testbedingungen erlaubt, die Minimap zu verwenden (vgl. Zellen mit „+“ in Tabelle 7.5).

Nach dem Test erhielten die Probanden noch einen Fragebogen (Phase 4). Hierbei sollte der Schwierigkeitsgrad der verschiedenen Versuchsbedingungen eingeschätzt sowie unterschiedliche Aspekte der Ansichten (Orientierung bewahren, Layout nachvollziehen, Inhalt nachvollziehen und Bedienelemente erkennen) bewertet werden. Außerdem sollten die Strukturleiste, die Scrollbalken und die Minimap in Bezug darauf bewertet werden, wie hilfreich sie zur Erkundung und Orientierung sind. Zusätzlich sollten die Probanden angeben, welche Strategien sie beim Suchen der Bedienelemente auf der Stiftplatte und beim Wiederfinden der aktuellen Position auf dem taktilen Ausdruck angewendet haben und ob sie sich während der Erkundung der Dialoge ein mentales Modell über dessen Layout erschaffen haben.

Bewertungskriterien Die Ansichtsarten wurden anhand des zeitlichen Aufwands zur Durchführung der Suchaufgaben in Phase 2 sowie der subjektiven Bewertungen der Probanden (Phase 4) bewertet. Für die beiden zoombaren Ansichten (Original- und Überblicksansicht) wurden zudem die Zoomlevel notiert, in welchen die Widgets gefunden wurden. Die Auswertung des mentalen Modells basiert auf den Ergebnissen aus Phase 3. Hierfür wurden neben den erforderlichen Zeiten auch die Distanzen (Offset) zwischen dem gewählten Punkt auf dem taktilen Ausdruck (Fingerzeig) und der korrekten Position des Widgets gemessen. Die Auswertung der Suchstrategien in Phase 2 basiert auf zusätzlichen Videoaufnahmen der Testsitzungen.

7.4.1.2 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchung dargestellt und diskutiert.

Bewertung der Effektivität und Effizienz der Ansichtsarten Die Ergebnisse der Suchaufgabe (Lokalisierung der verschiedenen Widgets auf der Stiftplatte) sind in Tabelle 7.6 präsentiert. Zwei Versuchsbedingungen eines Probanden (beide in der Originalansicht) sind nicht in der statistischen Auswertung enthalten, da diese beiden Aufgaben nach einer erfolglosen Suche (über 13 Minuten) abgebrochen wurden.

Alle Widgets wurden am schnellsten in der Arbeitsansicht gefunden. In Kombination mit der Strukturleiste ist diese einfache und textbasierte Ansicht also am besten geeignet, um GUI- oder Textelemente zu finden. Grafiken konnten allerdings nur in der Originalansicht unterschieden werden, da es keinen alternativen Text dazu gab. Zudem konnte das Layout eines Dialogs ebenfalls nicht in der Arbeitsansicht erkundet werden. Phase 3 des Versuchs (Widget in globalen Kontext einordnen) konnte somit in dieser Ansichtsart nie erfolgreich abgeschlossen werden.

Tabelle 7.6: Benötigte Zeiten der 13 Probanden zum Suchen der Widgets auf der Stiftplatte unter verschiedenen Bedingungen sowie Zoomstufen, in welchen die Widgets gefunden wurden (bei einer Zoomstufe von 100 % entspricht ein Pixel auf dem Bildschirm einem Pin auf der Stiftplatte)

Aufgabe/Bedingung	benötigte Zeit (in Sekunden)		Zoomstufe (in %)	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
Durchschnitt aller Aufgaben	268,4	211,2	27,2	12,4
Arbeitsansicht	117,1	72,5	-	-
Symbolansicht	238,2	153,4	-	-
Originalansicht	323,3	213,9	32,1	11,3
Überblicksansicht	378,3	256,1	22,6	11,7
Radiobutton	226,7	167,1	29,1	8,9
Grafik	207,4	132,5	19,5	11,2
Baueintrag	214,3	155,8	32,1	9,7
Gruppierungsboxlabel	408,6	286,3	28,6	15,9
mit Minimap	257,8	229,1	27,0	10,1
ohne Minimap	270,7	193,2	27,3	14,5

Insgesamt zeigte sich ein signifikanter Effekt der Ansichtsart auf die benötigte Suchzeit ($F_{3,56} = 11,887; p < 0,001$). Abhängige t-Tests²¹ zeigen allerdings keinen signifikanten Unterschied zwischen Original- und Überblicksansicht ($t = -0,606; df = 14; p > 0,5$). In Hinblick auf den Zoomlevel, in welchem die Probanden die Suchaufgaben abschließen konnten, zeigt sich wiederum ein signifikanter Unterschied bei diesen beiden Ansichtsarten ($t = 2,728; df = 14; p < 0,05$). Ein Zoomlevel um die 30 % erscheint für Aufgaben in der Originalansicht am effizientesten. Die Probanden waren damit durchschnittlich 2,5 mal schneller als in anderen Zoomleveln. Für die Überblicksansicht konnte kein solcher optimaler Zoomlevel identifiziert werden, da in dieser Ansichtsart die Größe des gesuchten Widgets einen großen Einfluss auf die taktile Ausgabe hat. Dies kann damit erklärt werden, dass kleine Widgets in niedrigen Zoomstufen nicht sichtbar sind. Wie auch beim semantischen Zoom üblich, werden Details in der Überblicksansicht erst in höheren Skalierungen sichtbar.

Subjektive Bewertung der Ansichtsarten Basierend auf den abgegebenen Bewertungen bzgl. der Schwierigkeit für die einzelnen Kombinationen aus Widgettyp und Ansichtsart ergab sich Folgendes: Das Suchen in der Arbeitsansicht wurde für alle Widgettypen mit Ausnahme der Grafik als am einfachsten angesehen. Für die Grafik wurde, wie zu erwarten, die Originalansicht am besten bewertet. Im Durchschnitt wurden die Aufgaben in der Arbeitsansicht als am einfachsten empfunden (4,2 von 5)²². Aufgaben in der Original- und Symbolansicht wurden als mittelschwer bewertet (3,2 von 5) und Aufgaben in der Überblicksansicht als am schwersten (2,7 von 5). Die subjektiven Bewertungen der Probanden bestätigen somit auch die Resultate zu den benötigten Zeiten in Tabelle 7.6.

Die durchschnittliche Bewertung weiterer Aspekte der Ansichtsarten sind in Abbildung 7.22 dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass die Orientierung am besten in Ansichtsarten mit Brailleausgabe (Arbeits- und Symbolansicht) erhalten werden kann, da hier der Inhalt deutlich leichter verstanden wird als in Ansichtsarten ohne Braille (Original- und Überblicksansicht). Die Unterscheidbarkeit von GUI-Elementen wird ebenfalls durch Braille unterstützt. Andererseits ist es schwer, das Layout in der Arbeitsansicht nachzuvollziehen, da die tatsächliche räumliche Anordnung und die Beziehungen zwischen den GUI-Elementen nicht identifizierbar ist. Insgesamt wurde die Symbolansicht aufgrund ihrer Brailleunterstützung und der Layouterhaltung in Bezug auf die vier analysierten Aspekte am besten bewertet.

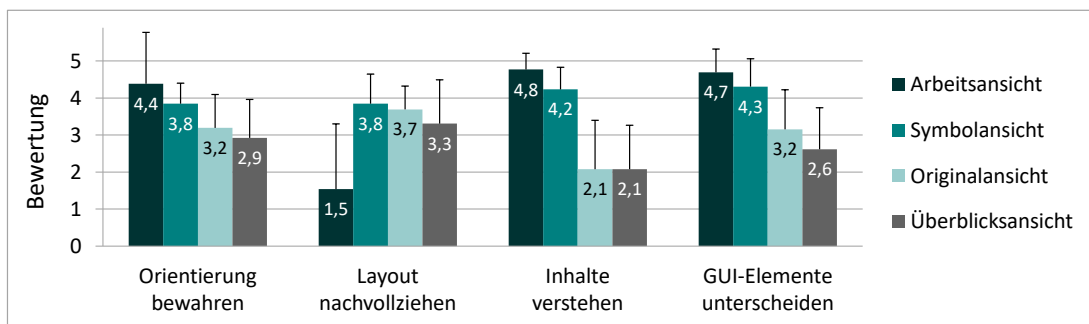


Abbildung 7.22: Bewertung der vier Ansichtsarten (Skala: 0 = nicht möglich, 1 = sehr schlecht bis 5 = sehr gut; Mittelwerte und Standardabweichungen; $n = 13$)

Strategien und mentale Modelle der Probanden Wie in der Trainingsphase vorgestellt, nutzten alle Probanden zuerst die Strukturleiste, um zu entscheiden, ob die Erkundung des aktuellen Ausschnitts auf der Stiftplatte überhaupt notwendig ist. Um den gesamten Dialog abzudecken,

²¹ In den t-Tests wurden nur die Sitzungen berücksichtigt, in denen die Probanden alle acht Versuchsbedingungen erfolgreich abgeschlossen haben. Die Datensätze jeder dieser 15 Einzelsitzungen wurden für jede Ansichtsart gemittelt und jeweils einem Paarvergleich unterzogen.

²² Die Bewertungsskala war wie folgt definiert: 1 = sehr schwierig bis 5 = sehr leicht.

Tabelle 7.7: Suchstrategien der Probanden in den verschiedenen Ansichtsarten

Proband	Symbolansicht	Originalansicht	Überblicksansicht
P1	V	V	Z + V
P2	Mix aus V + H	Z + V bzw. H	Z + V bzw. H
P3	anfangs S + T, später V	anfangs S + T, später V	anfangs S + T, später V
P4	V	Z + V + M	kaum Erkundung nötig
P5	V	Z + U	Mix aus V + T
P6	S	Z + U	Z + U
P7	V	Z + U	Mix aus Klick + V
P8	V	Z + V	V
P9	V	V	V
P10	M bzw. S	M	Z + M
P11	V	V	Z + V
P12	H	Z + H	H
P13	Mix aus H + V	Z + U	Z + V

V = vertikal, H = horizontal, S = spiralförmig, T = treppenförmig, U = unstrukturiert, M = Minimap, Z = Mix aus Zoomen, Klicken (Audioausgabe) und anderer Strategie

nutzten die meisten Teilnehmer (10 von 13) die angebotenen Panningfunktionalitäten in einer mehr oder weniger strukturierten Art und Weise (vgl. Tabelle 7.7)²³. Insgesamt hat sich dabei gezeigt, dass Zoomen ein systematisches Erkunden etwas erschwert, da nach jeder Zoomoperation ein erneutes Orientieren und damit auch ein erneutes Bewerten der eigenen Suchstrategie notwendig ist. Im Gegensatz zum Erkunden in der Symbolansicht ist ein lineares Vorgehen in der Original- und Überblicksansicht nur schwer möglich.

Unabhängig von der Ansichtsart wurden häufiger vertikale Panningstrategien²⁴ angewendet als horizontale. Vermutlich ist dies darauf zurückzuführen, dass die Arbeit mit herkömmlichen Screenreadern und Braillezeilen ebenfalls vor allem auf einer vertikalen zeilenweisen Erkundung der Inhalte basiert. Beim Vergleich der durchschnittlichen Zeiten zeigt sich zwischen horizontalen (290 s) und vertikalen Strategien (282 s) kein nennenswerter Unterschied. Deutlich wird allerdings, dass ein unstrukturiertes Vorgehen beim Panning mit durchschnittlich 550 Sekunden deutlich mehr Zeit zum Auffinden von GUI-Elementen in Anspruch nahm.

Zur Orientierung während der Erkundung wurden sowohl die Minimap als auch die Scrollbalken verwendet. Zwei der Probanden gaben an, dass sie sich ihre Erfahrung mit GUI-Dialogen zu Nutze gemacht haben, um die Widgets schneller zu finden. Die Messungen unterstützen diese Aussagen jedoch nicht. Acht Teilnehmer gaben an, dass sie sich während der Erkundung auf der Stiftplatte ein mentales Modell über das Layout des Dialogs aufgebaut haben²⁵. Interessant daran ist, dass die Probanden ohne mentales Modell eher vertikale Strategien angewendet haben, wohingegen die Personen mit mentalem Modell teilweise unstrukturierter in ihrer Suche

²³ Da die Arbeitsansicht eine linearisierte Ausgabe der Inhalte bereitstellt, war dort kein horizontales Scrollen möglich. Eine genaue Betrachtung der Suchstrategien ist für diese Ansichtsart somit nicht notwendig.

²⁴ Unter einer vertikalen Strategie wird dabei das zeilenweise Lesen des aktuellen Ausschnitts mit anschließendem vertikalen Scrollen verstanden. Im Gegensatz dazu erfolgt das Scrollen bei einer horizontalen Strategie nach rechts bzw. links, sobald der Darstellungsbereich erkundet wurde.

²⁵ Probanden mit mentalem Modell: P1, P2, P5, P6, P10, P11, P12, P13

waren. Ein t-Test zeigt, dass diese Probanden²⁶ keinen signifikant kleineren Offset in Phase 3 hatten ($t = -0,702$; $df = 48$; $p = 0,49$), aber dass sie signifikant schneller beim Lokalisieren der Widgets auf dem taktilen Ausdruck waren als die Personen ohne mentales Modell²⁷ ($t = -2,864$; $df = 42$; $p < 0,01$).

Bewertung der Lokalisierungsaufgabe sowie der Hilfsmittel Tabelle 7.8 zeigt die Resultate der Lokalisierungsaufgabe auf dem taktilen Ausdruck (Phase 3)²⁸. In der Hälfte der Fälle (51,3 %) gab es keinen Offset. Dies lässt vermuten, dass die Probanden ein korrektes mentales Modell über die Position des Widgets innerhalb des Dialogs aufbauen konnten. Weder in der benötigten Zeit ($t = 1,869$; $df = 13$; $p = 0,08$) noch beim Offset ($t = -0,151$; $df = 13$; $p = 0,88$) konnten signifikante Unterschiede zwischen der Nutzung und der Nichtnutzung der Minimap gefunden werden²⁹. Dennoch wurde die Minimap als sehr hilfreich empfunden (durchschnittliche Bewertung: 2,8 von 3)³⁰. Dies gilt ebenso für die Strukturleiste (2,9 von 3) sowie die Scrollbalken (2,9 von 3).

Tabelle 7.8: Benötigte Zeiten und Offsets der 13 Probanden beim Lokalisieren der Position eines Widgets auf dem taktilen Ausdruck unter verschiedenen Bedingungen

Aufgabe/Bedingung	benötigte Zeit (in Sekunden)		Offset (in Millimeter)	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
Symbolansicht	53,2	43,5	28,2	43,9
Originalansicht	48,0	30,9	30,6	63,8
Überblicksansicht	49,8	36,1	35,2	56,5
Radiobutton	51,2	30,1	41,5	73,3
Grafik	26,7	26,7	15,9	42,0
Baueintrag	61,8	48,5	24,1	38,6
Gruppierungsboxlabel	44,2	25,7	32,8	53,3
mit Minimap	64,9	31,2	27,9	41,5
ohne Minimap	42,8	36,7	33,0	61,5

7.4.1.3 Zusammenfassung

Bezogen auf die untersuchten Forschungsfragen lassen sich die folgenden Erkenntnisse zusammenfassen.

- *Forschungsfragen 1a und 1b:* Die Studie hat gezeigt, dass verschiedene Ansichtsarten unterschiedliche Aufgaben auf der Stiftplatte unterstützen können. Jede Ansichtsart hat

²⁶ Probanden mit mentalem Modell: Durchschnittszeit = 40,4 s und Durchschnittsoffset = 27,5 mm; jeweils 48 berücksichtigte Messwerte

²⁷ Probanden ohne mentales Modell: Durchschnittszeit = 65,9 s und Durchschnittsoffset = 37,3 mm; jeweils 30 berücksichtigte Messwerte

²⁸ Für die Grafik konnten die Probanden diese Aufgabe nur in der Originalansicht durchführen.

²⁹ In zwei der insgesamt 16 Sitzungen wurde die Minimap vom Probanden nicht verwendet, sodass beim gepaarten t-Test lediglich 14 Datensätze berücksichtigt wurden.

³⁰ Die Bewertungsskala war wie folgt definiert: 0 = nicht hilfreich, 1 = wenig hilfreich, 2 = hilfreich, 3 = sehr hilfreich.

dabei ihre eigenen Vor- und Nachteile. Ansichtsarten, in denen textuelle Inhalte in Form von Brailleschrift dargestellt werden, können das Verständnis und die Unterscheidung von GUI-Elementen erleichtern. Andere Aufgaben, die beispielsweise das Erfassen des Layouts oder grafischer Inhalte erfordern, können wiederum nicht in linearisierten textbasierten Ansichtsarten, wie der Arbeitsansicht, ausgeführt werden. Somit wird deutlich, dass verschiedenartige Präsentationstechniken die Interaktion auf flächigen Brailledisplays unterstützen können. Die Ansichtsart sowie der gewählte Zoomfaktor haben ebenso wie auch die Scrollposition Einfluss auf die benötigte Zeit und die Genauigkeit beim Finden von Widgets auf der Stiftplatte.

- *Forschungsfragen 2c und 3b:* Die im Training vorgestellten Erkundungsstrategien wurden sehr gut von den Probanden angenommen. Insbesondere die Strukturleiste war sehr hilfreich für die Benutzer, um zu bestimmen, ob Zooming oder Panning notwendig ist oder sich das gesuchte Element bereits im sichtbaren Bereich auf der Stiftplatte befindet. Die Panningfunktionen wurden von der Mehrheit der Probanden mehr oder weniger strukturiert verwendet, um die Dialoge zu erkunden. Das Finden einer passenden Zoomstufe unterbricht dabei den Suchvorgang, sodass die angewendeten Erkundungsstrategien in Original- und Überblicksansicht im Allgemeinen unstrukturierter waren. Insgesamt wurden von den Teilnehmern vertikale Panningstrategien häufiger angewendet als horizontale.
- *Forschungsfrage 3a:* Obwohl es keinen messbaren Vorteil der Minimap gegenüber der ausschließlichen Nutzung der Scrollbalken gab, wurde die Minimap als sehr hilfreich eingeschätzt. Es ist jedoch zu vermuten, dass die Verwendung einer flächigen Orientierungshilfe mehr Training bei den Benutzern bedarf, um daraus einen größeren Vorteil zu ziehen.

Insgesamt hat die Studie gezeigt, dass es für ein effizientes Arbeiten auf der Stiftplatte wichtig ist, nicht nur adäquate Hilfsmittel zur Verfügung zu stellen, sondern die Benutzer auch im Umgang mit diesen sowie in Techniken zur räumlichen Erkundung und zur Orientierung ausreichend zu schulen.

7.4.2 Vergleich verschiedener Eingabemethoden

Wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, bietet der HyperReader dem Benutzer unterschiedliche Möglichkeiten zur Eingabe an. Um die angewandten Interaktionsstrategien auf der Stiftplatte bei den verschiedenen Eingabemethoden zu analysieren, wurde eine weitere Studie mit blinden Anwendern durchgeführt. Als Beispielszenario wurde das Ausfüllen eines elektronischen PDF Fragebogens verwendet. Die Herausforderung für derartige Dokumente besteht darin, dass die Zugänglichkeit von PDF Dokumenten häufig eingeschränkt ist. Dies liegt zum Einen an den fehlenden Kenntnissen der Autoren, zum Anderen am hohen Aufwand für die Erzeugung barrierefreier PDF Dokumente. Fragebögen bzw. Formulare an sich erfordern vom Benutzer zudem die korrekte Zuordnung von Beschriftung und Formularelement. In diesem Kontext sind somit die Forschungsfragen 1f (Unterstützung der Zuordnung zusammengehöriger Objekte durch räumliche Anordnung) sowie 2a (Einfluss der Eingabemethode auf Effektivität und Effizienz), 2b (Lesestrategien beim Verwenden verschiedener Eingabemethoden) und 2d (Effizienz der zweihändigen Interaktion) zu klären.³¹

7.4.2.1 Methodik

Nachfolgend wird die Methodik der Studie zum Vergleich verschiedener Eingabemodalitäten beschrieben, wobei insbesondere die genannten Forschungsfragen geklärt werden sollen.

³¹ Eine Veröffentlichung der nachfolgenden Studie befindet sich in Vorbereitung (siehe [PBKW16]).

Tabelle 7.9: Zuordnung der Eingabemethoden zu den Probanden

Probanden	Seite 1	Seite 2	Seite 3
P1 + P10	Gesten	HW-Tasten	Tastatur
P6 + P9	Gesten	Tastatur	HW-Tasten
P11 + P12	HW-Tasten	Gesten	Tastatur
P3 + P7	HW-Tasten	Tastatur	Gesten
P2 + P4	Tastatur	Gesten	HW-Tasten
P5 + P8	Tastatur	HW-Tasten	Gesten

Probanden Die Studie wurde mit zwölf blinden Probanden im Alter zwischen 21 und 58 Jahren (Durchschnittsalter: 34, vier Frauen) durchgeführt. Vier der Teilnehmer hatten bisher nur einmal auf der Stiftplatte gearbeitet, die anderen Benutzer hatten bereits an mindestens zwei Benutzerstudien teilgenommen und hatten somit etwas Erfahrung mit der Stiftplatte. Alle außer einem Teilnehmer hatten schon HTML Formulare ausgefüllt. Acht Probanden hatten sogar sehr viel Erfahrung damit. Mit PDF Formularen hatten bisher nur fünf Benutzer Erfahrung.

Aufgabe und Material Die Aufgabe bestand darin, einen in der Symbolansicht des HyperReaders dargestellten PDF Fragebogen auf dem BrailleDis 7200 auszufüllen. Der Fragebogen besteht aus drei Seiten mit jeweils vier Fragen, die den folgenden Typen entsprechen:

1. Mehrfachauswahl (Multiple Choice, Checkboxes)
2. Einfachauswahl (Single Choice, Radiobuttons)
3. Likert-Skala (Radiobutton Gruppe in Tabellenlayout)
4. offene Frage (Eingabefeld)

Insbesondere die Likert-Skala kann für blinde Benutzer eine große Herausforderung darstellen, da jedem Radiobutton zwei Beschriftungen (Zeilen- und Spaltenüberschrift) zugeordnet werden müssen (vgl. auch Abbildung 7.23). Wenn keine entsprechende Beziehung zwischen den Elementen ausgezeichnet wurde, wie es die WCAG 2.0 fordert, dann können herkömmliche Screenreader dem Benutzer nicht ausreichend Informationen liefern. Entsprechend Forschungsfrage 1f ist zu klären, ob unabhängig davon eine Zuordnung auf der Stiftplatte möglich ist.

Die Reihenfolge der unterschiedlichen Fragetypen ist auf jeder Seite des Fragebogens verschieden. Für jede Seite wurde den Probanden eine andere Eingabemethode, d. h. Gesteneingabe, Hardwaretasten des BrailleDis 7200 (abgekürzt als HW-Tasten) und PC Tastatur, vorgeschrieben. Die entsprechenden Zuordnungen innerhalb des within-group Designs sind in Tabelle 7.9 dargestellt.

Versuchsablauf und Messwerte Zu Beginn der Untersuchung wurde eine Übungsphase durchgeführt. Dabei wurden die auftretenden Bedienelemente in der Symbolansicht im Detail erläutert sowie die benötigten Gesteneingaben und Tastenkommandos vorgestellt. Danach sollten die Probanden den, in Abbildung 7.23 dargestellten, Beispielfragebogen mit Hilfe der verschiedenen Eingabemethoden ausfüllen, um ein wenig Übung im Umgang damit zu bekommen.

Während der folgenden Testphase mussten die Probanden jeweils eine Seite des Fragebogens unter ausschließlicher Verwendung der zugewiesenen Eingabemethode ausfüllen. Der

Beispielfragebogen

1. Was machen Sie gerne? (mehrere Antworten möglich)

Bücher lesen Musik hören
 Sport kochen

2. Mögen Sie Eiscreme?

ja
 nein
 ich weiß nicht

3. Wie gern essen Sie die folgenden Snacks?

	sehr gern	gern	geht so	ungern	garnicht	ich weiß nicht
Schokolade	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Erdnüsse	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bonbons	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

4. Was ist Ihr Lieblingsgericht?

Spaghetti mit Tomatensoße

Abbildung 7.23: Beispielfragebogen mit vier verschiedenen Fragetypen (oben) und die entsprechende taktile Darstellung (Symbolansicht, unten). Der eingerahmte Ausschnitt des Fragebogens ist gerade auf der Stiftplatte sichtbar.

Ablauf erfolgte dabei gemäß den Zuordnungen in Tabelle 7.9. Um sicherzustellen, dass die Probanden den Fragebogen korrekt ausfüllen, sollten sie ihre beabsichtigten Antworten dem Testleiter jeweils mündlich mitteilen. Hieraus wurde für jede Eingabemethode die entsprechende Fehlerrate berechnet. Zusätzlich wurden die Daten der Berührungssensoren (Tastwerte) und Eingabekommandos in einer Logdatei gespeichert. Jede Sitzung wurde per Video aufgenommen, um weitere Auswertungen zu ermöglichen – beispielsweise die Analyse von Handbewegungen auf der Stiftplatte oder von aufgetretenen Problemen.

7.4.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Basierend auf den protokollierten Messwerten und Beobachtungen während der Testsitzungen werden im Folgenden die Resultate vorgestellt.

Analyse der Zeiten In Abbildung 7.24 sind die benötigten Zeiten der Probanden bei den drei Eingabemethoden dargestellt. Abhängige t-Tests zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen Gesteneingabe und HW-Tasten ($t = 1,222; df = 11; p = 0,25$). Die Verwendung der Tastatur zur Eingabe war hingegen signifikant langsamer als die Gesteneingabe ($t = -2,382; df = 11; p < 0,05$) sowie die Interaktion mit den HW-Tasten ($t = -3,403; df = 11; p < 0,01$). Bei allen Eingabemethoden benötigten die drei Benutzer mit der meisten Erfahrung auf der Stiftplatte deutlich weniger Zeit als die anderen Probanden³². Bei den anderen Teilnehmern zeigt sich jedoch kein Einfluss des Erfahrungsgrades auf die benötigte Zeit.

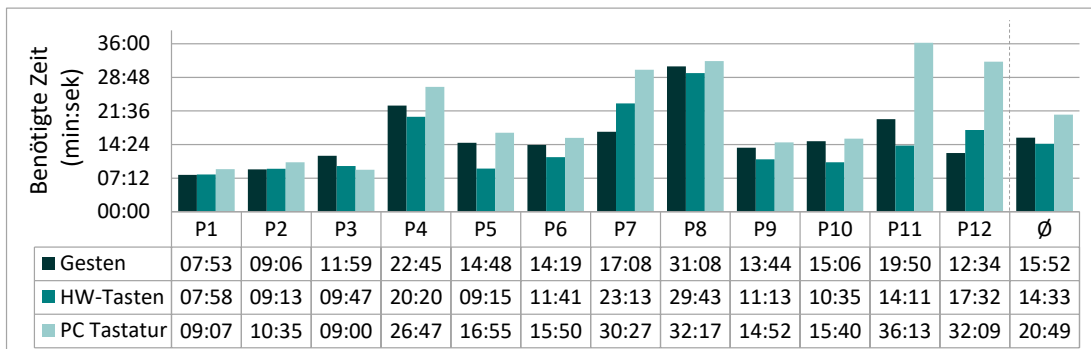


Abbildung 7.24: Benötigte Zeiten der Probanden bei Verwendung der verschiedenen Eingabemethoden (P1 – P3 haben sehr viel Erfahrung mit der Stiftplatte, P4 – P8 haben durchschnittliche Erfahrung und P9 – P12 haben nur wenig Erfahrung)

Analyse der Fehler Insgesamt konnten die Probanden maximal 12 Fehler auf jeder Seite des Fragebogens machen (ein Eingabefeld, eine einfache Radiobutton Gruppe, vier Radiobutton Gruppen in der Likert-Skala und sechs Checkboxes). Während der Interaktion mit den HW-Tasten wurden deutlich weniger Fehler gemacht als bei den anderen Eingabemethoden (vgl. Abbildung 7.25).

Die meisten Fehler bei der Gesteneingabe basierten auf unbeabsichtigtem Überspringen von Teilen des Inhalts nach dem Ausführen einer Panninggeste (18 von 23). Meistens wurde dabei nicht nur ein einzelnes Element, sondern eine ganze Spalte von Elementen übersprungen (häufig Checkboxes). Dies führt automatisch zu einer großen Anzahl an falschen Eingaben (Probanden 2, 5, 7, 10 und 12). Zweimal wurde ein Radiobutton in der Likert-Skala in einer falschen Zeile gesetzt, sodass die vorher korrekt getätigte Eingabe überschrieben wurde. Bei Verwendung der Tastatur traten die meisten Fehler in der Likert-Skala auf (10 von 14). Auch bei dieser Eingabemethode basierten drei Fehler auf fehlenden Antworten. In der HW-Tasten Bedingung

³² einzige Ausnahme: Proband 5 bei den HW-Tasten

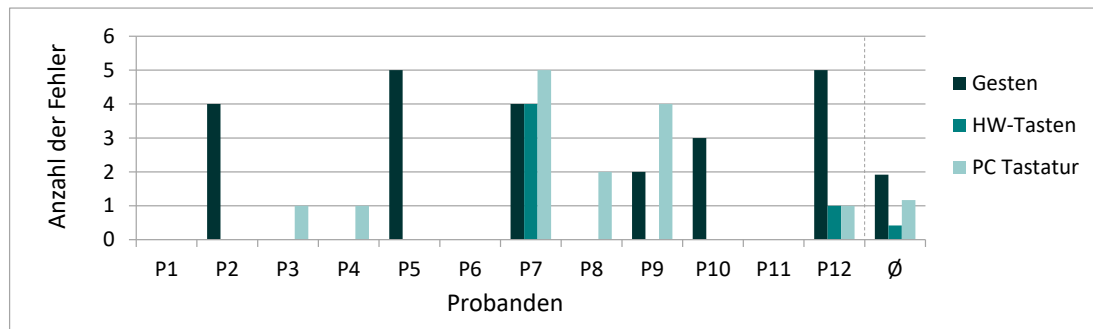


Abbildung 7.25: Anzahl der Fehler beim Ausfüllen des Fragebogens bei Verwendung der verschiedenen Eingabemethoden

wurden vier der Fehler durch eine fehlerhafte Bedienung ausgelöst, d. h. Proband 7 ist nicht durch die Likert-Skala getabbt, sondern blieb die gesamte Zeit in der ersten Radiobutton Gruppe und hat somit nur dort seine Auswahl verschoben.

Fehler bei der Zuordnung von Beschriftung und Formularelement traten bei lediglich drei Probanden auf. Diese Fehler basierten dabei immer darauf, dass der Benutzer in der Zeile oder Spalte innerhalb der Likert-Skala verrutscht ist. Dies wiederum kann, wie oben erwähnt, zu weiteren Eingabefehlern führen, indem zum Beispiel die vorherige Eingabe überschrieben wird. Diese Art von Fehler passierte bei allen Eingabearten ein oder zwei Mal, sodass die Eingabemethode darauf anscheinend keinen Einfluss hat. Dies erscheint auch dahingegen sinnvoll, als dass die Zuordnung von Beschriftung und Formularelement eher von der Darstellung des Inhalts auf der Stiftplatte abhängig ist. Um eine Antwort auf Forschungsfrage 1f zu finden, ist der direkte Vergleich mit einem herkömmlichen Screenreader nötig (siehe Abschnitt 7.4.3).

Analyse der Handbewegungen und Lesestrategien Für die Analyse der Handbewegungen während der drei Eingabebedingungen wurden folgende Aspekte basierend auf der Videoauswertung untersucht:

1. Dauer zwischen der letzten Berührung der aktiven Hand auf der taktilen Anzeigefläche und der Eingabe (Homingzeit für die Eingabe)
2. Dauer zwischen der Eingabe und der ersten Berührung der aktiven Hand auf der Anzeigefläche (Homingzeit zum Zurückkehren)
3. Abstand zwischen aktiver Hand und Zielobjekt auf der Stiftplatte nach dem Zurückkehren von einer Eingabe
4. angewendete Lesestrategien

Unter dem „Zielobjekt“ wird das Element verstanden, was vor dem Verlassen der taktilen Anzeigefläche zuletzt auf der Stiftplatte berührt wurde. Die sich wegbewegende (verlassende) Hand wird entsprechend als „aktive Hand“ bezeichnet. Unter dem Begriff „Eingabe“ wird ein Tastendruck verstanden. Dies kann entweder eine Geste oder ein HW-Tasten- bzw. Tastaturkommando sein.

Es ist zu erwarten, dass die *Homingzeit für die Eingabe* nicht nur von der Distanz des Eingabegeräts zur taktilen Ausgabefläche abhängt, sondern auch von der Intuitivität der Eingabemethode. Letztere hängt insbesondere stark von der Komplexität der Tastenkommandos ab. Die Verwendung von HW-Tasten benötigte die kürzeste Zeit zwischen dem Verlassen des Displays und der Eingabe (Mittelwert = 1,1 s; Standardabweichung = 0,3). Für das getestete Szenario scheinen HW-Tasten also eine sehr intuitive Eingabemethode zu sein. Nichtsdestotrotz hängt dies auch stark von der Wahl geeigneter und leicht ausführbarer Tastenkommandos ab.

Die Eingabe mittels Gesten erforderte eine etwas höhere Eingabe-Homingzeit (Mittelwert = 1,6 s; Standardabweichung = 0,7), da vor allem das Ausführen der Gesten ebenfalls eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt. Die Homingzeit zur Eingabe mittels Tastatur war deutlich höher (Mittelwert = 3,4 s; Standardabweichung = 1,3). Dies liegt einerseits an der größeren Distanz im Vergleich zu den direkt auf der Stiftplatte liegenden Bedienelementen. Andererseits ist der Aufwand größer, sich die komplexeren Tastaturkommandos ins Gedächtnis zu rufen und die Finger auf den Tasten korrekt zu platzieren.

Die Homingzeit nach der Eingabe ist nicht immer sinnvoll auswertbar, da einige Teilnehmer noch auf den Tasten verweilt haben, bevor sie zur taktilen Ausgabefläche zurückgekehrt sind. Insbesondere bei der Gesteneingabe war dies häufig der Fall. Aus diesem Grund ist keine quantitative Auswertung der Daten bzgl. der *Homingzeit zum Zurückkehren* möglich.

Der *Abstand zwischen aktiver Hand und Zielobjekt* nach der Interaktion weicht bei den verschiedenen Eingabemethoden nicht voneinander ab. Theoretisch sollte die Gesteneingabe hier zu den kleinsten Distanzen führen, da der Benutzer während dem Ausführen einer Klick- oder Panninggeste auf dem Element bleiben kann. Allerdings hängt der Abstand in der Praxis stark davon ab, wo die Geste ausgeführt wurde und was mit dem Zielobjekt nach der Eingabe eines Kommandos passiert ist. Beispielsweise bewegt sich das Element nach einer Panningoperation, weshalb die Distanz sehr groß sein kann, selbst wenn die aktive Hand an die gleiche Position wie zuvor zurückkehrt.

Basierend auf der Videoanalyse durch drei unabhängige Juroren³³ wurde eine Kategorisierung der Lesestrategien der blinden Probanden für alle Eingabemethoden vorgenommen. Die verwendeten Kategorien basieren dabei auf den Handbewegungsmustern von Wormsley ([Wor96], siehe auch Abschnitt 2.2.3), wobei die dort beschriebenen Muster um zwei weitere ergänzt wurden (markiert mit einem *):

1. rechtshändiges Lesen
2. linkshändiges Lesen
3. rechtshändiges Lesen mit der linken Hand als Marker
4. linkshändiges Lesen mit der rechten Hand als Marker (*)
5. rechtshändiges Lesen mit der linken Hand als Kontrollhand (*)
6. beidhändiges synchrones Lesen
7. beidhändiges teilweise asynchrones Lesen
8. beidhändiges asynchrones Lesen

Die bei den Untersuchungen von Wormsley auftretenden asynchronen Muster (hier Muster 7 und 8) wurden bei den Probanden nicht als dominante Lesebewegung beobachtet. Stattdessen wendete ein Teilnehmer häufig eine erweiterte Version von Muster 3 an. Dabei wurde die linke Hand nicht nur als Marker benutzt, sondern auch zum Untersuchen des vorher gelesenen Inhalts, wie zum Beispiel der Beschriftung oder des Status von Formularelementen (Muster 5).

Die Ergebnisse der Beobachtungen finden sich in Tabelle 7.10. Die Kategorisierung basiert dabei auf den beobachteten dominanten Handbewegungen. Wenn Probanden innerhalb einer Testbedingung sehr oft verschiedenartige Bewegungen angewendet haben, dann wurden sie in mehr als einer Gruppe eingeordnet.

³³ Entsprechend der in Abschnitt 5.3 vorgestellten Gutachtermethode wurden die Videoaufzeichnungen drei sehenden Experten im Bereich nicht-visueller Interaktionen gezeigt. Um ein einheitliches Kodieren zu ermöglichen, wurden mögliche Lesestrategien vorgegeben. Jeder Gutachter musste für alle Probanden bewerten, welche der Strategien überwiegend angewendet wurden.

Tabelle 7.10: Durch die Probanden angegebene Verwendung der Hände beim Lesen auf einzeiligen Brailledisplays und beobachtete Handbewegungsmuster während der drei Eingabemethoden auf der Stiftplatte

Proband	Erfahrung Stiftplatte	übliche Verwendung der Hände	Handbewegungsmuster		
			Gesten	HW- Tasten	Tastatur
P1	hoch	situationsbedingt ein- oder beidhändig	6	6	6
P2	hoch	einhandig	2	2	2
P3	hoch	einhandig	4	4	4
P4	mittel	beidhändig	6, 2	6, 2	6, 2
P5	mittel	beidhändig	6, 5	6, 5	6, 5
P6	mittel	situationsbedingt ein- oder beidhändig	6	6	6
P7	mittel	situationsbedingt ein- oder beidhändig	6	6	6
P8	mittel	situationsbedingt ein- oder beidhändig	3, 1	1	1
P9	niedrig	situationsbedingt ein- oder beidhändig	4, 6	2, 6	2, 4
P10	niedrig	situationsbedingt ein- oder beidhändig	6	6	6
P11	niedrig	einhandig	2	2, 4	2
P12	niedrig	beidhändig	3, 6	3, 6	3, 6

Kodierung der Handbewegungsmuster (vgl. obige Liste):

1-2 = einhandig, 3-5 = einhandig mit Hilfshand, 6-8 = beidhändig

Die Wahl der Lesestrategie scheint sowohl von der gewählten Eingabemethode als auch vom Erfahrungsgrad mit der Stiftplatte unabhängig zu sein. Stattdessen hängt sie sehr stark von der gewöhnlich angewendeten Arbeitsmethode des jeweiligen Benutzers ab. Zudem lässt sich kein Zusammenhang zwischen den benötigten Zeiten und den Handbewegungsmustern finden.

Normalerweise erhöhen beidhändige Strategien die Lesegeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 2.2.1). Die Effizienz auf der Stiftplatte ist allerdings nicht nur abhängig vom Lesen, sondern auch von anderen Interaktionsaufgaben. Proband 2 verwendete beispielsweise nur eine Hand zum Braille lesen, während die andere Hand meist auf der Navigationsleiste oder dem Cursorkreuz verweilte. Dies erlaubte ihm, aufgrund der minimierten Homingzeiten mit sehr geringer Anstrengung durch den PDF Fragebogen zu navigieren. Im Gegensatz dazu konnte beobachtet werden, dass beidhändige Leser das Lesen manchmal pausieren bis die zweite Hand von der Eingabe zurück gekehrt ist. Eine mühelose Interaktion wird dadurch verhindert.

Analyse der Eingabehäufigkeiten Die drei erfahrensten Benutzer (P1 – P3) führten im Durchschnitt bei allen Eingabemethoden fast die gleiche Anzahl an Kommandos aus (Gesten = 54, HW-Tasten = 54, Tastatur = 58). Die anderen Probanden benötigten bei den HW-Tasten und der Tastatur deutlich mehr Eingaben als bei den Gesten (Gesten = 64, HW-Tasten = 106, Tastatur = 110). Dies spiegelt sich auch in den gemessenen Zeiten wieder (vgl. Abbildung 7.24). Ein Grund

könnte sicherlich die Tatsache sein, dass die Eingabe von Gesten sehr intuitiv ist. Ein weiterer Grund kann in der oben beschriebenen Fehleranalyse gefunden werden. Das Überspringen von Inhalt war einer der Hauptfehler bei der Gesteneingabe, was wiederum dazu führt, dass weniger Panningkommandos ausgeführt wurden als in den anderen Methoden. Die erfahrenen Benutzer zeigen jedoch, dass Training die Effizienz der beiden Tastenkommando-basierten Eingabemethoden deutlich steigern kann.³⁴

Bei allen Eingabemethoden waren etwa zwei Drittel der Eingabekommandos Panningoperationen (inkl. Verschieben, Blättern sowie Sprung zum Fokus oder an die Ränder des Dokuments). Operationen zur Formulareingabe (Antabben und Aktivieren von Bedienelementen) machten nur etwa 30 % der ausgelösten Kommandos aus. Da es bei der Gesteneingabe nicht notwendig ist, alle Bedienelemente anzutabben, ist dort die Anzahl solcher Kommandos sogar auf 18 % reduziert. Stattdessen bestanden 14 % der Kommandos darin, auditive Ausgaben zu den Bedienelementen (meist die Fragen) anzufordern.

Analyse der Interaktionsprobleme Im Folgenden werden die hauptsächlichsten Probleme zusammengefasst, die während den drei Eingabemethoden auftraten. Die meisten basieren auf Bedienungsschwierigkeiten sowie konzeptionellen Unklarheiten.

Bei der Gesteneingabe verursachte vor allem das Panning Probleme, da es von den Probanden als sehr mühsam für die Erkundung des Dokuments empfunden wurde. Ein großes Problem der Gesteneingabe auf dem BrailleDis 7200 basiert auf den bereits erwähnten Einschränkungen bei der Touchsensorik (vgl. Abschnitt 2.5.4). Sporadisch auftretende Signale bei einzelnen Modulen führen zum Beispiel zum unbeabsichtigten Auslösen von Panninggesten anstatt dem Ausführen eines Klicks. Dies wiederum führt nicht nur zu zusätzlichen Eingaben, sondern frustriert auch die Benutzer.

Die HW-Tasten führten zu den wenigsten Problemen. Lediglich ein Proband benötigte zusätzliche Zeit, um die Eingabetasten zu finden. Zwei weitere Probanden waren zu energisch beim Bedienen der Navigationsleiste, sodass diese manchmal nicht ordnungsgemäß funktionierte. Das heißt, bei zu ruckartigen Eingaben schwingt die Navigationsleiste gelegentlich zurück und löst damit ein zusätzliches, der eigentlichen Absicht entgegengesetztes, Panningkommando aus.

Das Hauptproblem bei der Tastatureingabe bestand darin, dass einige Probanden häufig falsche Tasten betätigten. Beispielsweise wurde fälschlicherweise die Tab Taste anstatt der Caps Lock Taste³⁵ verwendet oder Tastenkommandos wurden falsch memoriert. Ein Teilnehmer benötigte sehr viel Zeit, um alle Tasten zu finden, die für ein Kommando benötigt werden. Vor allem bei der beidhändigen Eingabe wurde ein weiterer Nachteil der Tastaturbedienung deutlich, nämlich die Notwendigkeit der Neuorientierung, um die aktuelle Textzeile wiederzufinden.

Das Finden des Fokus war dementsprechend teilweise ineffizient bei der HW-Tasten- und der Tastatureingabe. Zudem waren fünf Probanden unsicher im Umgang mit Formularelementen, vor allem bei der Bedienung von Radiobuttons. Der korrekte Umgang mit diesem Bedienelement sieht für die Stiftplatte wie folgt aus: Zuerst muss eine Radiobutton Gruppe mittels Tab Kommando selektiert werden (entweder mit Hilfe der entsprechenden HW-Tasten oder durch die Tab Taste auf der Tastatur). Anschließend kann der einzelne Radiobutton mittels der Cursortasten (links/rechts bzw. hoch/runter) ausgewählt werden. Diese Technik sollte den blinden Benutzern von der Interaktion mit herkömmlichen Screenreadern bekannt sein. Der Transfer dieses Konzepts auf die flächige Ausgabe auf der Stiftplatte scheint allerdings nicht intuitiv zu funktionieren.

Zudem konnte teilweise auch ein fehlendes Verständnis für die räumliche Anordnung der Fragen und Antworten beobachtet werden. Zum Beispiel war einigen Probanden nicht bewusst, dass rechts neben der im Darstellungsbereich sichtbaren Ausgabe noch weiterer Inhalt kommen

³⁴ Um dies zu bestätigen, wird allerdings noch eine größere Anzahl an Probanden benötigt.

³⁵ Caps Lock wird als Modifikationstaste zum Eingeben von HyperReader Kommandos verwendet.

kann. Vor allem beim Ausfüllen der Likert-Skala kann den Benutzern eine gute räumliche Vorstellung helfen.

Unabhängig von der Eingabemethode traten bei einigen Probanden auch konzeptionelle Probleme beim Panning auf. Drei der Teilnehmer haben nicht verstanden, dass die Panninggeste als eine Art Greifen zu verstehen ist, d. h. dass das angefasste Element nach dem Beenden der Geste weiterhin unter dem Finger verbleibt. Drei andere Probanden haben oft die falsche Richtung zum Panning mit den HW-Tasten bzw. der Tastatur ausgelöst. Diese Probleme resultieren aus einem fehlenden Verständnis der beiden möglichen Panningmetaphern (vgl. Abschnitt 3.2.2).

Verbesserungsvorschläge der Probanden Die Elemente in der Symbolansicht, die nicht miteinander in Beziehung stehen, sollten mehr Abstand zueinander erhalten. Zudem sollte die Audioausgabe verbessert werden, d. h. der Status der Formularelemente sollte nicht nur beim Fokussieren, sondern auch beim Ändern angesagt werden. Einige Probanden würden ein automatisches Vorlesen des Inhalts per Fingerzeig bzw. beim Antabben bevorzugen, wie dies bei Smartphone Screenreadern angewendet wird (vgl. Abschnitt 2.4).

7.4.2.3 Zusammenfassung

In Hinblick auf die untersuchten Forschungsfragen konnten durch die Studie folgende Erkenntnisse gewonnen werden.

- *Forschungsfrage 2a:* Am Beispiel des Ausfüllens eines PDF Fragebogens auf dem BrailleDis 7200 konnte gezeigt werden, dass die Eingabemethode die Effektivität und Effizienz der Interaktion beeinflussen kann. Wie erwartet, führt die Verwendung einer separaten Tastatur als Eingabemedium zu einer langsameren Interaktion als dies bei Gesten oder direkt am Gerät platzierten Hardwaretasten der Fall ist. Gründe hierfür sind nicht nur die zeitaufwendigeren Handbewegungen zwischen den Geräten, sondern auch die komplexeren und weniger intuitiven Tastenbefehle. Die meisten Fehler bei der Tastatur- und HW-Tasteneingabe traten in der Likert-Skala auf. Dies überrascht insofern nicht, als dass diese Aufgabe hohes räumliches Vorstellungsvermögen beim Benutzer erfordert. Besonders bei der Gesteneingabe ist das Risiko hoch, Inhalte zu überspringen, wenn keine gründliche Erkundung durchgeführt wird. Zusammenfassend erscheint die Kombination der verschiedenen Eingabemethoden als am effizientesten, insbesondere die Verwendung der Navigationsleiste zum Panning und die Gesteneingabe zum Aktivieren von Elementen.
- *Forschungsfrage 2b und 2d:* Auf die angewendeten Lesestrategien scheinen die verschiedenen Eingabemethoden keinen Einfluss zu haben. Die zweihändige Interaktion auf der Stiftplatte kann dabei durchaus zu einer effizienten Arbeitsweise beitragen. Anders als beim reinen Lesen von Brailletexten kann allerdings eine Arbeitsteilung der beiden Hände besonders zielführend sein, d. h. eine Hand liest bzw. erkundet die Inhalte, während die andere Hand auf den Bedienelementen verweilt, um ein schnelles Weiterschalten oder Manipulieren zu ermöglichen.
- *Forschungsfrage 1f:* Obwohl nur wenige Fehler beim Zuordnen von Beschriftung und Formularelement aufgetreten sind, lässt die Studie noch keinen Rückschluss darauf zu, inwieweit die räumliche Anordnung der Bedienelemente in der Symbolansicht die Zuordnung unterstützen kann. Hierfür ist ein direkter Vergleich mit den herkömmlichen Hilfsmitteln blinder Benutzer erforderlich.

7.4.3 Effizienzvergleich am Beispiel eines PDF Fragebogens

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, werden Benutzer in der praktischen Arbeit mit der Stiftplatte nicht zwischen den verschiedenen Eingabemethoden unterscheiden, sondern meist

eine Kombination von Gesten, Hardwaretasten und PC Tastatur anwenden. Zur realistischen Einschätzung der Effizienz der Arbeit mit der Stiftplatte im Vergleich zu herkömmlichen Screenreadern (Forschungsfrage 3d) wurde eine Pilotuntersuchung durchgeführt. Dabei wurden die benötigten Zeiten sowie die gemessenen Fehler beim Ausfüllen eines PDF Fragebogens als Vergleichskriterien herangezogen. Die Studie soll darüber hinaus auch die Forschungsfragen 1f (Unterstützt die räumliche Anordnung die Zuordnung von Bedienelement und Beschriftung?) und 2d (Ist eine zweihändige Interaktion effizienter?) noch einmal genauer untersuchen.

7.4.3.1 Methodik

Zunächst wird an dieser Stelle kurz die Methodik der durchgeführten Benutzerstudie zum Effizienzvergleich vorgestellt.

Probanden An der Studie nahmen vier blinde Benutzer teil, die bereits an der in Abschnitt 7.4.2 beschriebenen Studie, im Folgenden als Hauptstudie bezeichnet, mitgemacht hatten. Sie waren zwischen 30 und 53 Jahren alt (Durchschnittsalter: 38, zwei Frauen). Neben den drei Experten auf der Stiftplatte (Proband 1, 2 und 3 aus der Hauptstudie) nahm auch Proband 4 teil. Dieser hatte inzwischen weiteres Training erhalten, sodass gewährleistet werden konnte, dass alle vier Teilnehmer genügend Erfahrung auf der Stiftplatte hatten.

Aufgabe und Material Die Aufgabe bestand wie schon in der Hauptstudie darin, einen PDF Fragebogen auszufüllen. Der Fragebogen war dabei dem in der Hauptstudie verwendeten ähnlich, um eine gewisse Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Eine Seite des Fragebogens wurde in der Symbolansicht auf dem BrailleDis 7200 angezeigt. Die Benutzer konnten dieses Mal jedoch alle Eingabemethoden verwenden. Die andere Seite des Fragebogens sollte mit Hilfe eines konventionellen Screenreaders mit einzeliger Braillezeile ausgefüllt werden. Wenn möglich, durften die Probanden dabei ihre eigene assistive Technologie verwenden.

Die benutzten Screenreader-Setups sind in Tabelle 7.11 dargestellt. Zwei der Teilnehmer (P1 und P4) arbeiteten an ihrem üblichen Arbeitsplatz. P2 arbeitet normalerweise mit VoiceOver, hat dort bisher allerdings noch keine PDF Formulare bearbeitet. Aus diesem Grund entschied der Proband, eine Testumgebung mit Jaws zu nutzen. Um einen fairen Vergleich zu ermöglichen, durfte er den Umgang von Jaws mit PDF Formularen kurz üben. P3 arbeitet meist mit Linux, konvertiert PDF Dokumente dort allerdings in Textdateien, bevor er diese liest. Da er früher ein erfahrener NVDA Benutzer war, verwendete er diesen Screenreader im Test, benötigte vorher aber kein Training.

Tabelle 7.11: In den Testsitzungen verwendete Screenreader-Setups der Probanden

Proband	Screenreader	Braillezeile	Software
P1	Jaws 13	40er Zeile	Windows 7, Adobe Reader XI
P2	Jaws 16	80er Zeile	Windows 10, Adobe Reader DC
P3	NVDA	80er Zeile	Windows 10, Adobe Reader DC
P4	Jaws 13	40er Zeile	Windows 7, Adobe Reader X

Versuchsablauf Zuerst fand eine kurze Trainingsphase auf der Stiftplatte statt. Dabei wurden die Formularelemente in der Symbolansicht sowie Gesten und Tastenkommandos erläutert. Anschließend musste ein Beispielfragebogen ausgefüllt werden, um die Interaktion auf der Stiftplatte zu üben. Da auch diese Studie in Form eines within-group Designs durchgeführt wurde, mussten die Teilnehmer in der Testphase mit jedem der beiden Hilfsmittel jeweils

eine Seite des Fragebogens (zuerst Seite 1, dann Seite 2) ausfüllen. Zwei Probanden starteten mit der Stiftplatte, die anderen mit den herkömmlichen Screenreadern. Wie auch in der Hauptstudie wurden Fehlerrate und Zeiten gemessen sowie Logdateien mit den Tastwerten und Eingabekommandos der Stiftplatte gespeichert. Für weitere Analysen wurden Videoaufnahmen angefertigt. Zudem wurden die Teilnehmer nach der Zugänglichkeit des PDF Fragebogens bei Verwendung der zwei verschiedenen Hilfsmittel sowie nach ihrer Präferenz befragt.

7.4.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Die *Zugänglichkeit des PDF Dokuments* wurde für die Stiftplatte deutlich besser bewertet als für den herkömmlichen Screenreader. Lediglich ein Proband bewertete sie für beide Hilfsmittel gleich und würde den konventionellen Screenreader bevorzugen. Die anderen drei Teilnehmer bevorzugten die zweidimensionale Ausgabe der Stiftplatte, da eine schlechte Zugänglichkeit zu einem Dokument durch die räumliche Präsentation verbessert werden kann. Beispielsweise kann ihrer Meinung nach so die Zuordnung von Beschriftung und Formularelement unterstützt werden.

Diese Aussage kann auch durch die *Analyse der Fehler* bestätigt werden. Alle Probanden konnten den Fragebogen auf der Stiftplatte fehlerfrei ausfüllen. Mit dem herkömmlichen Screenreader trat hingegen bei jedem Benutzer mindestens ein Fehler auf. Die Probanden 1, 2 und 4 machten dabei alle einen Fehler in der Likert-Skala – einer aufgrund der fehlgeschlagenen Aktivierung eines Radiobuttons und die anderen beiden aufgrund des nachträglichen Verschiebens des Fokus zu einem anderen Radiobutton innerhalb der Gruppe. Diese Fehler wurden von keinem der Probanden bemerkt. Teilnehmer 3 machte drei Fehler bei den Checkboxen, da die Zuordnung der Beschriftungen bei seinem Screenreader nicht deutlich wurde.

Der Vergleich der benötigten *Zeiten* (siehe Abbildung 7.26) zeigt, dass – zumindest beim Ausfüllen eines PDF Fragebogens – die Interaktion auf der Stiftplatte die gleiche Effizienz erreichen kann wie die Arbeit mit einem konventionellen Screenreader. Die Tatsache, dass zwei der Probanden sogar mehr Zeit mit dem herkömmlichen Hilfsmittel benötigten ist durch die schlechte Zugänglichkeit des PDF Fragebogens erklärbar. Insbesondere die uneindeutige Zuordnung von Beschriftung und Formularelement erforderte häufig ein zeitaufwendiges und frustrierendes nachträgliches Überprüfen. Demgegenüber konnte die mehrzeilige Ausgabe auf der Stiftplatte die Überprüfung der Eingaben deutlich vereinfachen. Wie erwartet, wurden durch die Möglichkeit, alle Eingabemethoden auf der Stiftplatte frei zu verwenden, die Zeiten im Vergleich zur Hauptstudie deutlich reduziert (vgl. Werte von P1 bis P4 in Abbildung 7.24). Vor allem Teilnehmer 4 konnte seine Zeit stark reduzieren, da er seitdem mehr Erfahrung im Umgang mit der Stiftplatte gewinnen konnte. Dies macht unter anderem auch die Wichtigkeit des Trainingsaspekts sowie einer adäquaten Schulung für die Stiftplatte deutlich.

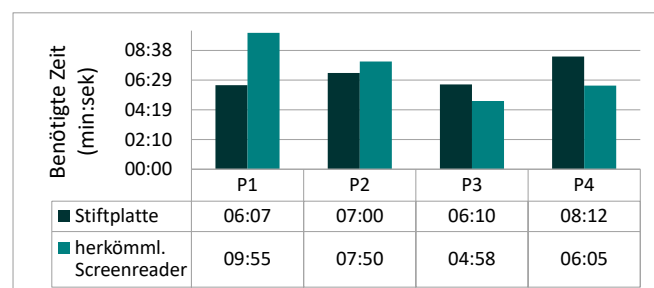


Abbildung 7.26: Benötigte Zeiten der vier Probanden zum Ausfüllen des Fragebogens bei den zwei Testbedingungen

Die Verwendung der verschiedenen Eingabemöglichkeiten war bei allen Probanden ähnlich. Wie erwartet, wurde die Navigationsleiste zum Panning verwendet und das linke Cursorkreuz zum Springen an die Ränder des Dokuments. Zur Aktivierung der Formularelemente wurden

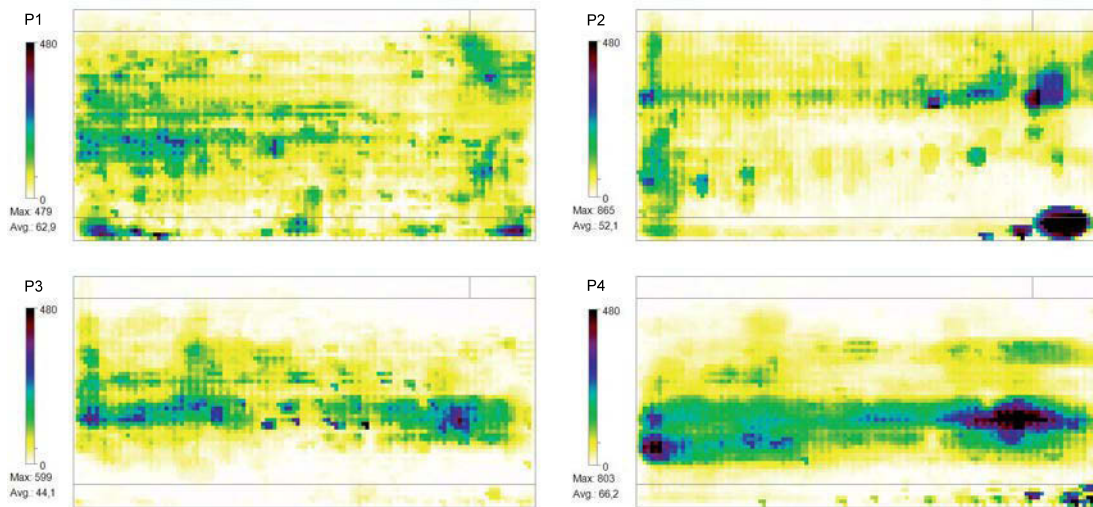


Abbildung 7.27: Visualisierung der Berührungsdauer einzelner Bereiche auf der Stiftplatte für die vier Probanden (die Anzahl der Berührungen während des Tests ist für jedes Modul durch eine definierte Farbskala kodiert)

Gesteneingaben zur Mausemulation benutzt. Lediglich ein Proband verwendete das HW-Tastatenkommando für Tab für ein einzelnes Element. Zum Lesen wurden die gleichen *Strategien* verwendet wie auch schon in der Hauptstudie (vgl. P1 bis P4 in Tabelle 7.10). Im Vergleich zur einzeiligen Braillezeile unterstützt die Interaktion auf der Stiftplatte, vor allem die Eingabe von Gesten, das zweihändige Lesen. Asynchrone Strategien erlauben dabei besonders gut die Referenzierung und somit die Zuordnung zusammengehöriger, aber entfernt platzierter Bedienelemente. Die Interaktion mit der herkömmlichen Braillezeile und der PC Tastatur führt hingegen eher zum einhändigen Lesen, da eine Hand die meiste Zeit auf der Tastatur bleibt.

Am Beispiel der Berührungsdaten der vier Probanden wurde eine Heatmap-Visualisierung (vgl. Abschnitt 5.3) vorgenommen. Diese soll die Analyse der Verwendung der einzelnen Stiftplattenbereiche sowie besonderer Charakteristiken der Lesestrategien unterstützen. In Abbildung 7.27 sind Heatmaps dargestellt, die die Auftrittshäufigkeit von Berührungen auf der Stiftplatte visualisieren. Die Heatmaps wurden aus den validen Touchsensordaten während des Tests generiert. Eine Berührung ist dabei als ellipsenförmiger Bereich geloggt, der alle aktivierten Touchsensoren abdeckt. Um die Lesbarkeit und Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde ein maximaler Wert für die Farbskalenzuordnung verwendet. Höhere Werte werden somit der gleichen Farbe zugeordnet wie das festgelegte Maximum.

Basierend auf den analysierten Videositzungen können die erzeugten Heatmaps sowie die darin hervorstechenden Charakteristiken für die vier Probanden wie folgt erklärt werden:

1. Proband 1: Nach dem Ausführen von Blätteroperationen begann der Benutzer meist auf der linken Seite mit Weiterlesen. Dabei machte er zum Teil ausladende Bewegungen mit beiden Händen über die gesamte Ausgabefläche. Beim Verwenden der Navigationsleiste berührten manchmal einige Finger den Detailbereich.
2. Proband 2: Meist verwendete dieser Anwender nur einen Finger zum Lesen. Am Anfang verblieb seine rechte Hand auf der Navigationsleiste und einige Finger wurden im Detailbereich abgelegt (große Anhäufung von Berührungspunkten unten rechts). Manchmal ließ er seine Finger auch temporär auf Formularelementen liegen während er über die Antwort nachdachte (Anhäufungen rechts oben im Darstellungsbereich).
3. Proband 3: Dieser Benutzer verwendete häufig seine Zeigefinger zum Lesen, platzierte allerdings manchmal auch andere Finger auf der Stiftplatte. Nach dem Scrollen befanden sich die zu erkundenden Antworten meist in den mittleren Zeilen des Darstellungsbereichs. Vor allem bei der Likert-Skala berührte der Benutzer häufig die rechte Seite der Ausgabefläche.

4. Proband 4: Da der Proband oft kleine Panningschritte verwendete, wurden nur einzelne Zeilen oder einige Buchstaben des Inhalts bewegt. Die Hand des Benutzers bewegte sich deshalb hauptsächlich in einem begrenzten Bereich, in diesem Fall rechts unten innerhalb des Darstellungsbereichs. Bei der Likert-Skala wurden häufiger Blätteroperationen verwendet, wobei sein Lesefinger oft am linken Rand der Ausgabefläche verblieb. Beim Bedienen der Navigationsleiste berührten die Finger manchmal den rechten unteren Teil des Detailbereichs.

7.4.3.3 Zusammenfassung

Der Vergleich der beiden Hilfsmittel hat gezeigt, dass die Effizienz auf der Stiftplatte mit der eines herkömmlichen Screenreaders durchaus mithalten kann (*Forschungsfrage 3d*) – zumindest wenn der Benutzer geübt im Umgang mit taktilen Flächendisplays und deren besonderen Interaktionsstrategien ist. Besonders wenn bei konventionellen Technologien aufgrund unzureichender Zugänglichkeit von Dokumenten Probleme auftreten, kann eine zweidimensionale Ausgabe den Zugang verbessern. So kann beispielsweise die Zuordnung von Formularelement und Beschriftung durch die räumliche Anordnung der Elemente in der Symbolansicht unterstützt werden (*Forschungsfrage 1f*). In diesem Zusammenhang weisen insbesondere zweihändige asynchrone Arbeitstechniken auf der Stiftplatte deutliche Vorteile auf (*Forschungsfrage 2d*).

Da es zurzeit nur wenige blinde Menschen gibt, die über ausreichend Erfahrung mit dem BrailleDis 7200 verfügen, konnte die Vergleichsstudie nur mit sehr wenigen Benutzern durchgeführt werden. Für eine statistische Auswertung genügt dies zwar nicht, allerdings wurden zumindest erste Tendenzen bzgl. der Effizienz und Erlernbarkeit des Systems sichtbar.

7.4.4 Untersuchung zum taktilen Zoomen

Auch blinde und sehbehinderte Benutzer bevorzugen die Verwendung von Zoomfunktionalitäten zur Erkundung komplexer Diagramme, da so eine genauere Aufnahme der Informationen möglich ist als dies ohne Zooming der Fall wäre [RPK13]. Im Vergleich zur Verwendung von Zooming auf visuellen Ausgabegeräten müssen die Interaktions- und Präsentationstechniken allerdings an die Besonderheiten der taktilen Wahrnehmung sowie die niedrige Auflösung taktiler Flächendisplays angepasst werden.

Die Wahrnehmung des Zoomens ist bei sehenden und blinden Menschen sehr verschieden. Aufgrund der kontinuierlichen Änderung beim geometrischen Zoom erscheint dieser für sehende Benutzer als eine Art Morphing³⁶ des dargestellten Inhalts. Auf diese Weise fällt es leicht, den Kontext zu bewahren. Im Gegensatz dazu nehmen blinde Menschen eher eine Art Seitenwechsel, wie beim Umblättern eines Buches, wahr³⁷. Dies führt dazu, dass sich der blinde Anwender nach jeder Zoomoperation neu orientieren muss, um die Änderungen nachzuvollziehen.

Im Folgenden werden existierende Zoommechanismen auf taktilen Ausgabegeräten und insbesondere die beim HyperReader implementierten Ansätze betrachtet. Zur Beantwortung von Forschungsfrage 3c wurde im Rahmen dieser Arbeit zudem eine neue Zoommethode entwickelt, welche mit dem bisherigen Zoomkonzept auf der Stiftplatte bezüglich Effizienz und Beanspruchung verglichen wird.³⁸

7.4.4.1 Vorhandene Zoomingansätze auf taktilen Ausgabegeräten

Einige bisherige Zoomingansätze auf taktilen Flächendisplays basieren auf *semantischem Zoom* [PF93], d.h. die Menge der dargestellten Informationen ist an die aktuelle Zoomstufe angepasst.

³⁶ kontinuierliche weiche Veränderung in kaum wahrnehmbaren Schrittweiten

³⁷ Diese Aussage beruht auf persönlichen Gesprächen mit betroffenen Benutzern.

³⁸ Eine Veröffentlichung der Studie als Konferenz-Beitrag befindet sich in Vorbereitung (siehe [PW16a]).

Eine Vergrößerung führt somit nicht zu einer ausschließlichen Vergrößerung im Sinne der Ausdehnung der dargestellten Objekte, sondern vielmehr zur Zunahme der präsentierten Details. Verkleinern führt entsprechend zum Weglassen von Details, um das dargestellte Bild zu vereinfachen. Die Überblicksansicht des HyperReaders stellt beispielsweise ein solches Konzept dar. Bei seinem Navigationskonzept zum Betreten und Verlassen von Gruppen verwendet auch Rotard [ROE04] eine Art von semantischem Zoom, um SVG-Grafiken auf der Stiftplatte darzustellen.

Darüber hinaus gibt es Ansätze, bei denen Algorithmen automatisch entscheiden, welche Zoomstufen nicht informativ sind und somit dem Benutzer gar nicht erst angeboten werden sollten [RP10, RPK13]. Dazu werden nur Zoomstufen ausgegeben, welche sich deutlich von der vorherigen Stufe unterscheiden. Der semantische Zusammenhang der Information wird allerdings bewahrt, d. h. Objekte oder Objektteile bleiben als Ganzes bestehen. In einer Studie mit blinden Probanden konnte eine signifikante Verbesserung korrekter Antworten im Vergleich zum konventionellen Zoom nachgewiesen werden [RPK13]. Es gab dabei zwar keinen Unterschied in den Antwortzeiten, allerdings wurden weniger Klicks benötigt, um das Antwortziel zu erreichen. Zur Erkundung der Diagramme wurde jedoch kein taktiles Flächendisplay verwendet, sondern eine taktile Maus (modifizierter VT Player, siehe Kapitel 2.5.2).

Zur Realisierung von Zoomoperationen ohne Wissen über den dargestellten Inhalt sind semantische Zoomansätze nicht anwendbar. Stattdessen wird ein *geometrischer Zoom* verwendet. In grafischen Anwendungen führt dieser normalerweise zu einer kontinuierlichen Änderung der Skalierung. Aufgrund der unterschiedlichen Zoom-Wahrnehmung von blinden Menschen ist die Anwendbarkeit eines solchen kontinuierlichen Zooms auf taktilen Displays bisher unklar. Für haptische Zoominterfaces scheint stattdessen die Bereitstellung einer begrenzten Anzahl diskreter Zoomstufen als sinnvoll. Entsprechend Ziat et al. [ZGS⁺07] sind dabei 25 Stufen ausreichend.

Die einfachste Art, einen geometrischen Zoom haptisch umzusetzen, besteht in der Übernahme der üblichen Zoom-Methapher in GUIs. Bei diesem, im Folgenden als *Mittelpunkzoom* bezeichneten, Ansatz wird der Zoom im Zentrum des aktuellen Ausschnitts angewendet, wie dies bei einem optischen Objektiv der Fall ist, bei dem die Ausrichtung der Kamera nicht verändert wird. Der Mittelpunkzoom kommt beispielsweise beim HyperReader sowie beim Tangram Zeichenarbeitsplatz auf der Stiftplatte zum Einsatz. In den durchgeführten Benutzerstudien (u. a. zum taktilen Grafikeditor aus Abschnitt 7.3.1) hat sich jedoch gezeigt, dass die blinden Probanden häufig verwirrt waren, wenn nach dem Zoomen Objekte plötzlich abgeschnitten oder komplett von der Ausgabefläche verschwunden waren. Dieses Phänomen tritt vor allem auf, wenn sich Objekte nahe am Rand der taktilen Ausgabe befinden und die Vergrößerung stark genug ist, um das Objekt aus dem sichtbaren Bereich zu verschieben (vgl. Abbildung 7.28, rechte Spalte). Da beim taktilen Erkunden das Bewahren des Kontexts nach dem Zoomen ohnehin sehr schwierig ist, sollte zumindest eine weite Verschiebung des Inhalts vermieden werden.

Um dem Benutzer zu ermöglichen, selbstständig einen Mittelpunkt für den Zoom zu definieren, kann ein anderer Ansatz gewählt werden, bei dem die *Fingerposition als Zentrum* dient. Ein Beispiel hierfür ist der Touch Zoom, den Shimada und seine Kollegen [SYU⁺08] auf dem DotView Display (48 x 32 Stifte, siehe Abschnitt 2.5.3) verwenden. Die ursprüngliche Zoomfunktion des Systems basierte auf dem herkömmlichen Mittelpunkzoom. In einer Studie zum Touch Zoom sollten Benutzer zwar subjektiv bewerten, als wie hilfreich und leicht bedienbar sie den neuen Zoom einschätzen [SYU⁺08], allerdings wurde kein Vergleich zwischen den beiden Zoomansätzen durchgeführt. Ein weiteres Beispiel des Fingerposition-Ansatzes ist die Verwendung von Zoomgesten im HyperReader System (vgl. Abschnitt 3.2.2). Der Startpunkt der Kreis- bzw. Halbkreisgesten wird dabei als Zentrum für den Zoom verwendet. Aufgrund der technisch anfälligen Gestenerkennung ist zurzeit jedoch kaum ein zufriedenstellender Umgang mit Gesten auf der Stiftplatte möglich (siehe dazu auch die Diskussion in Abschnitt 2.5.4).

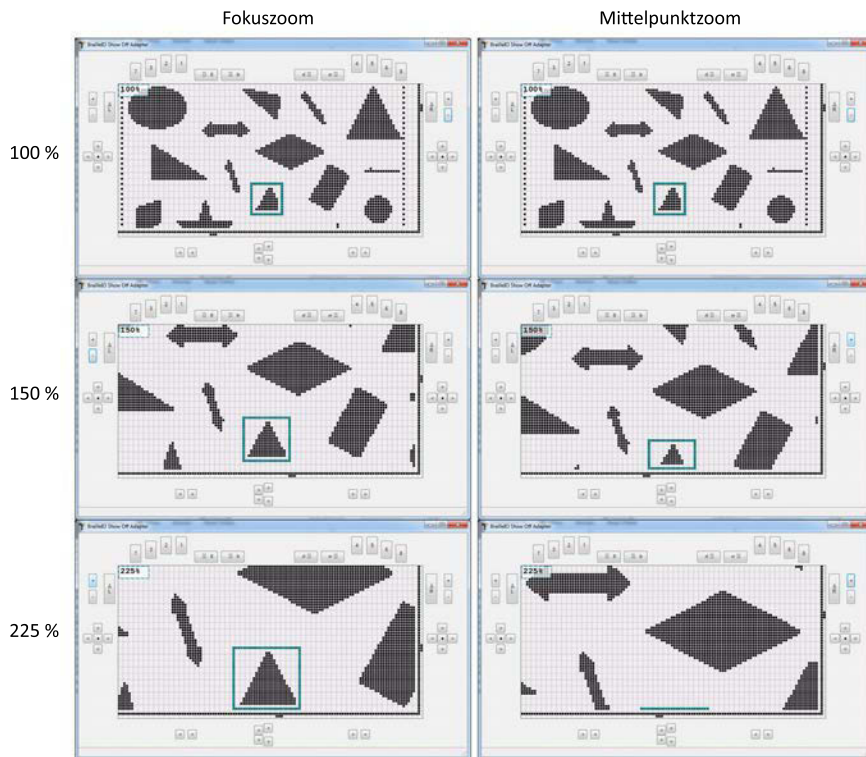


Abbildung 7.28: Screenshots eines Beispielbildes, die den Ausschnitt der Stiftplatte in drei verschiedenen Zoomstufen basierend auf dem Fokus- und dem Mittelpunktzoom zeigen. Das mit dem Rahmen markierte Dreieck ist fokussiert. Der initiale Ausschnitt bei der Zoomstufe von 100% ist bei beiden Ansätzen der gleiche, ändert sich jedoch nach dem Hineinzoomen.

7.4.4.2 Ein neuer Zoomansatz: der Fokuszoom

Beide auf der Stiftplatte umgesetzten Zoomansätze, der Mittelpunktzoom und die Zoomgesten, sind aufgrund der oben genannten Probleme nicht optimal. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein neuer Ansatz entwickelt, welcher die Vorteile beider Zoomfunktionalitäten miteinander kombiniert. Der neue Ansatz verwendet Hardwaretasten zur Eingabe anstatt Gesten und er wird nicht in die Mitte des Ausgabebereichs ausgeführt, sondern benutzt hierfür den Mittelpunkt des fokussierten Elements. Anders als die Zoomgesten wird also nicht der Finger, sondern der Systemfokus als Referenzpunkt für das Zoomen genutzt. Dies scheint ein geeigneter Punkt zu sein, da das fokussierte Element häufig auch die Aufmerksamkeit des Benutzers besitzt. Ein typisches Szenario zur Verwendung der Zoomfunktionen auf einem taktilen Flächendisplays ist die Erkundung grafischer Anwendungen, wo räumliche Anordnungen oder das Layout wichtig sind, wie zum Beispiel Grafikedatoren oder Kartenanwendungen (vgl. auch Abschnitt 3.1.3). Vor allem bei der Informationssuche oder bei Editieraufgaben innerhalb derartiger Anwendungen wird das Element, auf dem die Aufmerksamkeit liegt, üblicherweise aktiv durch den Benutzer markiert bzw. selektiert.

Der implementierte Fokuszoom basiert wie auch der ursprüngliche Mittelpunktzoom auf einem festen Skalierungsfaktor. Verwendet wird dabei ein Faktor von 1,5 (d. h. nach dem Hereinzoomen ist der dargestellte Inhalt um 50% größer). Dies scheint ein sinnvoller Zoomfaktor zu sein, da die Veränderung zwischen zwei Zoomstufen ausreichend groß ist und dennoch die Verwendung zu vieler Zoomstufen vermieden wird.

Der Unterschied zwischen dem Fokus- und dem Mittelpunktzoom besteht lediglich in der Verwendung verschiedener Mittelpunkte, um welche der Zoom ausgeführt wird (vgl. Abbildung 7.28). Wie oben beschrieben, wird für den Mittelpunktzoom immer das Zentrum der Ausgabebläche verwendet. In diesem Fall wird die neue Position des dargestellten Ausschnitts

(newOffset^{39}) aus dem hypothetischen neuen Mittelpunkt (newCenter) und dem Zentrum der Anzeigefläche (outputArea) berechnet:

```

1 Point newOffset = new Point(
2     Math.Round((newCenter.X - (outputArea.Width / 2)) * -1),
3     Math.Round((newCenter.Y - (outputArea.Height / 2)) * -1)
4 );

```

Der Offset des Fokuszooms ergibt sich hingegen aus der Differenz des alten und des neuen Mittelpunkts des fokussierten Elements:

```

1 Point newOffset = new Point(
2     oldOffset.X + (oldCenter.X - newCenter.X),
3     oldOffset.Y + (oldCenter.Y - newCenter.Y)
4 );

```

In beiden Fällen ist der hypothetische neue Mittelpunkt das Produkt aus altem Mittelpunkt und dem Skalierungsfaktor: $\text{newCenter} = \text{oldCenter} * (\text{newZoom} / \text{oldZoom})$. Das alte Zentrum ist dabei entweder das Zentrum der Anzeigefläche (Mittelpunktzoom) oder der Mittelpunkt des fokussierten Elements (Fokuszoom).

Der Fokuszoom wurde im Tangram Zeichenarbeitsplatz (siehe Kapitel 7.3.1) integriert. Ziel des Fokuszooms ist es, die Position des fokussierten Elements auf der taktilen Anzeigefläche nach dem Zoomen beizubehalten. Da sich hierdurch der Kontext weniger verändert, ist zu vermuten, dass der Fokuszoom den Orientierungsverlust des Benutzers reduzieren kann. Um zu überprüfen, ob der Fokuszoom tatsächlich effizienter als der Mittelpunktzoom ist, wurde eine Benutzerstudie auf dem BrailleDis 7200 durchgeführt.

7.4.4.3 Methodik

Basierend auf Forschungsfrage 3c sollen im Rahmen der Benutzerstudie die folgenden Fragestellungen bezüglich dem Vergleich von Fokus- und Mittelpunktzoom geklärt werden:

1. Welcher Zoomansatz ist effizienter?
2. In welchem Zoom ist die Beanspruchung für den Benutzer geringer?
3. Welcher Zoom wird von den Benutzern bevorzugt?

Probanden An der Studie nahmen zwölf Personen im Alter zwischen 22 und 53 Jahren (Durchschnittsalter: 33, sechs Frauen) teil. Vier der Teilnehmer waren blind (ein späterblindeter Mann und drei geburtsblinde Frauen), die anderen waren sehende Personen, denen die Augen verbunden wurden. Drei der blinden und drei der sehenden Probanden hatten hohe oder sehr hohe Erfahrungen mit der Stiftplatte, drei der sehenden Personen hatten mittelmäßige oder wenige Erfahrungen damit und ein blinder sowie zwei sehende Teilnehmer hatten noch keine oder nur sehr geringe Erfahrungen. Da für diese Studie weder Braillekenntnisse noch Erfahrungen in der Erkennung taktiler Formen notwendig waren, konnten auch die sehenden Personen teilnehmen, um auf diese Weise die Anzahl an Datensätzen zu erhöhen.

Material, Aufgaben und Versuchsablauf Für die Untersuchung wurden drei Testbilder vorbereitet, auf denen jeweils 18 unterschiedliche Formen zufällig verteilt wurden (siehe Abbildung 7.29). Die Aufgabe für die Probanden bestand darin, nach der Anwendung einer der beiden Zoomfunktionen den Fokus auf der Stiftplatte wiederzufinden. Dazu wurde jeweils eine der dargestellten Formen fokussiert (zufällige Reihenfolge, jede Form nur einmal). Der aktuell auf der Stiftplatte dargestellte Ausschnitt wurde ebenfalls zufällig platziert, wobei jedoch sicher gestellt war, dass die fokussierte Form in der initialen Ausgabe sichtbar war.

³⁹ In diesem Fall ist der Offset ≤ 0 , da er die Positionierung des Inhalts in Bezug auf den aktuellen Ausschnitt angibt.

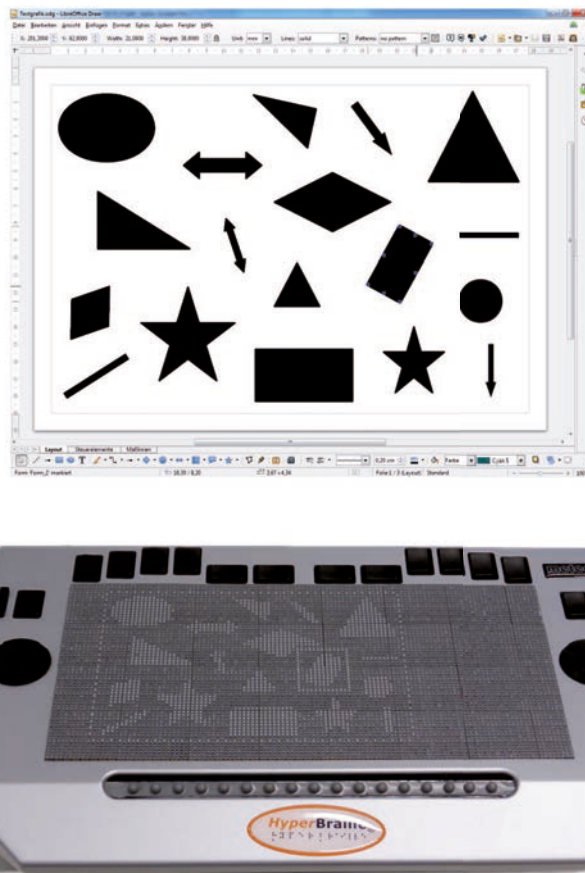


Abbildung 7.29: Screenshot von einem der Beispielbilder (Libre Office Draw Grafikdokument mit 18 verschiedenen Formen, oben) sowie die entsprechende Ausgabe auf dem BrailleDis 7200 (unten). Die taktile Ausgabe ist hier in der kleinsten Zoomstufe dargestellt, sodass das gesamte Bild auf einmal sichtbar ist (Zoomstufe = 66 %).

In einer kurzen Übungsphase wurden die zwei Zoomkonzepte vorgestellt und die anschließende Aufgabe an einem Beispiel erläutert. Dabei wurde auch der Fall gezeigt, bei dem sich das fokussierte Element nach dem Zoomen aus dem sichtbaren Bereich heraus bewegt. Um den Benutzern das Auffinden der Form auch in diesem Fall zu ermöglichen, wurden die zur Verfügung stehenden Panningoperationen vorgestellt und deren Verwendung geübt. Nach dem Training wurden drei Testläufe durchgeführt. Die drei Beispielbilder wurden zufällig auf diese verteilt. Die jeweiligen Einzelaufgaben in jedem Testdurchlauf bestanden aus den folgenden Phasen:

1. Finden der fokussierten Form im aktuellen Ausschnitt
2. Ausführung der Zoomoperation (durch den Testleiter)
3. möglichst schnelles Wiederfinden der fokussierten Form

Jeder Testlauf bestand aus den zehn, in Tabelle 7.12 aufgelisteten, Zoombedingungen (Einzelaufgaben). Diese wurden den Probanden in zufälliger Reihenfolge zugewiesen. Im ersten Testlauf wurde jedes der beiden Zoomkonzepte fünf Mal zufällig auf die Zoombedingungen verteilt. Im zweiten Testdurchlauf wurde ein Zoomkonzept, entweder Fokus- oder Mittelpunktzoom, in allen zehn Bedingungen verwendet. Im dritten Testlauf wurde bei allen Bedingungen der jeweils andere Zoomansatz benutzt. Im Sinne des within-group Designs wurden somit allen Teilnehmern alle Testbedingungen zugewiesen. Individuelle Unterschiede zwischen den Probanden

Tabelle 7.12: Die zehn untersuchten Zoombedingungen

Bedingung	initiale Zoomstufe	finale Zoomstufe	Zoommodus
Z1	66%	100%	1x zoom-in
Z2	66%	150%	2x zoom-in
Z3	66%	225%	3x zoom-in
Z4	100%	150%	1x zoom-in
Z5	100%	225%	2x zoom-in
Z6	150%	225%	1x zoom-in
Z7	225%	337%	1x zoom-in
Z8	225%	66%	3x zoom-out
Z9	225%	150%	1x zoom-out
Z10	337%	150%	2x zoom-out

konnten dementsprechend isoliert werden, was einen direkten Vergleich beider Zoomansätze ermöglicht. Trainings- und Ermüdungseffekte wurden durch das Variieren der Reihenfolge der beiden Zoomkonzepte kontrolliert.

Versuchsaufbau Zur Ausgabe der grafischen Formen auf dem BrailleDis 7200 wurde der Tangram Arbeitsplatz verwendet (siehe Abbildung 7.29). Das fokussierte Element war taktil durch einen blinkenden Rahmen in einer Frequenz von 1,7 Hz⁴⁰ wahrnehmbar. Um das Zielobjekt vor und nach dem Zoomen zu finden, war es nicht notwendig, seine Form zu erkennen, sondern lediglich den blinkenden Rahmen aufzuspüren. Da sich der Rahmen nach dem Zoomen bei beiden Methoden mehr oder weniger stark bewegt, war es für die Probanden nicht ausreichend, lediglich die vorherige Position zu berühren.

Messwerte Während der Aufgaben wurden neben der benötigten Zeit zum Wiederfinden des Fokus insbesondere die Position des Zielobjekts sowie der Offset des dargestellten Ausschnitts jeweils vor und nach dem Zoomen in Logdateien gespeichert. Aus dem Offset wurde die Verschiebung des Zielobjekt-Mittelpunkts berechnet. Zudem wurde mit Hilfe des NASA-TLX (siehe Kapitel 5.2) für jeden der beiden Zoomansätze die allgemeine Beanspruchung der Benutzer gemessen.

7.4.4.4 Ergebnisse und Diskussion

In Abbildung 7.30 und 7.31 sind die durchschnittlichen Werte für Zeit und Verschiebung dargestellt. Bei Verwendung des Fokuszooms wurde von den Probanden signifikant weniger Zeit zum Wiederfinden des fokussierten Elements benötigt als beim Mittelpunktzoom ($t = 3,581$; $df = 11$; $p < 0,01$). Zudem war die Verschiebung des fokussierten Elements beim Fokuszoom ebenfalls signifikant kleiner ($t = 15,093$; $df = 11$; $p < 0,001$). Beide Benutzergruppen (blinde und sehende Probanden) benötigten etwa 25 % mehr Zeit, um das fokussierte Element nach Ausführung des Mittelpunktzooms wiederzufinden. Dies liegt vermutlich hauptsächlich an der größeren Verschiebung des fokussierten Elements nach dem Zoomen mittels Mittelpunktzoom.

⁴⁰ Der Wechsel zwischen erhabenem und abgesenktem Rahmen erfolgt alle 300 ms. Ein vollständiges Blinken mit Anheben und Absenken dauert somit 600 ms.

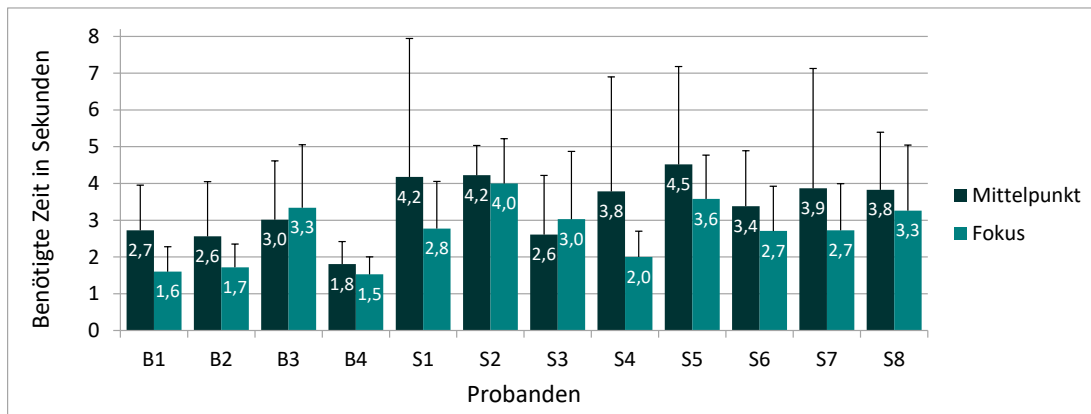


Abbildung 7.30: Benötigte Zeit zum Wiederfinden der fokussierten Form nach Anwendung von Mittelpunkt- und Fokuszoom (Mittelwerte und Standardabweichungen; $10 \leq n \leq 15$; blinde Probanden als B1 bis B4 bezeichnet)

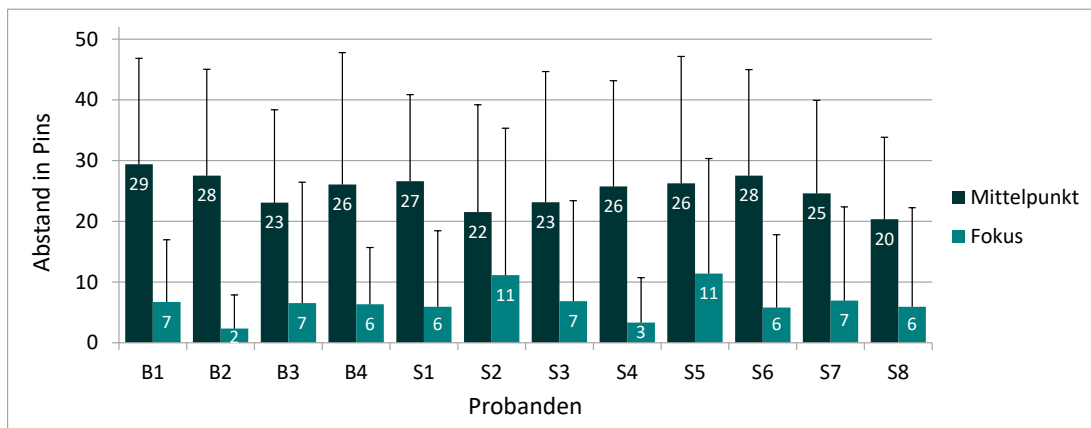


Abbildung 7.31: Abstand zwischen den Mittelpunkten der fokussierten Form vor und nach Anwendung von Mittelpunkt- und Fokuszoom (Mittelwerte und Standardabweichungen; $n = 15$; blinde Probanden als B1 bis B4 bezeichnet)

Versuche, bei denen die Probanden Panningoperationen durchgeführt haben, sind in der zeitlichen Analyse nicht berücksichtigt. In einigen Fällen war Panning notwendig, da sich das fokussierte Element nach dem Zomen aus dem sichtbaren Bereich verschoben hatte. Während dies beim Fokuszoom erwartungsgemäß nicht auftrat, passierte es beim Mittelpunktzoom in 21 von 180 Fällen. Die benötigte Zeit war bei diesen Versuchen mehr als zehnmal höher (Durchschnitt = 35,5 s; Standardabweichung = 35,1) als bei den anderen Versuchen mit Mittelpunktzoom. Die hohe Standardabweichung für die Panningzeiten ist durch die unerfahrenen Benutzer erklärbar, da diese den Ausschnitt teilweise in die falsche Richtung verschoben haben und somit bis zu 2 Minuten zum Auffinden des fokussierten Elements benötigten.⁴¹ Unabhängig von diesen Extremfällen wird die Neuorientierung nach dem Mittelpunktzoom in der Praxis deutlich zeitaufwendiger sein als die oben erwähnten 125 % verglichen zum Fokuszoom.

Auch für die Werte zur Verschiebung des fokussierten Elements sind einige Erklärungen notwendig. Der Abstand beim Fokuszoom ist normalerweise null, wobei kleinere Rundungsfehler teilweise auch zu Abständen von 1 bis 2 Stiften führen. In manchen Fällen ist es beim Herauszoomen jedoch nötig, einen großen Abstand in Kauf zu nehmen, da die Dokumentgrenzen ansonsten stark verschoben werden würden. Die Position des Dokuments in der kleinsten Zoomstufe ist beispielsweise immer gleich, d. h. in der linken oberen Ecke des Darstellungsbereichs (vgl.

⁴¹ Das Kommando für den direkten Sprung zum Fokus wurde den Probanden natürlich nicht zur Verfügung gestellt.

Abbildung 7.29), und somit nicht vom verwendeten Zoomkonzept abhängig. Entsprechende Anpassungen sind also nicht nur nötig, damit die Grenzen des Dokuments immer möglichst im sichtbaren Bereich bleiben, sondern auch um eine konsistente Präsentation des Inhalts auf der Stiftplatte zu gewährleisten. In derartigen Fällen wird im Quellcode folgende Korrektur für den Offset des Darstellungsbereichs (DB) durchgeführt:

```

1  if (DB.GetXOffset() > 0) { DB.SetXOffset(0); }
2  if (DB.GetYOffset() > 0) { DB.SetYOffset(0); }
3
4  if ((DB.ContentWidth + DB.GetXOffset()) < DB.ContentBox.Width)
5  {
6      maxOffset = Math.Min(0, DB.ContentBox.Width - DB.ContentWidth);
7      DB.SetXOffset(maxOffset);
8  }
9
10 if ((DB.ContentHeight + DB.GetYOffset()) < DB.ContentBox.Height)
11 {
12     maxOffset = Math.Min(0, DB.ContentBox.Height - DB.ContentHeight);
13     DB.SetYOffset(maxOffset);
14 }

```

Der beschriebene Verschiebungseffekt resultiert in einer zeitaufwendigeren Suche nach Zoom-out Operationen. Die benötigte Zeit für Zoom-out Versuche (Mittelwert = 3,4 s; Standardabweichung = 1,1) ist dementsprechend signifikant höher als für Zoom-in Versuche (Mittelwert = 2,8 s; Standardabweichung = 0,7; $t = -2,902$; $df = 11$; $p < 0,05$). Besonders beim Herauszoomen um drei Stufen gleichzeitig (Zoomfaktor = -4,5) verdoppelt sich die Suchzeit im Durchschnitt von 2,6 s⁴² auf 5,3 s. Die getesteten Zoom-in Bedingungen weisen in dieser Hinsicht keinen signifikanten Unterschied auf ($F_{2,220} = 0,578$; $p > 0,5$). Die zeitliche Effizienz des Fokuszooms gegenüber dem Mittelpunktzoom ist in Zoom-in Bedingungen ($t = 3,139$; $df = 11$; $p < 0,01$) deutlicher als bei Zoom-out Bedingungen ($t = 1,307$; $df = 11$; $p = 0,22$; keine Signifikanz).

Die Teilnehmer bewerteten die einzelnen Beanspruchungsfaktoren des TLX signifikant niedriger für den Fokuszoom als für den Mittelpunktzoom (vgl. Abbildung 7.32; $t = 4,950$; $df = 5$; $p < 0,01$). Obwohl die individuellen Bewertungen teilweise stark voneinander abweichen, wurde der Fokuszoom von allen Probanden in allen Faktoren als weniger oder zumindest gleich beanspruchend empfunden. In Hinblick auf die allgemeine Beanspruchung hat der Fokuszoom somit ebenfalls klare Vorteile gegenüber dem Mittelpunktzoom.

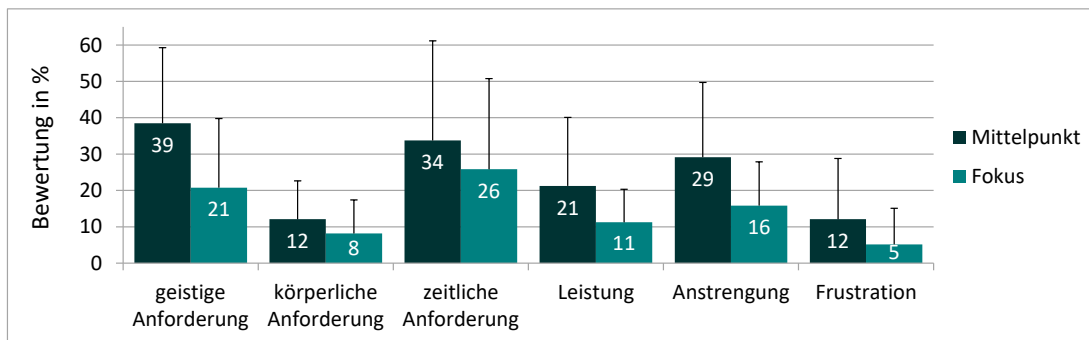


Abbildung 7.32: Bewertung der TLX Faktoren für den Mittelpunkt- und den Fokuszoom (0 % = sehr niedrig, 100 % = sehr hoch; Mittelwerte und Standardabweichungen; $n = 12$)

Alle Probanden bewerteten den Fokuszoom sehr positiv. 9 von 12 Teilnehmern würden ihn gegenüber dem Mittelpunktzoom bevorzugen. Die anderen drei Probanden (ein sehender und zwei blinde Benutzer) hatten diesbezüglich keine Präferenz. Stattdessen würden sie beide

⁴² Durchschnittszeit bei 1- oder 2-stufigen Zoom-out Bedingungen

Zoomansätze verwenden, da sie denken, dass die Eignung der beiden Methoden stark von der Arbeitsaufgabe abhängt. Wenn beispielsweise nur das fokussierte Element relevant ist, dann scheint der Fokuszoom geeigneter. Um den globalen Kontext besser zu bewahren, würden sie hingegen den Mittelpunktzoom bevorzugen.

7.4.4.5 Zusammenfassung

Der Vergleich der beiden Zoomkonzepte auf der taktilen Stiftplatte (vgl. *Forschungsfrage 3c*) hat gezeigt, dass der Fokuszoom nicht nur effizienter ist, sondern auch von den Benutzern bevorzugt wird. Beim Umgang mit einzelnen Grafikelementen erleichtert der Fokuszoom das Bewahren der Orientierung, da die Verschiebung des fokussierten Elements auf der taktilen Ausgabefläche nach dem Zoomen minimiert wird. Dies reduziert wiederum den Bedarf an zeitaufwendigen Panningoperationen. Zudem ist die allgemeine Benutzerbeanspruchung beim Fokuszoom deutlich geringer als beim Mittelpunktzoom.

Um ein effizientes Interagieren auf der taktilen Stiftplatte bei verschiedenartigen Aufgaben zu gewährleisten, können mehrere Zoomansätze redundant angeboten werden. Anwendungen auf den BrailleDis Geräten sollten dem Benutzer somit am besten die Wahl aus allen drei Möglichkeiten lassen, d. h. Gesteneingabe, Mittelpunkt- und Fokuszoom. Beispielsweise ermöglichen Zoomgesten dem Anwender, unabhängig vom Systemfokus einen Fixationspunkt zu wählen. Der Mittelpunktzoom wiederum kann automatisch angewendet werden, wenn kein Element selektiert ist.

7.4.5 Empfehlungen zu Orientierungshilfen auf der taktilen Stiftplatte

Großflächige grafisch-taktile Displays erhöhen die Anzahl gleichzeitig wahrnehmbarer Informationen deutlich, was zu Orientierungsproblemen bei blinden Benutzern führen kann. Effektive Erkundungs- und Orientierungsfunktionalitäten sind somit essentiell. Im Folgenden werden einige Empfehlungen gegeben, wie die Interaktion auf taktilen Flächendisplays unterstützt werden kann.

- Die Unterteilung großer Anzeigeflächen in disjunkte Bereiche ermöglicht nicht nur eine konsistente Platzierung bestimmter Informationen, sondern bietet auch hilfreiche Orientierungspunkte.
- Vereinfacht-abstrakte Inhaltsdarstellungen kombiniert mit der Sprachausgabe können einen einfachen Überblick über das Layout von grafischen Anwendungen ermöglichen.
- Ansichten mit Brailleschrift erleichtern Braille-Lesern die inhaltliche Orientierung innerhalb von Anwendungen und Dokumenten.
- Mit Hilfe von Markierungen neben der Dokumentenausgabe (Strukturleiste als separater Bereich) kann ein zusätzlicher Überblick über die Struktur von Dokumenten vermittelt werden.
- Zoomfunktionen sollten dem Benutzer die Wahl des Zoommittelpunkts ermöglichen, um den Kontextverlust zu mindern. Ein fokuszentrierter Zoom kann dabei das Verschieben des relevanten Inhalts aus dem fühlbaren Bereich hinaus vermeiden.
- Die bereitgestellten Panningfunktionen sollten durch eine vorhersehbare Auswirkung auf die Darstellung die Orientierung des Benutzers unterstützen. Keine Überlappung der Inhalte kann durch das Umschalten der gesamten Anzeigefläche (Blättern) erreicht werden. Der aktuelle Kontext kann mittels kleiner Panningschritte (Verschieben) als Referenzpunkt erhalten bleiben. Für die Wahl der vertikalen Schrittweite empfiehlt sich dabei in textbasierten Ansichtsarten ein Vielfaches der Höhe einer Textzeile in Brailleschrift (im Idealfall eine einzelne Zeile, d. h. 5 Stifte).

- Der aktuelle Standpunkt innerhalb einer Anwendung bzw. eines Dokuments ist durch die Anzeige taktile Scrollbalken jederzeit erkennbar.
- Ein flächiger Übersichtsmodus (Minimap) ist hilfreich, um den aktuellen Ausschnitt innerhalb des Gesamtdokuments einzuordnen.
- Schnelle Animationen der Stifte (Blinken) sollten dazu verwendet werden, Inhalte hervorzuheben und so die Aufmerksamkeit des Benutzers auf sich zu lenken. Animationen müssen dabei eine bedarfsgerechte – in diesem Fall benutzergesteuerte – Laufzeitdauer haben, sodass sie durch den Anwender wahrgenommen werden können.
- Am Display platzierte verschiedenartige Bedienelemente können ebenfalls als Referenzpunkte dienen und so die Orientierung unterstützen.

Die Auflistung zeigt, dass großflächige taktile Geräte und deren Ausgabefläche dem Benutzer vor allem konkrete Referenzpunkte zur Verfügung stellen sollten, um ein schnelles Orientieren der Hände zu ermöglichen. Darüber hinaus sind vor allem erwartungskonforme Ausgaben sowie Hilfsmittel zum Erkennen des eigenen Standortes wichtig.

7.5 Zusammenfassung

Basierend auf der Hypothese, dass taktile Flächendisplays ein effektives und effizientes Bedienen von grafischen Benutzungsoberflächen ermöglichen, wurden in diesem Kapitel zunächst konkrete Forschungsfragen formuliert. Diese konnten anhand mehrerer Untersuchungen mit insgesamt 46 blinden und hochgradig sehbehinderten Menschen beantwortet werden. Als Resultat lassen sich die drei allgemeinen Fragen bzgl. der Gebrauchstauglichkeit wie folgt beantworten:

Forschungsfrage 1

Unterstützen die verschiedenen Ansichtsarten ein effektives und effizientes Arbeiten auf der Stiftplatte?

Die durchgeführten Studien konnten zeigen, dass die Ansichtsarten unterschiedliche Aufgaben unterstützen können. Darstellungen mit Brailleschrift können dabei insbesondere das Verständnis der Inhalte erleichtern, wohingegen layouterhaltende Ansichten eine Vermittlung der räumlichen Strukturen ermöglichen (vgl. Abschnitt 7.4.1). Das äquidistante Braille auf der Stiftplatte wurde zwar als gewöhnungsbedürftig empfunden, ist aber dennoch annähernd so effizient lesbar wie Texte auf einer herkömmlichen Braillezeile (vgl. Abschnitt 7.2.1). Grafische Inhalte sowie darin enthaltene Schwarzschrift können mit Hilfe der Originalansicht effektiv erkundet werden (vgl. Abschnitte 7.2.2 und 7.3). Dabei sind allerdings sehr feine Strukturen aufgrund der geringen Auflösung der Stiftplatte schwer darstellbar. Das Erkennen von räumlichen Zusammenhängen in der Symbolansicht kann die Zuordnung von Interaktionsobjekten unterstützen (vgl. Abschnitt 7.4.3). Die Überblicksansicht wiederum ist sehr hilfreich, um das Layout und den Aufbau einer GUI nachzuvollziehen (vgl. Abschnitt 3.2.4). Insgesamt ermöglichen die verschiedenen Ansichtsarten somit ein effektives Arbeiten in unterschiedlichen Anwendungsszenarien. Die Effizienz beim Umgang mit GUIs ist dabei allerdings stark abhängig vom Erfahrungsgrad der Probanden. Da dies wiederum ein umfangreiches Training der einzelnen Konzepte auf der Stiftplatte erfordert, konnte die Effizienz der Ansichten im Rahmen dieser Arbeit nur beispielhaft untersucht werden.

Forschungsfrage 2

Welche Erkundungsstrategien und Eingabemethoden eignen sich für die zweidimensionale Ausgabe der Stiftplatte?

Es konnte gezeigt werden, dass die Wahl der Eingabemethode einen Einfluss auf die Effektivität und Effizienz der Interaktion hat (vgl. Abschnitt 7.4.2). Im Vergleich zur Gesteneingabe oder der Verwendung von am Gerät verbauten Bedienelementen führten Eingaben über eine separate Tastatur zu einer deutlich langsameren Interaktion. Auf die angewandten Lesestrategien scheinen die verschiedenen Eingabemethoden jedoch keinen Einfluss zu haben (vgl. Abschnitt 7.4.2). Generell kann die zweihändige Interaktion allerdings zu einem effizienten Arbeiten führen, wenn die Hände eine Arbeitsteilung vornehmen (z. B. eine Hand liest, während die andere am Bedienelement auf die nächste Eingabe wartet). Erkundungsstrategien in zoombaren Ansichten waren prinzipiell unstrukturierter als die in Braille-basierten Ansichten (vgl. Abschnitt 7.4.1). Entsprechend des gängigen Leseflusses wurden vertikale Panningstrategien häufiger angewendet als horizontale.

Forschungsfrage 3

Welche Interaktionstechniken können die Effizienz beim Arbeiten auf der Stiftplatte steigern?

Orientierungshilfen, wie Minimap und Scrollbalken, sind hilfreich, um die eigene Position innerhalb einer Anwendung bzw. eines Dokuments zu identifizieren (vgl. Abschnitt 7.4.1). Obwohl die Minimap in der Untersuchung keinen messbaren Vorteil bzgl. Effizienz und Genauigkeit zeigen konnte, scheint sie ein geeignetes Hilfsmittel zu sein, um insbesondere in detaillierten Zoomstufen das flächige Orientieren zu unterstützen. Gerade für neuartige Interaktionswerkzeuge ist allerdings ein erhöhter Trainingsbedarf der Benutzer zu erwarten, um ein grundlegendes Verständnis für deren Nutzung aufzubauen. Anders verhält es sich mit der Strukturleiste. Mit derartigen linearisierten Ausgabeformen sind blinde Menschen bereits vertraut, sodass sie schnell als geeignetes Hilfsmittel zum Suchen von bestimmten Inhaltselementen identifiziert und verwendet wurde. Die Interaktionstechnik des Zoomens ist wiederum größtenteils neu für die Benutzergruppe. Aufgrund der verbesserten Kontextbewahrung erwies sich der entwickelte Fokuszoomansatz im Vergleich zum Mittelpunktzoom nicht nur als effizienter, sondern auch als weniger beanspruchend (vgl. Abschnitt 7.4.4). Insgesamt scheinen die bereitgestellten Interaktionstechniken auf der Stiftplatte geübten Benutzern durchaus eine zu herkömmlichen Hilfsmitteln vergleichbare Effizienz ermöglichen zu können (vgl. Abschnitt 7.4.3).

Die Studien konnten darüber hinaus umfangreiche Einblicke in die Interaktion auf der taktilen Stiftplatte liefern. Darauf aufbauend wurden konkrete Empfehlungen an die Darstellung sowie die notwendigen Bedientechniken von Flächendisplays formuliert.

Insbesondere bei sehr großen Anzeigeflächen ist eine Einteilung in nicht überlappende und taktil voneinander separierte Bereiche zu empfehlen. Diese sollten dem Benutzer eine *konsistente Platzierung bestimmter Informationen* bieten und damit wichtige Referenz- und Orientierungspunkte liefern. Die Trennung der einzelnen Bereiche sollte dabei jeweils durch eine erhabene Stiftreihe erfolgen. Die Anzahl und Anordnung der Bereiche sollte vom jeweiligen Anwendungsszenario abhängig gemacht werden. Für die Arbeit mit mehreren GUI-Fenstern empfiehlt sich die Verwendung eines komplexeren Fenstersystems, wie dem des HyperReaders (vgl. Abschnitt 3.2.1.1). Auf diese Weise ist nicht nur ein Überblick über wichtige Informationen des aktuellen Fensters (u. a. Titel und Ansichtsart), sondern auch über weitere geöffnete Fenster gewährleistet. Beim Arbeiten mit taktilen Grafiken ist es hingegen wichtig, einen möglichst großen Teil der Anzeigefläche zur Darstellung dieser zu verwenden. In diesem Fall ist die Reduzierung der Bereiche auf ein Minimum empfehlenswert. Meist genügt neben dem grafischen Inhalt im

Darstellungsbereich eine zusätzliche Textzeile in Brailleschrift (Detailbereich), um zusätzliche Informationen zu den einzelnen Elementen einer Grafik auszugeben. Das Fenstersystem für ein taktiles Flächendisplay sollte demnach eine flexible Gestaltung der Ausgabe ermöglichen.

Des Weiteren können verschiedene Arten der Inhaltspräsentation unterschiedliche Anwendungsszenarien unterstützen. Für die Arbeit auf einem taktilen Flächendisplay sind neben textbasierten vor allem auch grafische *Visualisierungen* notwendig. Die Mindestanforderung an eine geeignete Ausgabe ist somit die Bereitstellung einer linearisierten Ansicht in Brailleschrift zum effizienten Lesen der Inhalte sowie eine Ansicht, welche dem Benutzer Zugang zur originalen Pixeldarstellung einer Grafik ermöglicht. Darüber hinaus kann durch eine semi-grafische Ausgabe die Orientierung in GUIs erleichtert werden. Dabei sollten Inhalte in Brailleschrift präsentiert werden und zusätzlich das Layout der Anwendung möglichst originalgetreu erhalten bleiben. Ansichten ohne Braille erfordern die Ergänzung durch auditive Ausgaben. Durch einen audio-taktilen Ansatz lassen sich somit auch sehr abstrakte Ansichten nutzen. Diese zielen weniger auf die Erkundung der Inhalte ab, sondern vielmehr auf eine einfache Vermittlung räumlicher Zusammenhänge.

Unabhängig von der gewählten taktilen Visualisierungsform sind geeignete *Zooming- und Panningfunktionalitäten* wichtig, um dem Benutzer das Erkunden und Orientieren in einer flächigen taktilen Ausgabe zu ermöglichen. Wichtig dabei ist, dass die bereitgestellten Funktionen den Kontext nicht zu stark verändern. Das heißt, es muss für den Anwender vorhersehbar sein, wie sich eine Erkundungsoperation auf die Darstellung auswirkt (Prinzip der Erwartungskonformität). Insbesondere nach dem Zoomen können Probleme beim Wiedererkennen der Inhalte auftreten. Empfehlenswert ist deshalb die Verwendung eines klar definierten Zoommittelpunkts, welchen der Benutzer im Idealfall selber festlegen kann – entweder durch eine Zeigegeste oder durch Wahl des Fokus. Im Gegensatz zur Nutzung der Mitte der taktilen Anzeigefläche als Referenzpunkt kann der Fokuszoom das Verschieben des fokussierten Inhalts in den nicht-fühlbaren Bereich vermeiden und sollte somit dem klassischen Mittelpunktzoom vorgezogen werden. Das Orientieren kann weiterhin durch die Bereitstellung unterschiedlicher Panningfunktionen unterstützt werden. Während das Umschalten einer gesamten Anzeigefläche (Blättern) dafür sorgt, dass keine Überlappung der Inhalte auftritt und somit ein effizienteres lineares Erkunden zulässt, ermöglicht ein kleiner Panningschritt (Verschieben) die Beibehaltung des aktuellen Kontext als Referenzpunkt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Orientierung ist es, dass der Benutzer jederzeit seinen *aktuellen Standpunkt* innerhalb einer Anwendung bzw. eines Dokuments erkennen kann. Taktile Scrollbalken sind hierfür als Hilfe bereitzustellen. Zudem kann ein flächiger Übersichtsmodus (Minimap) hilfreich sein, um die Einordnung des aktuellen Ausschnitts innerhalb des Gesamtdokuments zu erleichtern. Das *Blinken* (Auf- und Abbewegen) von Stiften stellt dabei ein wichtiges Mittel dar, um die Aufmerksamkeit des Benutzers zu steuern. Um wahrnehmbar zu sein, muss die Laufzeit derartiger Animationen allerdings entweder dauerhaft oder benutzergesteuert sein. Abseits der Minimap ist das taktile Blinken auch zur Markierung des fokussierten Elements geeignet. Allerdings ist zu beachten, dass insbesondere kleine Blinkflächen auf großen Displays schwer wahrnehmbar sind. Aus diesem Grund ermöglicht das aktuelle System das manuelle Zentrieren des Fokus in der Ausgabefläche. Zukünftige Lösungen sollten darüber hinaus weitere Unterstützung für das Auffinden des Fokus anbieten, ohne das aktuelle Referenzsystem zu beeinflussen – beispielsweise in Form einer nicht-visuellen Führung wie dies bei Force Feedback Geräten üblich ist.

Auch das Auffinden von speziellen Inhaltselementen kann in einer nicht-linearen Ausgabe schwierig und ineffizient sein. Um die Orientierung diesbezüglich zu unterstützen, können entsprechende Markierungen neben der Ausgabe eines Dokuments hilfreich sein. In dieser Arbeit wurde dazu lediglich eine vertikale Strukturleiste untersucht. Inwieweit eine zusätzliche horizontale Leiste den Suchvorgang weiter optimieren kann, ist bisher unklar. Im Sinne eines Koordinatensystems scheint dies allerdings ein hilfreicherer Ansatz, um die *strukturierte Exploration* auf großen taktilen Displays weiter zu unterstützen. Insbesondere für den Zugang zu Grafiken ist neben einer freien audio-taktilen Erkundung mittels Zeigegeesten auch die Bereitstellung linearisierter Erkundungspfade (z.B. Anspringen der einzelnen Objekte in ihrer natürlichen

Reihenfolge mit der Tabulatortaste) wichtig, um ein deterministisches Erschließen aller Elemente sicherzustellen.

Ein direkter Vergleich mit herkömmlichen Screenreadern und Braillezeilen konnte zeigen, dass die Interaktion auf einer taktilen Stiftplatte für geübte Benutzer genauso effizient sein kann. Obwohl der Vergleich lediglich mit einer begrenzten Anzahl an blinden Probanden durchgeführt werden konnte, ist dies ein erster Schritt, die Verwendung taktiler Flächendisplays als Ersatz einzelner Braillezeilen in Erwägung zu ziehen. Die linearisierte Ausgabe traditioneller Screenreader kann dabei leicht durch die Braillexausgabe des HyperReaders im Detailbereich (vgl. Abschnitt 3.2.1.1) ersetzt werden. Auf diese Weise lassen sich herkömmliche textbasierte und neuartige grafische Ausgaben auf einem Display miteinander kombinieren. Die so erzeugte Verschmelzung bekannter Arbeitsweisen blinder Menschen mit der zusätzlichen interaktiven Flächigkeit von Informationen kann nicht nur beim Erlernen solcher Systeme hilfreich sein, sondern auch den Zugang zu ansonsten schwer zugänglichen Inhalten vereinfachen. Wie im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden konnte, kann eine zweidimensionale Ausgabe insbesondere das Zuordnen zusammengehöriger Elemente sowie das Prüfen von Eingaben in Formularen oder von Dokumentenformatierungen unterstützen.

Wichtig für eine effektive Interaktion auf taktilen Flächendisplays sind auch die zur Verfügung gestellten *Eingabemethoden*. Dabei hat sich gezeigt, dass die Kombination von am Gerät verbauten intuitiven Bedienelementen mit den Möglichkeiten der Gesteneingabe am effizientesten ist. Auf diese Weise lassen sich lange Homingwege, wie sie beim Interagieren mit einer zusätzlichen Tastatur notwendig wären, vermeiden. Auf die *Lesestrategien* der Benutzer haben die verschiedenen Eingabemethoden allerdings keinen Einfluss. Stattdessen konnte beobachtet werden, dass sich die Probanden meist ihrer herkömmlichen Strategien bedienen. Dies zeigt umso mehr, wie wichtig die Einbeziehung bekannter Arbeitsweisen beim Entwickeln geeigneter Interaktionsmechanismen auf taktilen Flächendisplays ist. Zusätzlich können adäquate Schulungen dazu beitragen, die charakteristischen Interaktionsmöglichkeiten zu vermitteln. Besonderer Wert sollte dabei auf die Arbeitsteilung der beiden Hände gelegt werden, da zweihändig asynchrone Techniken das effiziente Arbeiten auf der Stiftplatte unterstützen können.

Zusammenfassung und Ausblick

Für eine gleichberechtigte und eigenständige Teilhabe an der modernen digitalisierten Welt stehen blinden Menschen zahlreiche Hilfsmittel zur Verfügung. Herkömmliche Screenreader und Braillezeilen erlauben dabei einen effizienten Zugang zu den textuellen Inhalten einer grafischen Benutzungsoberfläche. Sollen darüber hinaus Sachverhalte bildlich vermittelt werden, so kommen häufig taktile Grafiken zum Einsatz. Aufgrund der analogen Natur dieser Materialien ist deren Verbreitung und Veränderung dabei meist sehr umständlich. Neuartige taktile Flächendisplays können hierfür eine geeignete Lösung darstellen, da sie blinden Menschen auch den interaktiven Zugang zu grafischen Darstellungen ermöglichen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die flächigen Brailledisplays der Firma Metec AG – das BrailleDis 9000 sowie dessen Nachfolger das BrailleDis 7200 (auch als Stiftplatten bezeichnet) – dazu verwendet, grafische Benutzungsoberflächen zweidimensional zu präsentieren. Um blinden Benutzern dabei einen adäquaten Zugang zu den Informationen der GUI zu ermöglichen, muss die taktile Ausgabe nicht nur das Lesen von Texten und Erkunden von Grafiken erlauben, sondern auch entsprechende Orientierungshilfen bereitstellen. Hierfür wurde ein *taktiler Fenstersystem* umgesetzt, welches basierend auf Schiewe et al. [SKNW09] dem Benutzer eine konsistente Platzierung der Informationen innerhalb von disjunkten Bereichen sowie die Ausgabe in verschiedenen taktilen Informationsvisualisierungen zur Verfügung stellt (siehe Kapitel 3).

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Effektivität und Effizienz beim Zugang zu grafischen Benutzungsoberflächen auf der Stiftplatte zu überprüfen. Um eine systematische Evaluierung der relevanten Aspekte zu ermöglichen, wurde zunächst eine *Taxonomie zur taktilen Interaktion* erarbeitet (Kapitel 4). Der Gestaltungsraum beinhaltet dabei insbesondere den Benutzer in Form seiner Intention, das Gerät in Form seiner technischen Spezifikation sowie die eigentliche Interaktion. Speziell für taktile Benutzungsoberflächen spielen hierfür neben der Ein- und Ausgabe auch die Handbewegungen des Benutzers eine wichtige Rolle. Zur Formalisierung der Benutzerintention wurden darüber hinaus die Elementaraufgaben der ISO 9241-910 [ISO11b] an die speziellen Eigenschaften der taktilen Interaktion angepasst.

Zur Untersuchung der Hauptthese dieser Arbeit („Auf einem flächigen Brailledisplay ist die effektive und effiziente Bedienung von grafischen Benutzungsoberflächen möglich.“) wurden mehrere Benutzerstudien mit insgesamt 46 blinden und hochgradig sehbehinderten Menschen durchgeführt. Basierend auf der erarbeiteten Taxonomie wurden relevante Untersuchungsaspekte identifiziert und entsprechende *Forschungsfragen*, die sich aus der Hauptthese ableiten lassen, formuliert (Kapitel 7). Diese beziehen die Kriterien der Gebrauchstauglichkeit nach ISO 9241-11

[ISO98] mit ein und betreffen neben der Betrachtung der Ausgabe in Form verschiedener taktiler Ansichtsarten (Fragenblock 1) sowie der Eingabe und Erkundung (Fragenblock 2) auch Aspekte zur Effizienz konkreter Interaktionstechniken (Fragenblock 3).

Konkret wurden folgende *empirische Untersuchungen* durchgeführt, welche jeweils einzelne Forschungsfragen adressieren:

1. Vorstudie zur Betrachtung konkreter Benutzerinteraktionen sowie der Arbeit mit den verschiedenen Ansichtsarten am Beispiel von PowerPoint (Abschnitt 3.2.4)
2. Vorstudie zur allgemeinen Bewertung der Gebrauchstauglichkeit der Konzepte des taktilen Fenstersystems (Abschnitt 3.3)
3. Ergonomie-Studie zur Untersuchung intuitiver und ergonomischer Bedienelemente zum Zwecke der Überarbeitung des Gehäusedesigns der Stiftplatte (Kapitel 6)
4. Braille-Lesestudie zur Beurteilung der Effizienz beim Lesen von äquidistantem Braille auf der Stiftplatte (Abschnitt 7.2.1)
5. Schwarzschrift-Studie zur Bewertung der Effektivität der grafisch-pixelbasierten Originalansicht beim Erkennen taktiler Schwarzschriftbuchstaben sowie grafischer Formatierungen (Abschnitt 7.2.2)
6. Studien zum Grafikeditor sowie zu taktilen Füllmustern zur Beurteilung der Effektivität der Originalansicht beim Arbeiten mit taktilen Grafiken (Abschnitt 7.3)
7. Lokalisierungsstudie zur Bewertung der Effektivität bzw. Effizienz der einzelnen Ansichtsarten und spezieller Orientierungshilfen (Scrollbalken, Minimap und Strukturleiste) sowie zur Identifizierung von Erkundungsstrategien beim Suchen nach GUI-Elementen (Abschnitt 7.4.1)
8. PDF-Studie zum Vergleich der Effektivität und Effizienz verschiedener Eingabemodalitäten sowie zur Effektivitäts-Beurteilung der semi-grafisch räumlichen Ausgabe in der Symbolansicht (Abschnitt 7.4.2)
9. PDF-Pilotstudie zum direkten Effizienzvergleich zwischen der Interaktion mit der Stiftplatte und der Verwendung eines herkömmlichen Screenreaders am Beispiel des Ausfüllens eines PDF Fragebogens (Abschnitt 7.4.3)
10. Zoom-Studie zum Effizienzvergleich von zwei nicht-visuellen Zoomansätzen auf der Stiftplatte (Abschnitt 7.4.4)

Die Ergebnisse der einzelnen Studien erlauben letztendlich das Aufstellen konkreter *Empfehlungen* zur Ergonomie der Stiftplatte (siehe Abschnitt 6.5), zur Anzeige von textuellen Inhalten (Abschnitt 7.2.4), zur Darstellung und Interaktion mit grafischen Inhalten (Abschnitt 7.3.4) sowie zu Orientierungshilfen (Abschnitt 7.4.5).

Die wesentlichen Beiträge der vorliegenden Arbeit betreffen demzufolge einerseits die Erarbeitung einer Taxonomie zur taktilen Interaktion, andererseits die konkreten Empfehlungen zur Umsetzung von Benutzungsoberflächen auf flächigen Brailledisplays. Die Taxonomie kann Entwickler bei der systematischen Gestaltung und Evaluation von taktilen Benutzungsoberflächen unterstützen. In Verbindung mit den gegebenen Empfehlungen kann die Arbeit dabei helfen, effektive und effiziente taktile Benutzungsoberflächen für grafisch-taktile Displays zu entwickeln.

Das implementierte und evaluierte Fenstersystem ließ sich neben der Integration im HyperReader bereits erfolgreich auf andere Anwendungen für die Stiftplatte, wie den taktilen Grafikeditor (vgl. Abschnitt 7.3.1) oder ein virtuelles Klassenzimmer [KL15], übertragen. Ebenso wurde das im Rahmen der Ergonomie-Studie konzipierte Design zur Erweiterung der Stiftplatte um intuitive Bedienelemente (vgl. Kapitel 6) als Vorlage für die Entwicklung des BrailleDis 7200 durch die Metec AG verwendet.

Zusammengefasst können folgende Thesen aus den Ergebnissen abgeleitet werden:

These 1

Verschiedene Ansichtsarten können das effektive und effiziente Arbeiten auf der Stiftplatte unterstützen.

Die folgenden Darstellungsarten können dem Benutzer dabei helfen, unterschiedliche Aufgaben zu lösen:

1. Textuell-linearisierte Ansichten mit Brailleschrift erleichtern das Verständnis der Inhalte.
2. Semi-grafische Ausgaben, die Braille mit taktilen Widgets kombinieren, können das effektive Arbeiten innerhalb räumlicher Inhaltsstrukturen begünstigen.
3. Grafisch-abstrakte Darstellungen können in Kombination mit audio-taktilen Textausgaben einen schnellen Überblick über räumliche Strukturen zur Verfügung stellen.
4. Grafisch-pixelbasierte Ansichten erlauben ein effektives Arbeiten mit grafischen Inhalten.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten die verschiedenen Ansichtsarten auf der Stiftplatte nur innerhalb beispielhafter Anwendungsszenarien untersucht werden. Unter anderem bleibt unklar, ob die semi-grafische Ausgabe auch ein effektives Bedienen von Menüstrukturen besser unterstützen kann als eine textuell-linearisierte Ansicht. Zudem wurde die Nutzung grafisch-abstrakter Ausgaben lediglich im Kontext des Aufbaus grafischer Benutzungsoberflächen näher untersucht. Auch hier bleibt offen, inwieweit sie darüber hinaus auch die audio-taktile Erkundung von Grafiken unterstützen kann.

These 2

Die flächige Interaktion auf der Stiftplatte erfordert vom Benutzer die Erweiterung seiner konventionellen Erkundungs- und Eingabestrategien.

1. *Die Wahl der Eingabemethode hat Einfluss auf die Effektivität und Effizienz der Interaktion, jedoch nicht auf die angewendete Lesestrategie.*
Eingaben über eine separate Tastatur führen aufgrund der längeren Homingwege zu deutlich langsameren Interaktionen als die Gesteneingabe oder die Eingabe über direkt am Gerät verbaute Bedienelemente. Die angewandte Lesestrategie wird hingegen eher durch die Gewohnheiten des Benutzers bestimmt.
2. *Zoombare Ansichtsarten erschweren das strukturierte Erkunden der Inhalte.*
Im Gegensatz zu nicht zoombaren Ansichtsarten, bei denen die Erkundung linearisierbar ist, wird der Suchvorgang nach einer Zoomoperation häufig unterbrochen. Der Grund hierfür besteht in der Veränderung des dargestellten Kontexts und der daraus resultierenden Notwendigkeit, die aktuelle Suchstrategie neu zu bewerten.
3. *Durch eine zweihändige Interaktion, bei der die Hände eine Arbeitsteilung vornehmen, kann die Effizienz beim Arbeiten auf der Stiftplatte gesteigert werden.*
Handbewegungen können nicht nur durch die Wahl der Eingabemodalität, sondern auch durch eine entsprechende Arbeitsteilung der beiden Hände reduziert werden. Beispielsweise konnte beobachtet werden, wie Probanden mit einer Hand lesen während die andere Hand auf dem Bedienelement verbleibt. Gerade beim kurzen Wechsel von Lese- und Eingabephase kann so ein deutliches Zeitersparnis erreicht werden.

Insbesondere die Eingabestrategien sind stark abhängig vom verwendeten Gerät. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden vorrangig die Benutzerinteraktionen auf dem BrailleDis 7200 beobachtet. Dieses Gerät bietet allerdings eine vergleichsweise hohe Anzahl an intuitiven Bedienelementen, um dem Benutzer ein von der Tastatur unabhängiges Arbeiten zu ermöglichen.

Andere Geräte besitzen unter Umständen gar keine integrierten Eingabemöglichkeiten, was zu komplett anderen Erkundungs- und Eingabestrategien führen könnte.

These 3

Die Bereitstellung von geeigneten Interaktionstechniken zur Unterstützung der Orientierung kann die Effizienz steigern.

1. *Für blinde Benutzer neuartige Orientierungshilfen, wie die Minimap, erfordern ein grundlegendes Verständnis der zweidimensionalen Ausgabe von GUIs.*
Entgegen der Erwartung konnte die Minimap keinen messbaren Effizienzvorteil gegenüber den Scrollbalken erzielen. Um ein effektives flächiges Orientieren innerhalb der Minimap zu erreichen, ist ein erhöhter Trainingsbedarf des Anwenders notwendig.
2. *Mit linearisierten Orientierungshilfen, wie der Strukturleiste, sind blinde Benutzer bereits vertraut, sodass diese effektiv verwendet werden.*
Die Strukturleiste kann das Erkunden auf der Stiftplatte erleichtern, indem sie einen schnellen Anhaltspunkt darüber liefert, ob sich das gesuchte Objekt innerhalb des sichtbaren Bereichs befindet und es sich somit für den Benutzer lohnt, die Darstellungsfläche genauer zu inspizieren.
3. *Zoomansätze, die den Kontext nach dem Zoomen möglichst beibehalten, sind effizienter und weniger beanspruchend.*
Im Idealfall kann der Benutzer selbst bestimmen, wo sich der Mittelpunkt des Zoomings befindet. Neben der Verwendung von Gesteneingaben, mit denen der Mittelpunkt direkt bestimmt werden kann, ist der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Fokuszooom ein möglicher Lösungsansatz, um dies zu realisieren.

Abhängig vom konkreten Einsatzzweck kann die Bereitstellung weiterer Hilfsmittel und Interaktionstechniken notwendig sein. Besonders für sehr spezielle Anwendungsgebiete der taktilen Stiftplatte, welche im Rahmen der Arbeit nicht betrachtet wurden, sind eigenständige Untersuchungen mit blinden Benutzern notwendig. Zu diesen Anwendungsgebieten zählen beispielsweise das interaktive Arbeiten mit Karten [ZW10], das eigenständige taktile Zeichnen [Bor16] oder die Interaktion in komplexen Lehr-Lern-Szenarien unter Einbezug synchroner Kommunikationskanäle [KL15].

Insgesamt konnten die Untersuchungen dazu beitragen, die Hauptthese der vorliegenden Arbeit zu bestätigen. *Mit Hilfe der verschiedenen Ansichtsarten und der individualisierbaren Bereiche lassen sich grafische Benutzungsoberflächen auf der Stiftplatte effektiv und effizient bedienen.* Innerhalb der Benutzerstudien wurde allerdings auch deutlich, dass ein umfangreiches Training notwendig ist, um die einzelnen Konzepte adäquat zu vermitteln. Zudem bedingt die zweidimensionale Ausgabe vor allem in den grafischen Ansichtsarten ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen beim Benutzer. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, ermöglichen flächige Brailledisplays allerdings nicht nur das interaktive Erkunden von textuellen und grafischen Inhalten, sondern darüber hinaus auch ein tieferes Verständnis für den Aufbau grafischer Anwendungen. Dies wiederum kann einen positiven Effekt auf die Kommunikation mit sehenden Menschen haben.

Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Personen der Zielgruppe wurden die Studien innerhalb dieser Arbeit teilweise mit einer sehr kleinen Anzahl an Probanden durchgeführt¹. Zudem waren die Teilnehmer der Untersuchungen auch immer an Technik interessierte Personen mit meist guten Braillekenntnissen. Inwieweit andere blinde Menschen solche neuartigen Technologien akzeptieren oder Personen, die kein Braille beherrschen, auf der Stiftplatte interagieren würden, bleibt unklar. Dies erschwert zwar die Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse sowie der daraus abgeleiteten Thesen, allerdings werden zumindest Tendenzen sichtbar.

¹ Der Stichprobenumfang pro Untersuchung lag zwischen zwei und 20 blinden bzw. hochgradig sehbehinderten Personen.

Darüber hinaus konnten im Rahmen dieser Arbeit natürlich nicht alle Aspekte der taktilen Interaktion genau betrachtet werden. Beispielsweise sind nicht nur Verbesserungen der taktilen Renderingalgorithmen notwendig, sondern auch weitere Untersuchungen im Bereich der Darstellung von taktilen Grafiken, um die Ausgabe weiter zu optimieren. In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass man blinde Menschen nicht darin unterschätzen sollte, wie gut sie besonders kleine Gegenstände sowie Braillezeichen innerhalb von Grafikelementen identifizieren können. Auf der anderen Seite sollte jedoch die Schwierigkeit beim Zusammensetzen der wahrgenommenen Einzelheiten zu einem Gesamtbild ebenfalls nicht unterschätzt werden. Genau hier könnte die Minimap ein vielversprechender Ansatz sein. Um die tatsächliche Eignung dieser flächigen Orientierungshilfe für blinde Menschen bewerten zu können, sind weitere Evaluationen mit ausreichend geschulten Probanden notwendig. Dabei ist nicht nur interessant, ob sich die Benutzer selber verorten können, sondern auch inwieweit ein Bezug zu anderen Elementen herstellbar ist.

Das Fenstersystem ermöglicht mit Hilfe der Bereiche zwar eine konsistente Strukturierung der Informationen, allerdings ist die Informationsdichte für blinde Benutzer dennoch ungewohnt hoch. Im Rahmen der Untersuchungen wurde diesbezüglich auch die Wichtigkeit von fixen Referenzpunkten deutlich. Neben den Bereichsgrenzen sind dafür insbesondere die Ränder der Anzeigefläche sehr hilfreich, da sie ein besonders schnelles Auffinden von Informationen ermöglichen. Um vor allem ungeübte Anwender beim Erkunden von grafischen Inhalten auf der Stiftplatte weiter zu unterstützen, sollten zukünftig geeignete Führungskonzepte entwickelt werden. In einer von der Autorin betreuten Arbeit [Ger14] wurde bereits ein erster Ansatz zur Führung des Benutzers innerhalb von einfachen Balken- und Zustandsübergangsdigrammen erarbeitet. Neben derartigen Konzepten, bei denen das Gesamtbild schrittweise und durch den Anwender gesteuert aufgebaut wird, könnte eine Führung auch dazu verwendet werden, den Benutzer bei der Suche nach dem Fokus zu unterstützen. Die taktile Führung ist dabei laut Kurze [Kur98] effizienter als die akustische, da hierfür keine Ohr-Hand Koordination und der damit verbundene kognitive Aufwand zum Bewegen der Hand in die vorgesehene Richtung notwendig ist. Die Forschung von Power et al. [PGD06] bzgl. der Vorhersage von Erkundungspfaden auf der Stiftplatte könnte ein vielversprechender Ansatzpunkt für eine derartige Führung sein.

Aufgrund der verwendeten Technologien sind aktuell verfügbare flächige Brailledisplays, die eine zu herkömmlichen Braillezeilen vergleichbare Darstellungsfrequenz ermöglichen, sehr teuer. Aus diesem Grund sind derartige Displays bisher noch nicht verbreitet bei blinden Anwendern. Um möglichst vielen Benutzern den Zugang zu grafikfähigen Brailledisplays und den damit verbundenen Vorteilen zu eröffnen, sollten zukünftige Entwicklungen vor allem kostengünstige Geräte adressieren. Dieser Trend zeigte sich bereits auf der diesjährigen SightCity² (Mai 2016), wo neben dem neuen deutlich kleineren Stiftplattenmodell der Metec AG (Hyperflat) auch das auf Magnetismus basierende Tactonom Display (vgl. Abschnitt 2.5.3) vorgestellt wurde. Bei der Konzeption entsprechender Interaktionstechniken und Anwendungen für diese Geräte muss neben der Größe der taktilen Anzeigefläche auch die notwendige Zeit zum Aufbau der Ausgabe beachtet werden. Diese Arbeit hat sich mit relativ großflächigen Geräten beschäftigt, die einen sehr schnellen Bildaufbau und damit einen hochgradig interaktiven Zugang zu grafischen Benutzungsoberflächen ermöglichen. Die untersuchten Interaktionstechniken und vorgestellten Konzepte können bei deutlich kleineren oder langsameren Geräten eventuell zu anderen Ergebnissen führen. Beispielsweise kann die Aufteilung in mehrere Bereiche für kleine Displays weniger zielführend sein. Die Aufmerksamkeitssteuerung mittels blinkender Stifte ist hingegen für langsame Geräte wahrscheinlich kaum möglich. In Kombination mit herkömmlichen einzeiligen Braillezeilen könnten jedoch auch langsame taktile Flächendisplays blinden Benutzern den interaktiven Zugriff auf grafische Inhalte erleichtern und somit die Inklusion in der stark visuell geprägten Welt weiter voran treiben.

Letzten Endes wurde im Rahmen der Untersuchungen deutlich, dass blinde Benutzer durchaus Interesse an einem taktilen Zugang zu Grafiken besitzen. Selbst wenn der Anfang schwierig und der Weg zu einer effizienten Bedienung steinig ist, wurde immer wieder deutlich, dass blinde

² größte internationale Fachmesse für Blinden- und Sehbehinderten-Hilfsmittel, URL: <http://www.sightcity.net/>

Menschen auch den sehr hohen Lernaufwand nicht scheuen. Für den Praxiseinsatz sind allerdings neben bezahlbaren Geräten und einer hohen Verlässlichkeit auch schnelle Reaktionszeiten des Systems notwendig, um eine zufriedenstellende Bedienung zu gewährleisten.

Literaturverzeichnis

- [ADPS⁺09] Abu Doush, Iyad ; Pontelli, Enrico ; Simon, Dominic ; Son, Tran C. ; Ma, Ou: Making Microsoft Excel: multimodal presentation of charts. In: *Proceedings of the 11th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility ACM*, 2009, S. 147–154
- [Aga00] Agah, Arvin: Human interactions with intelligent systems: research taxonomy. In: *Computers & Electrical Engineering* 27 (2000), Nr. 1, S. 71–107
- [Alb06] Albert, Peter: Math Class: An application for dynamic tactile graphics. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang L. (Hrsg.) ; Karshmer, Arthur I. (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2006 (Lecture Notes in Computer Science 4061), S. 1118–1121
- [Alb08] Albert, Kristin: *Konzeption und Entwicklung eines taktilen User Interface*, Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, Großer Beleg, 2008
- [All83] Allen, James F.: Maintaining knowledge about temporal intervals. In: *Communications of the ACM* 26 (1983), Nr. 11, S. 832–843
- [Art12] Arthur, Charles: iPad Touch? How Senseg's haptic system gives touchscreens texture. In: *The Guardian* (2012), März
- [AS94] Akamatsu, Motoyuki ; Sato, Sigeru: A multi-modal mouse with tactile and force feedback. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 40 (1994), Nr. 3, S. 443–453
- [AZ97] Accot, Johnny ; Zhai, Shumin: Beyond Fitts' law: models for trajectory-based HCI tasks. In: *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems ACM*, 1997, S. 295–302
- [Ban10] Banter, Bruce: Touch screens and touch surfaces are enriched by haptic force-feedback. In: *Information Display* 26 (2010), Nr. 3, S. 26–30
- [Bau26] Bauer, Josef I.: *Johann Wilhelm Klein und die historischen Grundlagen der deutschen Blindenpädagogik*. St. Otto-Verlag, 1926. – URL: https://archive.org/stream/johannwilhelmkle00jose/johannwilhelmkle00jose_djvu.txt
- [BB75] Berlá, Edward P. ; Butterfield, Lawrence H.: Teachers' Views on Tactile Maps for Blind Students: Problems and Needs. In: *Education of the Visually Handicapped* 7 (1975), Nr. 4, S. 116–118
- [BB77] Berlá, Edward P. ; Butterfield, Lawrence H.: Tactual distinctive features analysis: Training blind students in shape recognition and in locating shapes on a map. In: *The Journal of Special Education* 11 (1977), Nr. 3, S. 335–346
- [BB94] Bellik, Yacine ; Burger, Dominique: Multimodal interfaces: new solutions to the problem of computer accessibility for the blind. In: *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems ACM*, 1994, S. 267–268

- [BBD⁺13] Buzzi, Maria C. ; Buzzi, Marina ; Donini, Francesco ; Leporini, Barbara ; Paratore, Maria T.: Haptic reference cues to support the exploration of touchscreen mobile devices by blind users. In: *Proceedings of the Biannual Conference of the Italian Chapter of SIGCHI ACM*, 2013, S. 28
- [BBDR10] Borodin, Yevgen ; Bigham, Jeffrey P. ; Dausch, Glenn ; Ramakrishnan, I.V.: More than meets the eye: a survey of screen-reader browsing strategies. In: *Proceedings of the 2010 International Cross Disciplinary Conference on Web Accessibility (W4A)* ACM, 2010, S. 13
- [BBHD10] Buscher, Georg ; Biedert, Ralf ; Heinesch, Daniel ; Dengel, Andreas: Eye tracking analysis of preferred reading regions on the screen. In: *CHI'10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* ACM, 2010, S. 3307–3312
- [BBV90] Boyd, Lawrence H. ; Boyd, Wesley L. ; Vanderheiden, Gregg C.: The Graphical User Interface Crisis: Danger and Opportunity. In: *Journal of Visual Impairment & Blindness* 84 (1990), Nr. 10, S. 496–502
- [BBV91] Boyd, Lawrence H. ; Boyd, Wesley L. ; Vanderheiden, Gregg C.: Graphics-based computers and the blind: Riding the tides of change. In: *CSUN Technology and Persons with Disabilities Conference Proceedings*, 1991, S. 20–23
- [BCC⁺11] Brayda, Luca ; Campus, Claudio ; Chellali, Ryad ; Rodriguez, Guido ; Martinoli, Cristina: An investigation of search behaviour in a tactile exploration task for sighted and non-sighted adults. In: *CHI'11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* ACM, 2011, S. 2317–2322
- [BDD94] Bernsen, Niels O. ; Dybkjær, Hans ; Dybkjær, Laila: Wizard of oz prototyping: How and when. In: *Proceedings of CCI Working Papers Cognitive Science and HCI* (1994)
- [BDW⁺03] Bloomfield, Aaron ; Deng, Yu ; Wampler, Jeff ; Rondot, Pascale ; Harth, Dina ; McManus, Mary ; Badler, Norman: A taxonomy and comparison of haptic actions for disassembly tasks. In: *Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2003* IEEE, 2003, S. 225–231
- [BE00] Blenkhorn, Paul ; Evans, Gareth: Architecture and requirements for a Windows screen reader. In: *IEEE Seminar on Speech and Language Processing for Disabled and Elderly People (Ref. No. 2000/025)*, 2000, S. 1/1–1/4
- [BE01] Blenkhorn, Paul ; Evans, David G.: The architecture of a Windows screen reader. In: *Assistive Technology – Added Value to the Quality of Life* (2001), S. 119–123
- [Ben82] Bentzen, Billie L.: Tangible graphic displays in the education of the blind persons. In: Schiff, William (Hrsg.) ; Foulke, Emerson (Hrsg.): *Tactual Perception: a Sourcebook*. Cambridge University Press, 1982, S. 387–404
- [Ber72] Berlá, Edward P.: Behavioral Strategies and Problems in Scanning and Interpreting Tactual Displays. In: *New Outlook for the Blind* 66 (1972), Nr. 8, S. 277–286
- [Ber81] Berlá, Edward P.: Tactile scanning and memory for a spatial display by blind students. In: *The Journal of Special Education* 15 (1981), Nr. 3, S. 341–350
- [BH99] Bowman, Doug A. ; Hodges, Larry F.: Formalizing the design, evaluation, and application of interaction techniques for immersive virtual environments. In: *Journal of Visual Languages & Computing* 10 (1999), Nr. 1, S. 37–53
- [BIT11] *Verordnung zur Schaffung barrierefreier Informationstechnik nach dem Behindertengleichstellungsgesetz (Barrierefreie-Informationstechnik-Verordnung – BITV 2.0)*. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/bitv_2_0/BJNR184300011_1.html, 2011. – letzter Zugriff am 03.06.2016

- [BJTE04] Baptiste-Jessel, Nadine ; Tornil, Bertrand ; Encelle, Benoit: Using SVG and a force feedback mouse to enable blind people to access Graphical Web based documents. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang (Hrsg.) ; Burger, Dominique (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2004 (Lecture Notes in Computer Science 3118), S. 228–235
- [BKRS70] Bliss, James C. ; Katcher, Michael H. ; Rogers, Charles H. ; Shepard, Raymond P.: Optical-to-tactile image conversion for the blind. In: *IEEE Transactions on Man-Machine Systems* 11 (1970), Nr. 1, S. 58–65
- [Bli09] Blindenmuseum Berlin: *Schrift sehen und fühlen*. URL: <http://www.blindenmuseum-berlin.de/ausstellung/schrift-sehen-und-fuehlen.html>, 2009. – letzter Zugriff am 28.06.2016
- [Bor42] Boring, Edwin G.: *Sensation and Perception in the History of Experimental Psychology*. Appleton-Century-Crofts, 1942
- [Bor14] Bornschein, Jens: BrailleIO – a tactile display abstraction framework. In: *Proceedings of the International Workshop on Tactile/Haptic User Interfaces for Tabletops and Tablets*, 2014
- [Bor16] Bornschein, Jens: Digital and tactile drawing-system for blind users. In: *ACM SIGACCESS Accessibility and Computing* (2016), Nr. 114, S. 11–15
- [BP13] Barde, CR ; Purkar, KT: A dynamic touch screen interface like Tactus for mobile and automotive devices. In: *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 3 (2013), Nr. 4, S. 351–356
- [BP14] Bornschein, Jens ; Prescher, Denise: Collaborative tactile graphic workstation for touch-sensitive pin-matrix devices. In: *Proceedings of the International Workshop on Tactile/Haptic User Interfaces for Tabletops and Tablets*, 2014
- [BPIH10] Bau, Olivier ; Poupyrev, Ivan ; Israr, Ali ; Harrison, Chris: TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces. In: *Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* ACM, 2010, S. 283–292
- [BPSW13] Bornschein, Jens ; Prescher, Denise ; Schmidt, Michael ; Weber, Gerhard: Nicht-visuelle Interaktion auf berührungsempfindlichen Displays. In: Schlegel, Thomas (Hrsg.): *Multi-Touch*. Springer, 2013 (Xpert.press), S. 319–338
- [BPW15a] Bornschein, Jens ; Prescher, Denise ; Weber, Gerhard: Collaborative Creation of Digital Tactile Graphics. In: *Proceedings of the 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility* ACM, 2015, S. 117–126
- [BPW15b] Bornschein, Jens ; Prescher, Denise ; Weber, Gerhard: Inclusive production of tactile graphics. In: Abascal, Julio (Hrsg.) ; Barbosa, Simone (Hrsg.) ; Fetter, Mirko (Hrsg.) ; Gross, Tom (Hrsg.) ; Palanque, Philippe (Hrsg.) ; Winckler, Marco (Hrsg.): *Human-Computer Interaction – INTERACT 2015*, Springer, 2015 (Lecture Notes in Computer Science 9296), S. 80–88
- [Bro96] Brooke, John: SUS – A quick and dirty usability scale. In: Jordan, Patrick W. (Hrsg.) ; Bruce, Thomas (Hrsg.) ; Weerdmeester, Bernard A. (Hrsg.) ; McClelland, Ian L. (Hrsg.): *Usability Evaluation in Industry*. Taylor & Francis, 1996, S. 189–194
- [Bux83] Buxton, William: Lexical and pragmatic considerations of input structures. In: *Computer Graphics* 17 (1983), Nr. 1, S. 31–37
- [BW01] Beyer, Lothar ; Weiss, Thomas: Elementareinheiten des somatosensorischen Systems als physiologische Basis der taktil-haptischen Wahrnehmung. In: Grunwald, Martin (Hrsg.) ; Beyer, Lothar (Hrsg.): *Der Bewegte Sinn: Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung*. Birkhäuser Verlag, 2001, S. 25–38

- [BYR74] Bach-Y-Rita, Paul: Visual information through the skin: a tactile vision substitution system. In: *Transactions of the American Academy of Ophthalmology and Otolaryngology* 78 (1974), S. 729–740
- [CBA10] CBA (Canadian Braille Authority), BANA (Braille Authority of North America): Guidelines and Standards for Tactile Graphics. 2010 (Web Version – February 2012). – URL: <http://www.brailleauthority.org/tg/>. – letzter Zugriff am 07.07.2016
- [CBS04] Cholewiak, Roger W. ; Brill, J C. ; Schwab, Anja: Vibrotactile localization on the abdomen: Effects of place and space. In: *Perception & Psychophysics* 66 (2004), Nr. 6, S. 970–987
- [CC03] Cholewiak, Roger W. ; Collins, Amy A.: Vibrotactile localization on the arm: Effects of place, space, and age. In: *Perception & Psychophysics* 65 (2003), Nr. 7, S. 1058–1077
- [CDT02] Chang, Dempsey ; Dooley, Laurence ; Tuovinen, Juhani E.: Gestalt theory in visual screen design: a new look at an old subject. In: *Proceedings of the Seventh World Conference on Computers in Education* Australian Computer Society, Inc., 2002, S. 5–12
- [CE01] Challis, Ben P. ; Edwards, Alistair D.: Design principles for tactile interaction. In: *Haptic Human-Computer Interaction*. Springer, 2001, S. 17–24
- [CEB78] 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
- [CG08] Cryer, Heather ; Gunn, Dave: Exploring tactile graphics: Which strategies work? / Royal National Institute of Blind people (RNIB), Centre for Accessible Information. 2008. – Literature review no. 3
- [CGWO04] Chepaitis, Andrew ; Griffiths, Fuzz ; Wyatt, Harry ; O'Connell, William: Evaluation of tactile fonts for use by a visually impaired elderly population. In: *Visual Impairment Research* 6 (2004), Nr. 2-3, S. 111–134
- [Chi90] Chignell, Mark H.: A taxonomy of user interface terminology. In: *ACM SIGCHI Bulletin* 21 (1990), Nr. 4, S. 27–34
- [CJ15] Charoenchaimonkon, Eakachai ; Janecek, Paul: Characterizing non-visual target acquisition tasks with the aid of a tactile display: investigating factors beyond the classical Fitts' theorem. In: *Universal Access in the Information Society* 14 (2015), Nr. 4, S. 459–475
- [CKH⁺02] Chen, Chuansheng ; Kasof, Joseph ; Himsel, Amy J. ; Greenberger, Ellen ; Dong, Qi ; Xue, Gui: Creativity in Drawings of Geometric Shapes – A Cross-Cultural Examination with the Consensual Assessment Technique. In: *Journal of Cross-Cultural Psychology* 33 (2002), Nr. 2, S. 171–187
- [CKI88] Curtis, Bill ; Krasner, Herb ; Iscoe, Neil: A field study of the software design process for large systems. In: *Communications of the ACM* 31 (1988), Nr. 11, S. 1268–1287
- [CLMI04] Crombie, David ; Lenoir, Roger ; McKenzie, Neil ; Ioannidis, George: The bigger picture: Automated production tools for tactile graphics. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang (Hrsg.) ; Burger, Dominique (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2004 (Lecture Notes in Computer Science 3118), S. 713–720
- [CMH05] Chouvardas, Vasilios G. ; Miliou, Amalia N. ; Hatalis, Miltiadis K.: Tactile display applications: A state of the art survey. In: *Proceedings of the 2nd Balkan Conference in Informatics*, 2005, S. 290–303

- [CNW07a] Chang, Dempsey ; Nesbitt, Keith V. ; Wilkins, Kevin: The Gestalt principle of continuation applies to both the haptic and visual grouping of elements. In: *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* IEEE, 2007, S. 15–20
- [CNW07b] Chang, Dempsey ; Nesbitt, Keith V. ; Wilkins, Kevin: The Gestalt principles of similarity and proximity apply to both the haptic and visual grouping of elements. In: *Proceedings of the 8th Australasian User Interface Conference* Australian Computer Society, Inc., 2007, S. 79–86
- [Con15] Continental AG: *Mehr Sicherheit und Komfort im Auto: Continental präsentiert Touch-Display mit aktiver haptischer Rückmeldung (Pressemitteilung)*. URL: http://www.continental-corporation.com/www/presseportal_com_de/themen/pressemitteilungen/3_automotive_group/interior/press_releases/pr_2015_05_28_haptic_feedback_display_de.html, Mai 2015. – letzter Zugriff am 16.06.2016
- [CS63] Culbert, Sidney S. ; Stellwagen, William T.: Tactual discrimination of textures. In: *Perceptual and Motor Skills* 16 (1963), Nr. 2, S. 545–552
- [CSFB06] Chandrashekar, Sambhavi ; Stockman, Tony ; Fels, Deborah ; Benedyk, Rachel: Using think aloud protocol with blind users: a case for inclusive usability evaluation methods. In: *Proceedings of the 8th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility* ACM, 2006, S. 251–252
- [CSS13] Cicho, Kamil ; Sobiecki, Janusz ; Szymaski, Jerzy M.: Gesture tracking and recognition in touchscreens usability testing. In: *Proceedings of the International Conference on Multimedia, Interaction, Design and Innovation* ACM, 2013, S. 9
- [CVVH15] Colley, Ashley ; Virtanen, Lasse ; Väyrynen, Jani ; Häkkinä, Jonna: Physically Guiding Touch Screen Interaction with Public Displays. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Pervasive Displays* ACM, 2015, S. 255–256
- [CW86] Cutkosky, Mark R. ; Wright, Paul K.: Modeling manufacturing grips and correlations with the design of robotic hands. In: *Proceedings of the 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation* Bd. 3 IEEE, 1986, S. 1533–1539
- [CW02] Corn, Anne L. ; Wall, Robert S.: Training and availability of braille transcribers in the United States. In: *Journal of Visual Impairment & Blindness* 96 (2002), Nr. 4, S. 223–232
- [D'A12] D'Andrea, Frances M.: Preferences and practices among students who read Braille and use assistive technology. In: *Journal of Visual Impairment & Blindness* 106 (2012), Nr. 10, S. 585–596
- [DAH92] Davidson, Philip W. ; Appelle, Stuart ; Haber, Ralph N.: Haptic scanning of braille cells by low- and high-proficiency blind readers. In: *Research in Developmental Disabilities* 13 (1992), Nr. 2, S. 99–111
- [Den96] Denninghaus, E: Die Förderung der Lesegeschwindigkeit bei blinden und sehbehinderten Jugendlichen und jungen Erwachsenen. In: *blind-sehbehindert* 116 (1996), S. 95–100. – Zeitschrift für das Sehgeschädigten-Bildungswesen, Verein zur Förderung der Blindenbildung, Hannover
- [DHV87] Dzida, Wolfgang ; Hoffmann, Claus ; Valder, Wilhelm: Der Arbeitskontext als Komponente der Benutzerschnittstelle. In: Schönplugh, Wolfgang (Hrsg.) ; Wittstock, M. (Hrsg.): *Software-Ergonomie'87 – Nützen Informationssysteme dem Benutzer?* Teubner, 1987 (Berichte des German Chapter of the ACM 29), S. 87–97

- [DIN07] DIN (Deutsches Institut für Normung): Blindenschrift – Anforderungen und Maße / DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2007 (DIN32976). – Standard. – DIN 32976:2007-08
- [DJA93] Dahlbäck, Nils ; Jönsson, Arne ; Ahrenberg, Lars: Wizard of Oz studies: why and how. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Intelligent User Interfaces* ACM, 1993, S. 193–200
- [DKEB02] Diggle, T ; Kurniawan, S ; Evans, David G. ; Blenkhorn, Paul: An analysis of layout errors in word processed documents produced by blind people. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2002 (Lecture Notes in Computer Science 2398), S. 587–588
- [DR99] Dumas, Joseph S. ; Redish, Janice: *A practical guide to usability testing*. Intellect Books, 1999
- [DWK08] Dinse, Hubert R. ; Wilimzig, Claudia ; Kalisch, Tobias: Learning effects in haptic perception. In: Grunwald, Martin (Hrsg.): *Human haptic perception: Basics and applications*. Birkenhäuser Verlag, 2008, S. 165–182
- [Edm92] Edman, Polly: *Tactile graphics*. American Foundation for the Blind, 1992
- [Eic15] Eichler, Laura: *Generalisierung eines 3D-Kartenmodells zur Unterstützung der Mobilität blinder Menschen*, Technische Universität Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, Institut für Kartographie, Bachelorarbeit, 2015
- [ESOE11] El Saddik, Abdulmotaleb ; Orozco, Mauricio ; Eid, Mohamad ; Cha, Jongeun: *Haptics technologies: bringing touch to multimedia*. Springer, 2011 (Springer Series on Touch and Haptic Systems)
- [EV01] Erp, Jan B. ; Veen, Hendrik A.: Vibro-tactile information presentation in automobiles. In: *Proceedings of Eurohaptics*, 2001, S. 99–104
- [FAA⁺88] Frese, Michael ; Albrecht, Karen ; Altmann, Alexandra ; Lang, Jutta ; Papstein, Patrizia V. ; Peyerl, Reinhard ; Prümper, Jochen ; Schulte-Göcking, Heike ; Wankmüller, Isabell ; Wendel, Rigas: The effects of an active development of the mental model in the training process: Experimental results in a word processing system. In: *Behaviour & Information Technology* 7 (1988), Nr. 3, S. 295–304
- [FBMW09] Freeman, Dustin ; Benko, Hrvoje ; Morris, Meredith R. ; Wigdor, Daniel: ShadowGuides: visualizations for in-situ learning of multi-touch and whole-hand gestures. In: *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces* ACM, 2009, S. 165–172
- [Feh85] Fehrle, Thomas: *Ein rechnerunterstützter Zeichenplatz für Blinde*, Universität Stuttgart, Institut für Informatik, Diplomarbeit, 1985
- [Fis04] Fishkin, Kenneth P.: A taxonomy for and analysis of tangible interfaces. In: *Personal and Ubiquitous Computing* 8 (2004), Nr. 5, S. 347–358
- [Fit54] Fitts, Paul M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. In: *Journal of Experimental Psychology* 47 (1954), Nr. 6, S. 381–391
- [FKG93] Fonteyn, Marsha E. ; Kuipers, Benjamin ; Grobe, Susan J.: A description of think aloud method and protocol analysis. In: *Qualitative Health Research* 3 (1993), Nr. 4, S. 430–441

- [FLO⁺13] Follmer, Sean ; Leithinger, Daniel ; Olwal, Alex ; Hogge, Akimitsu ; Ishii, Hiroshi: inFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In: *Proceedings of the 26th ACM Symposium on User Interface Software and Technology* ACM, 2013, S. 417–426
- [FOO93] Fein, Robert M. ; Olson, Gary M. ; Olson, Judith S.: A mental model can help with learning to operate a complex device. In: *INTERACT'93 and CHI'93 Conference Companion on Human Factors in Computing Systems* ACM, 1993, S. 157–158
- [Fou82] Foulke, Emerson: Reading braille. In: Schiff, William (Hrsg.) ; Foulke, Emerson (Hrsg.): *Tactual perception: A sourcebook*. Cambridge University Press, 1982, S. 168–208
- [Fra75] Franke, Herbert W.: Sehen und Erkennen. In: *Bild der Wissenschaft* 5 (1975), S. 32–40
- [FRS⁺16] Feix, Thomas ; Romero, Javier ; Schmiedmayer, Heinz-Bodo ; Dollar, Aaron M. ; Kragic, Danica: The GRASP Taxonomy of Human Grasp Types. In: *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 46 (2016), Nr. 1, S. 66–77
- [FS01] Fukumoto, Masaaki ; Sugimura, Toshiaki: Active click: tactile feedback for touch panels. In: *CHI'01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* ACM, 2001, S. 121–122
- [FSM98] Friedlander, Naomi ; Schlueter, Kevin ; Mantei, Marilyn: Bullseye! when Fitts' Law doesn't fit. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1998, S. 257–264
- [FWC84] Foley, James D. ; Wallace, Victor L. ; Chan, Peggy: The human factors of computer graphics interaction techniques. In: *Computer Graphics and Applications* 4 (1984), Nr. 11, S. 13–48
- [GB94] Graziani, Paolo ; Breschi, Bruno: Screen reader for windows based on speech output. In: Zagler, Wolfgang (Hrsg.) ; Busby, Geoffrey (Hrsg.) ; Wagner, Roland R. (Hrsg.): *Computers for Handicapped Persons*. Springer, 1994 (Lecture Notes in Computer Science 860), S. 96–100
- [GB98] Grabowski, Nikolai A. ; Barner, Kenneth E.: Data visualization methods for the blind using force feedback and sonification. In: *Proceedings of the SPIE Conference on Telemanipulator and Telepresence Technologies V* International Society for Optics and Photonics, 1998, S. 131–139
- [GB06] Gardner, John A. ; Bulatov, Vladimir: Scientific diagrams made easy with IVEOTM. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang L. (Hrsg.) ; Karshmer, Arthur I. (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2006 (Lecture Notes in Computer Science 4061), S. 1243–1250
- [GCNG15] Grice, Noreen ; Christian, Carol ; Nota, Antonella ; Greenfield, Perry: 3D Printing Technology: A Unique Way of Making Hubble Space Telescope Images Accessible to Non-Visual Learners. In: *Journal of Blindness Innovation & Research* 5 (2015), Nr. 1
- [Gen98] General Services Administration, Office of Governmentwide Policy: *Section 508 Law and Related Laws Policies*. URL: https://www.section508.gov/content/_learn/laws-and-policies, 1998. – letzter Zugriff am 03.06.2016
- [Ger14] Gerlach, Mandy: *Orientierungshilfen für die Erkundung taktiler Grafiken*, Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, Diplomarbeit, 2014

- [GF04] Gutwin, Carl ; Fedak, Chris: Interacting with big interfaces on small screens: a comparison of fisheye, zoom, and panning techniques. In: *Proceedings of Graphics Interface 2004* Canadian Human-Computer Communications Society, 2004, S. 145–152
- [Gib62] Gibson, James J.: Observations on active touch. In: *Psychological review* 69 (1962), Nr. 6, S. 477–491
- [GK03] Goldreich, Daniel ; Kanics, Ingrid M.: Tactile acuity is enhanced in blindness. In: *The Journal of Neuroscience* 23 (2003), Nr. 8, S. 3439–3445
- [GLS⁺08] Goethals, Pauwel ; Lintermans, Hans ; Sette, Mauro M. ; Reynaerts, Dominiek ; Van Brussel, Hendrik: Powerful compact tactile display with microhydraulic actuators. In: *Proceedings of EuroHaptics*. Springer, 2008, S. 447–457
- [GMM14] Concu, Cagatay ; Marinai, Simone ; Marriott, Kim: Generation of accessible graphics. In: *22nd Mediterranean Conference on Control and Automation IEEE*, 2014, S. 169–174
- [Gol89] Goldstein, E B.: *Sensation and perception*. Wadsworth/Thomson Learning, 1989
- [GP14] Götzelmann, Timo ; Pavkovic, Aleksander: Towards automatically generated tactile detail maps by 3D printers for blind persons. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Fels, Deborah (Hrsg.) ; Archambault, Dominique (Hrsg.) ; Penáz, Petr (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2014 (Lecture Notes in Computer Science 8548), S. 1–7
- [GPL14] Gual, Jaume ; Puyuelo, Marina ; Lloveras, Joaquim: Three-dimensional tactile symbols produced by 3D Printing: Improving the process of memorizing a tactile map key. In: *British Journal of Visual Impairment* 32 (2014), Nr. 3, S. 263–278
- [Gra08] Graham, Lisa: Gestalt theory in interactive media design. In: *Journal of Humanities & Social Sciences* 2 (2008), Nr. 1
- [Gru01] Grunwald, Martin: Begriffsbestimmungen zwischen Psychologie und Physiologie. In: *Der bewegte Sinn*. Springer, 2001, S. 1–14
- [Gru09] Gruber, Tom: Ontology. In: Liu, Ling (Hrsg.) ; Zsu, M T. (Hrsg.): *Encyclopedia of Database Systems*. Springer Publishing Company, 2009, S. 1963–1965. – URL: <http://tomgruber.org/writing/ontology-definition-2007.htm>
- [GSZ10] Gutschmidt, René ; Schiewe, Maria ; Zinke, Francis ; Jürgensen, Helmut: Haptic emulation of games: haptic Sudoku for the blind. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments* ACM, 2010, S. 2
- [GW94] Gunzenhäuser, Rul ; Weber, Gerhard: Graphical User Interfaces for Blind People. In: Brunnstein, Klaus (Hrsg.) ; Raubold, Eckart (Hrsg.): *Proceedings of the IFIP 13th World Computer Congress – Applications and Impacts, Information Processing '94, Volume 2*, 1994, S. 450–457
- [Han06] Handwerker, Hermann O.: Somatosensorik. In: *Neuro-und Sinnesphysiologie*. Springer, 2006, S. 203–228
- [Har06] Hart, Sandra G.: NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2006, S. 904–908
- [Hay08] Hayward, Vincent: A brief taxonomy of tactile illusions and demonstrations that can be done in a hardware store. In: *Brain Research Bulletin* 75 (2008), Nr. 6, S. 742–752

- [HB06] Hornecker, Eva ; Buur, Jacob: Getting a grip on tangible interaction: a framework on physical space and social interaction. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* ACM, 2006, S. 437–446
- [HBC⁺92] Hewett, Thomas T. ; Baecker, Ronald ; Card, Stuart ; Carey, Tom ; Gasen, Jean ; Mantei, Marilyn ; Perlman, Gary ; Strong, Gary ; Verplank, William: *ACM SIGCHI Curricula for Human-Computer Interaction*. ACM, 1992
- [Hel01] Helios, Dietmar: Handbuch zur Erstellung taktiler Graphiken (3. Auflage) / Universität Karlsruhe, Studienzentrum für Sehgeschädigte. 2001. – URL: <http://www.szs.uni-karlsruhe.de/download/grafik.pdf>. – letzter Zugriff am 07.07.2016
- [Her07] Herring, Nigel: Considerations for Embosser Produced Tactile Graphics / Pen-tronics. 2007 (1). – Technical Report. – URL: http://www.pentronics.com.au/Downloads/Considerations%20for%20Embosser%20Produced%20Graphics.doc_ – letzter Zugriff am 07.07.2016
- [HH09] Harrison, Chris ; Hudson, Scott E.: Providing dynamically changeable physical buttons on a visual display. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* ACM, 2009, S. 299–308
- [HHC99] Han, Shihui ; Humphreys, Glyn W. ; Chen, Lin: Uniform connectedness and classical Gestalt principles of perceptual grouping. In: *Perception & Psychophysics* 61 (1999), Nr. 4, S. 661–674
- [Hol89] Hollins, Mark: *Understanding blindness: An integrative approach*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc, 1989
- [Hos12] Hoshi, Takayuki: Handwriting transmission system using noncontact tactile display. In: *Haptics Symposium* IEEE, 2012, S. 399–401
- [HS88] Hart, Sandra G. ; Staveland, Lowell E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In: *Advances in Psychology* 52 (1988), S. 139–183
- [HS91a] Heller, Morton A. ; Schiff, William: Conclusions: The future of touch. In: Heller, Morton A. (Hrsg.) ; Schiff, William (Hrsg.): *The psychology of touch*. Psychology Press, 1991, S. 327–337
- [HS91b] Heller, Morton A. ; Schiff, William ; Heller, Morton A. (Hrsg.) ; Schiff, William (Hrsg.): *Tactile perception in the visually impaired*. Psychology Press, 1991. – 235–238 S.
- [HS04] Huber, Marcus J. ; Simpson, Richard: Recognizing the plans of screen reader users. In: *Modeling Other Agents from Observations (MOO 2004) – Workshop W3 at the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2004, S. 1–8
- [Hud85] Hudelmayer, Dieter: Schrift, Schreiben und Lesen im Unterricht bei Blinden. In: Rath, Waldtraut (Hrsg.) ; Hudelmayer, Dieter (Hrsg.): *Pädagogik der Blinden und Sehbehinderten. Handbuch der Sonderpädagogik* Bd. 2. Carl Marhold Verlagsbuchhandlung, 1985, S. 127–142
- [HZT83] Hislop, David W. ; Zuber, BL ; Trimble, John L.: Characteristics of reading rate and manual scanning patterns of blind Optacon readers. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 25 (1983), Nr. 4, S. 379–389
- [IBM16] IBM: *IBM Accessibility – Developer Guidelines*. URL: <http://www-03.ibm.com/able/guidelines/index.html>, 2016. – letzter Zugriff am 03.06.2016

- [Imm11] Immersion Corporation: *Enhancing Your Device Design Through Tactile Feedback*. URL: http://www.immersion.com/wp-content/uploads/2015/09/_Enhancing-Device-Design-Through-Tactile-Feedback_04_2011.pdf, 2011. – letzter Zugriff am 07.07.2016
- [Imm12] Immersion Corporation: *Haptics in Touch Screen Hand-Held Devices*. URL: http://www.immersion.com/wp-content/uploads/2015/09/_Haptics-in-Touchscreen-Hand-Held-Devices_April2012.pdf, 2012. – letzter Zugriff am 07.07.2016
- [IMS02] IMS Global Learning Consortium: *IMS Guidelines for Developing Accessible Learning Applications*. URL: https://www.imsglobal.org/accessibility/_accessiblevers/index.html, 2002. – letzter Zugriff am 03.06.2016
- [ISO2] Ikei, Yasushi ; Shiratori, Masashi: TextureExplorer: A tactile and force display for virtual textures. In: *Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems IEEE*, 2002, S. 327–334
- [Ish07] Ishii, Hiroshi: Tangible user interfaces. In: Sears, Andrew (Hrsg.) ; Jacko, Julie A. (Hrsg.): *Human-Computer Interaction – Design Issues, Solutions, and Applications*. CRC Press, 2007, S. 141–159
- [ISO98] ISO (the International Organization for Standardization): Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit – Leitsätze (Deutsche Fassung EN ISO 9241-11:1998) / DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 1998 (ISO9241-11). – Standard. – ISO 9241-11:1998
- [ISO06] ISO (the International Organization for Standardization): Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (Deutsche Fassung EN ISO 9241-110:2006) / DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2006 (ISO9241-110). – Standard. – ISO 9241-110:2006
- [ISO10] ISO (the International Organization for Standardization): Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (Deutsche Fassung EN ISO 9241-210:2010) / DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2010 (ISO9241-210). – Standard. – ISO 9241-210:2010
- [ISO11a] ISO (the International Organization for Standardization): Ergonomie – Zugängliche Gestaltung – Taktile Punkte und Striche auf Konsumgütern (Deutsche Fassung EN ISO 24503:2011) / DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2011 (ISO24503). – Standard. – ISO 24503:2011
- [ISO11b] ISO (the International Organization for Standardization): Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 910: Rahmen für taktile und haptische Interaktion (Deutsche Fassung EN ISO 9241-910:2011) / DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2011 (ISO9241-910). – Standard. – ISO 9241-910:2011
- [IYNK01] Iwata, Hiroo ; Yano, Hiroaki ; Nakaizumi, Fumitaka ; Kawamura, Ryo: Project FEELEX: adding haptic surface to graphics. In: *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques ACM*, 2001, S. 469–475
- [Jac91] Jacob, Robert J.: The use of eye movements in human-computer interaction techniques: what you look at is what you get. In: *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)* 9 (1991), Nr. 2, S. 152–169
- [JA]⁺10] Jayant, Chandrika ; Acuario, Christine ; Johnson, William A. ; Hollier, Janet ; Ladner, Richard E.: V-braille: haptic braille perception using a touch-screen and vibration on mobile phones. In: *Proceedings of the 12th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility ACM*, 2010, S. 295–296

- [JF98] Jul, Susanne ; Furnas, George W.: Critical zones in desert fog: aids to multiscale navigation. In: *Proceedings of the 11th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* ACM, 1998, S. 97–106
- [JG75] James, GA ; Gill, JM: A pilot study on the discriminability of tactile areal and line symbols for the blind. In: *Research Bulletin* 29 (1975), S. 23–31
- [JKO1] Jentzsch, Klaus-Jürgen ; Kurt, Joachim: *Anleitung zum Entwerfen taktiler Grafiken für Blinde mit Corel Draw (2. Auflage)*. Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Rehabilitationswissenschaften, 2001
- [JKB10] Jansen, Yvonne ; Karrer, Thorsten ; Borchers, Jan: MudPad: tactile feedback and haptic texture overlay for touch surfaces. In: *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces* ACM, 2010, S. 11–14
- [JLGL98] Johnson-Laird, Philip N. ; Giroto, Vittorio ; Legrenzi, Paolo: Mental models: a gentle guide for outsiders. In: *Sistemi Intelligenti* 9 (1998), Nr. 68, S. 33
- [JP05] Jansson, Gunnar ; Pedersen, Patrik: Obtaining geographical information from a virtual map with a haptic mouse. In: *XXII International Cartographic Conference*, 2005, S. 1–6
- [JSHG08] Jay, Caroline ; Stevens, Robert ; Hubbold, Roger ; Glencross, Mashhuda: Using haptic cues to aid nonvisual structure recognition. In: *ACM Transactions on Applied Perception* 5 (2008), Nr. 2, S. 8:1–8:14
- [Jun04] Jungmann, Markus: *Entwicklung elektrostatischer Festkörperaktoren mit elastischen Dielektrika für den Einsatz in taktilen Anzeigefeldern*, TU Darmstadt, Diss., 2004
- [KAKS05] Kyung, Ki-Uk ; Ahn, Minseung ; Kwon, Dong-Soo ; Srinivasan, Mandayam A.: Perceptual and biomechanical frequency response of human skin: implication for design of tactile displays. In: *First Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (World Haptics Conference)* IEEE, 2005, S. 96–101
- [Kal96] Kalina, Ulrich: Einführung in die Nutzung grafischer Oberflächen bei Blinden und Sehbehinderten – methodische und didaktische Aspekte. In: *Blind, sehbehindert* 116 (1996), Nr. 1, S. 22–30
- [Kat25] Katz, David: *Der Aufbau der Tastwelt*. Barth Leipzig, 1925
- [KBCS08] Kaufman, James C. ; Baer, John ; Cole, Jason C. ; Sexton, Janel D.: A comparison of expert and nonexpert raters using the consensual assessment technique. In: *Creativity Research Journal* 20 (2008), Nr. 2, S. 171–178
- [KBW08] Kane, Shaun K. ; Bigham, Jeffrey P. ; Wobbrock, Jacob O.: Slide rule: making mobile touch screens accessible to blind people using multi-touch interaction techniques. In: *Proceedings of the 10th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility* ACM, 2008, S. 73–80
- [KBYR95] Kaczmarek, Kurt A. ; Bach-Y-Rita, Paul: Tactile displays. In: Barfield, Woodrow (Hrsg.) ; Furness, Thomas A. (Hrsg.): *Virtual environments and advanced interface design*. Oxford University Press, 1995, S. 349–414
- [KD02] Kirkpatrick, Arthur E. ; Douglas, Sarah A.: Application-based evaluation of haptic interfaces. In: *Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* IEEE, 2002, S. 32–39
- [Kel84] Kelley, John F.: An iterative design methodology for user-friendly natural language office information applications. In: *ACM Transactions on Office Information Systems* 2 (1984), Nr. 1, S. 26–41

- [Ker09] Kern, Thorsten A. (Hrsg.): *Entwicklung Haptischer Geräte: Ein Einstieg für Ingenieure*. Springer-Verlag, 2009
- [KGBL14] Klatzky, Roberta L. ; Giudice, Nicholas A. ; Bennett, Christopher R. ; Loomis, Jack M.: Touch-screen technology for the dynamic display of 2D spatial information without vision: Promise and progress. In: *Multisensory Research* 27 (2014), Nr. 5-6, S. 359-378
- [Kho11] Khochen, Maha: Reading through Touch: Importance and Challenges. In: *Proceedings of World Congress Braille21*. Leipzig : Deutsche Zentralbücherei für Blinde (DZB), September 2011, S. 1-9. – letzter Zugriff am 07.07.2016
- [Kip08] Kipke, Siegfried: Sensitive Braille displays with ATC technology (active tactile control) as a tool for learning Braille. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang (Hrsg.) ; Karshmer, Arthur (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2008 (Lecture Notes in Computer Science 5105), S. 843-850
- [KKMT01] Kajimoto, Hiroyuki ; Kawakami, Naoki ; Maeda, Taro ; Tachi, Susumu: Electro-tactile display with force feedback. In: *Proceedings of the World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics* Bd. 11, 2001, S. 95-99
- [KL96] Kahlisch, Thomas ; Löttsch, Jürgen: Services for the Blind and Partially Sighted in Germany. In: *Congress on Rehabilitation of the Disabled, Dubai, United Arab Emirates*, 1996
- [KL15] Köhlmann, Wiebke ; Lucke, Ulrike: Alternative Concepts for Accessible Virtual Classrooms for Blind Users. In: *15th International Conference on Advanced Learning Technologies* IEEE, 2015, S. 413-417
- [KLBO4] Kontio, Jyrki ; Lehtola, Laura ; Bragge, Johanna: Using the focus group method in software engineering: obtaining practitioner and user experiences. In: *Proceedings of the 2004 International Symposium on Empirical Software Engineering* IEEE, 2004, S. 271-280
- [Klö87] Klöpfer, Klaus: *Ein multifunktionaler Büroarbeitsplatz für Blinde*. Universität Stuttgart, Fakultät für Informatik, Diss., 1987
- [KMW13] Kane, Shaun K. ; Morris, Meredith R. ; Wobbrock, Jacob O.: Touchplates: low-cost tactile overlays for visually impaired touch screen users. In: *Proceedings of the 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility* ACM, 2013, S. 22
- [Kob93] Koberstein, Margarate: Sinnesschulung – Tastschulung im engeren Sinne. In: *blind-sehbehindert. Zeitschrift für das Sehgeschädigten-Bildungswesen* 1 (1993), S. 15-18
- [Koc94] Kochanek, Dirk: Designing an OffScreen Model for a GUI. In: Zagler, Wolfgang (Hrsg.) ; Busby, Geoffrey (Hrsg.) ; Wagner, Roland R. (Hrsg.): *Computers for Handicapped Persons*. Springer, 1994 (Lecture Notes in Computer Science 860), S. 89-95
- [Kof35] Koffka, Kurt: *Principles of Gestalt psychology*. Routledge, 1935
- [Kre64] Krebs, Bernard M.: Illustrations and educational devices for the blind: development of standards for embossed illustrations. In: *Proceedings of the 47th Meeting of the American Association of Instructors of the Blind* (1964), S. 67-68
- [Kru82] Krueger, Lester E.: A word-superiority effect with print and braille characters. In: *Perception & Psychophysics* 31 (1982), Nr. 4, S. 345-352

- [KS02] Kurniawan, Sri H. ; Sutcliffe, Alistair: Mental models of blind users in the windows environment. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2002 (Lecture Notes in Computer Science 2398), S. 568–574
- [KS05] Karam, Maria ; Schraefel, M.C: A taxonomy of gestures in human computer interaction / University of Southampton. 2005. – Forschungsbericht
- [KS14] Keil, Reinhard ; Schild, Christian: Hypothesengeleitete Gestaltung von Benutzungsoberflächen. In: Koch, Michael (Hrsg.) ; Butz, Andreas (Hrsg.) ; Schlichter, Johann (Hrsg.): *Mensch und Computer 2014 – Tagungsband*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2014, S. 265–274
- [Kur98] Kurze, Martin: TGuide: a guidance system for tactile image exploration. In: *Proceedings of the Third International ACM Conference on Assistive Technologies ACM*, 1998, S. 85–91
- [Kus74] Kusajima, Tokisuke: *Visual reading and braille reading: An experimental investigation of the physiology and psychology of visual and tactual reading*. American Foundation for the Blind, 1974
- [KVMT11] Kaklanis, Nikolaos ; Votis, Konstantinos ; Moschonas, Panagiotis ; Tzouvaras, Dimitrios: HapticRiaMaps: towards interactive exploration of web world maps for the visually impaired. In: *Proceedings of the International Cross-Disciplinary Conference on Web Accessibility ACM*, 2011, S. 20
- [KVW08] Kraus, Michael ; Völkel, Thorsten ; Weber, Gerhard: An off-screen model for tactile graphical user interfaces. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang (Hrsg.) ; Karshmer, Arthur (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2008 (Lecture Notes in Computer Science 5105), S. 865–872
- [KW04] Kobayashi, Makoto ; Watanabe, Tetsuya: Communication System for the Blind Using Tactile Displays and Ultrasonic Pens – MIMIZU. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang L. (Hrsg.) ; Burger, Dominique (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2004 (Lecture Notes in Computer Science 3118), S. 731–738
- [KWL11] Kane, Shaun K. ; Wobbrock, Jacob O. ; Ladner, Richard E.: Usable gestures for blind people: understanding preference and performance. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems ACM*, 2011, S. 413–422
- [KZS10] Köhlmann, Wiebke ; Zinke, Francis ; Schiewe, Maria ; Jürgensen, Helmut: User-interface filter for two-dimensional haptic interaction. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang (Hrsg.) ; Karshmer, Arthur (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2010 (Lecture Notes in Computer Science 6180), S. 498–505
- [LA82] Levi, Jasha M. ; Amick, Nancy S.: Tangible graphics: producers' views. In: Schiff, William (Hrsg.) ; Foulke, Emerson (Hrsg.): *Tactual Perception: A Sourcebook*. Cambridge University Press, 1982, S. 417–429
- [LBB12] Leporini, Barbara ; Buzzi, Maria C. ; Buzzi, Marina: Interacting with mobile devices via VoiceOver: usability and accessibility issues. In: *Proceedings of the 24th Australian Computer-Human Interaction Conference ACM*, 2012, S. 339–348
- [LC78] Loomis, Jack M. ; Collins, Carter C.: Sensitivity to shifts of a point stimulus: An instance of tactile hyperacuity. In: *Perception & Psychophysics* 24 (1978), Nr. 6, S. 487–492

- [Leu08] Leutbecher, Astrid: Vorschlag für Standards zur Erstellung taktiler Abbildungen / Förderzentrum für die integrative Beschulung blinder und hochgradig sehbehinderter Schülerinnen und Schüler (FIBS). 2008. – URL: http://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/themen/f/fibs/weitere_hilfen/taktile_abbildungen.pdf. – letzter Zugriff am 07.07.2016
- [LFH10] Lazar, Jonathan ; Feng, Jinjuan H. ; Hochheiser, Harry: *Research methods in Human-Computer Interaction*. John Wiley & Sons, 2010
- [LIR⁺05] Ladner, Richard E. ; Ivory, Melody Y. ; Rao, Rajesh ; Burgstahler, Sheryl ; Comden, Dan ; Hahn, Sangyun ; Renzelmann, Matthew ; Krisnandi, Satria ; Ramasamy, Mahalakshmi ; Slabosky, Beverly u. a.: Automating tactile graphics translation. In: *Proceedings of the 7th international ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility* ACM, 2005, S. 150–157
- [LK87] Lederman, Susan J. ; Klatzky, Roberta L.: Hand movements: A window into haptic object recognition. In: *Cognitive Psychology* 19 (1987), Nr. 3, S. 342–368
- [LL86] Loomis, Jack M. ; Lederman, Susan J.: Tactual perception. In: *Handbook of perception and human performances* 2 (1986), S. 31/1–31/41
- [LMV⁺08] Legge, Gordon E. ; Madison, Cindee ; Vaughn, Brenna N. ; Cheong, Allen M. Y. ; Miller, Joseph C.: Retention of high tactile acuity throughout the life span in blindness. In: *Perception & Psychophysics* 70 (2008), Nr. 8, S. 1471–1488
- [LPHL05] Lévesque, Vincent ; Pasquero, Jérôme ; Hayward, Vincent ; Legault, Maryse: Display of virtual braille dots by lateral skin deformation: feasibility study. In: *ACM Transactions on Applied Perception* 2 (2005), Nr. 2, S. 132–149
- [LSS05] Lethbridge, Timothy C. ; Sim, Susan E. ; Singer, Janice: Studying software engineers: Data collection techniques for software field studies. In: *Empirical Software Engineering* 10 (2005), Nr. 3, S. 311–341
- [Lüt99] Lüthi, Friedrich: *Wie kann ein Blinder mit Windows arbeiten? TAWIS - Die Tastbaren Windows mit Sprachausgabe*. Richterswil, Schweiz, 1999
- [Mar07] Marshall, Paul: Do tangible interfaces enhance learning? In: *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction* ACM, 2007, S. 163–170
- [MB85] Mousty, Philippe ; Bertelson, Paul: A study of braille reading: 1. Reading speed as a function of hand usage and context. In: *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* 37 (1985), Nr. 2, S. 217–233
- [MB09] Motti, Lilian G. ; Burger, Dominique: Adapting diagrams for DAISY books. In: *DAISY International Technical Conference: Barrierefreie Aufbereitung von Dokumenten* (2009), S. 67–71
- [MBB11] Mascetti, Sergio ; Bernareggi, Cristian ; Belotti, Matteo: TypelnBraille: a braille-based typing application for touchscreen devices. In: *The proceedings of the 13th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility* ACM, 2011, S. 295–296
- [MBJ08] McGookin, David ; Brewster, Stephen ; Jiang, WeiWei: Investigating touchscreen accessibility for people with visual impairments. In: *Proceedings of the 5th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Building Bridges* ACM, 2008, S. 298–307

- [MC10] Müller, Karin ; Constantinescu, Angela: Improving the accessibility of ASCII graphics for the blind students. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang (Hrsg.) ; Karshmer, Arthur (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2010 (Lecture Notes in Computer Science 6180), S. 439–442
- [MEA58] Meyers, Ernest ; Ethington, Doris ; Ashcroft, Samuel: Readability of Braille as a function of three spacing variables. In: *Journal of Applied Psychology* 42 (1958), Nr. 3, S. 163–165
- [Mia14] Miao, Mei: *Blindenspezifische Methoden für das User-Centred Design multimodaler Anwendungen*, Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, Diss., 2014
- [Mie07] Miele, Joshua A.: Automated creation and detailed annotation of audio/tactile maps using scalable vector graphics (SVG). In: *International Cartographic Conference, Moscow, Russia, 2007*, S. 4–11
- [Mil84] Millar, Susanna: Is there a “best hand“ for braille? In: *Cortex* 20 (1984), Nr. 1, S. 75–87
- [Mil88a] Millar, Susanna: An apparatus for recording hand movements. In: *British Journal of Visual Impairment* 6 (1988), Nr. 3, S. 87–90
- [Mil88b] Millar, Susanna: Prose reading by touch: The role of stimulus quality, orthography and context. In: *British Journal of Psychology* 79 (1988), S. 87–103
- [Mil91] Millar, Susanna: A reverse lag in the recognition and production of tactual drawings: Theoretical implications for haptic coding. In: Heller, Morton A. (Hrsg.) ; Schiff, William (Hrsg.): *The psychology of touch*. Psychology Press, 1991, S. 301–325
- [Mil95] Millar, Susanna: Understanding and representing spatial information. In: *British Journal of Visual Impairment* 13 (1995), Nr. 1, S. 8–11
- [Mil03] Millar, Susanna: *Reading by touch*. Routledge, 2003
- [Min95] Minsky, Margaret Diane R.: *Computational haptics: the sandpaper system for synthesizing texture for a force-feedback display*, Massachusetts Institute of Technology, Diss., 1995
- [MK80] Magee, Lochlan E. ; Kennedy, John M.: Exploring pictures tactually. In: *Nature* 283 (1980), S. 287–288
- [MKS09] Miao, Mei ; Köhlmann, Wiebke ; Schiewe, Maria ; Weber, Gerhard: Tactile paper prototyping with blind subjects. In: Altinsoy, M. E. (Hrsg.) ; Jekosch, Ute (Hrsg.) ; Brewster, Stephen (Hrsg.): *Haptic and Audio Interaction Design*. Springer, 2009 (Lecture Notes in Computer Science 5763), S. 81–90
- [MPTM14] Morash, Valerie S. ; Pensky, Allison E. C. ; Tseng, Steven T. ; Miele, Joshua A.: Effects of using multiple hands and fingers on haptic performance in individuals who are blind. In: *Perception* 43 (2014), Nr. 6, S. 569–588
- [MRMSE13] Molina-Rueda, Ariel ; Magallanes, Yazmín ; Sánchez, J. A. ; Enriquez, David F.: Using heat maps for studying user preferences in vertical and horizontal multi-touch surfaces. In: *International Conference on Electronics, Communications and Computing IEEE*, 2013, S. 21–26
- [MSM00] Maucher, Thorsten ; Schemmel, Johannes ; Meier, Karlheinz: The heidelberg tactile vision substitution system. In: *Proceeding of the Sixth International Conference on Tactile Aids, Hearing Aids and Cochlear Implants*, 2000, S. 23–26

- [MW12] Miao, Mei ; Weber, Gerhard: A Quantitative Evaluation Approach for Cognitive Maps of Blind People. In: *Proceedings of SKALID 2012 – Spatial Knowledge Acquisition with Limited Information Displays* (2012), S. 37–42
- [NB11] Norman, J F. ; Bartholomew, Ashley N.: Blindness enhances tactile acuity and haptic 3-D shape discrimination. In: *Attention, Perception, & Psychophysics* 73 (2011), Nr. 7, S. 2323–2331
- [ND86] Norman, Donald A. (Hrsg.) ; Draper, Stephen W. (Hrsg.): *User centered system design – new perspectives on human-computer interaction*. Lawrence Erlbaum Associates, 1986
- [NGK⁺10] Nishino, Hiroaki ; Goto, Ryotaro ; Kagawa, Tsuneo ; Utsumiya, Kouichi ; Hirooka, Junji ; Osada, Toshihiko ; Nagatomo, Nobuhiro ; Aoki, Eiji: An electronic voting system for haptic touchscreen interface. In: *International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems* IEEE, 2010, S. 1164–1169
- [Nie97] Nielsen, Jakob: The use and misuse of focus groups. In: *IEEE Software* 14 (1997), Nr. 1, S. 94–95
- [NLYS12] Nam, Chang S. ; Li, Yueqing ; Yamaguchi, Takehiko ; Smith-Jackson, Tonya L.: Haptic user interfaces for the visually impaired: Implications for haptically enhanced science learning systems. In: *International Journal of Human-Computer Interaction* 28 (2012), Nr. 12, S. 784–798
- [NM71] Nolan, Carson Y. ; Morris, June E.: Improvement of Tactual Symbols for Blind Children. Final Report. / American Printing House for the Blind. 1971 (EC O50 272). – Forschungsbericht. – URL: <http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED070228.pdf> – letzter Zugriff am 07.07.2016
- [NM90] Nielsen, Jakob ; Molich, Rolf: Heuristic evaluation of user interfaces. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* ACM, 1990, S. 249–256
- [NM06] Noble, Nicolas ; Martin, Benoit: Shape discovering using tactile guidance. In: *Proceedings of EuroHaptics*, 2006, S. 561–564
- [NM15] Namdev, Rahul K. ; Maes, Pattie: An interactive and intuitive STEM accessibility system for the blind and visually impaired. In: *Proceedings of the 8th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments* ACM, 2015, S. 20
- [Nor83] Norman, Donald A.: Some observations on mental models. In: Gentner, Dedre (Hrsg.) ; Stevens, Albert L. (Hrsg.): *Mental Models*. Psychology Press, 1983, S. 7–14
- [Nor88] Norman, Donald A.: *The psychology of everyday things*. Basic books, 1988
- [OG97] O’Modhrain, Sile ; Gillespie, Brent: The moose: A haptic user interface for blind persons. In: *Proceedings of the Third WWW6 Conference*, 1997, S. 37–42
- [OGGL15] O’Modhrain, Sile ; Giudice, Nicholas A. ; Gardner, John A. ; Legge, Gordon E.: Designing media for visually-impaired users of refreshable touch displays: Possibilities and pitfalls. In: *IEEE Transactions on Haptics* 8 (2015), Nr. 3, S. 248–257
- [Ovi07] Oviatt, Sharon: Multimodal Interfaces. In: *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies and Emerging Applications (Second Edition)* (2007), S. 413–432
- [PAD⁺09] Papadopoulos, Konstantinos S. ; Arvaniti, Evmorfia K. ; Dimitriadi, Despina I. ; Gkoutsioudi, Vasiliki G. ; Zantali, Christina I.: Spelling performance of visually impaired adults. In: *British Journal of Visual Impairment* 27 (2009), Nr. 1, S. 49–64

- [PB16] Prescher, Denise ; Bornschein, Jens: Richtlinien zur Umsetzung taktiler Grafiken / Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik. 2016. – URL: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-196167_
- [PBKW16] Prescher, Denise ; Bornschein, Jens ; Köhlmann, Wiebke ; Weber, Gerhard: Touching graphical applications: bi-manual tactile interaction on the HyperBraille pin-matrix display. In: *Universal Access in the Information Society* (eingereicht im März 2016)
- [PBW14] Prescher, Denise ; Bornschein, Jens ; Weber, Gerhard: Production of accessible tactile graphics. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Fels, Deborah (Hrsg.) ; Archambault, Dominique (Hrsg.) ; Penáz, Petr (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2014 (Lecture Notes in Computer Science 8548), S. 26–33
- [PBW16] Prescher, Denise ; Bornschein, Jens ; Weber, Gerhard: Consistency of a Tactile Pattern Set. In: *ACM Transactions on Accessible Computing* (eingereicht im März 2016)
- [PCB⁺09] Pietrzak, Thomas ; Crossan, Andrew ; Brewster, Stephen A. ; Martin, Benoît ; Pecci, Isabelle: Exploring geometric shapes with touch. In: Gross, Tom (Hrsg.) ; Gulliksen, Jan (Hrsg.) ; Kotzé, Paula (Hrsg.) ; Oestreicher, Lars (Hrsg.) ; Palanque, Philippe (Hrsg.) ; Prates, Raquel O. (Hrsg.) ; Winckler, Marco (Hrsg.): *Human-Computer Interaction – INTERACT 2009*. Springer, 2009 (Lecture Notes in Computer Science 5726), S. 145–148
- [PCK⁺16] Papadopoulos, Konstantinos ; Charitakis, Konstantinos ; Koustriava, Eleni ; Kartasidou, Lefkothea ; Stylianidis, Efstratios ; Kouroupetroglou, Georgios ; Sakalli Gumus, Suad ; Müller, Karin ; Yilmaz, Engin: Specification of Symbols Used in Audio-Tactile Maps for Individuals with Blindness. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Bühler, Christian (Hrsg.) ; Penaz, Petr (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2016 (Lecture Notes in Computer Science 9759), S. 160–167
- [PD09] Presley, Ike ; D’Andrea, Frances M.: *Assistive technology for students who are blind or visually impaired: A guide to assessment*. American Foundation for the Blind, 2009
- [PF93] Perlin, Ken ; Fox, David: Pad: an alternative approach to the computer interface. In: *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* ACM, 1993, S. 57–64
- [PGD06] Power, Christopher ; Gill, Dawn ; Daley, Mark: Voronoi diagrams, vectors and the visually impaired. In: *CHI’06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* ACM, 2006, S. 1247–1252
- [PGD15] Petrie, Helen ; Gallagher, Blaitthin ; Darzentas, Jenny: Methods for Undertaking Research on Technology with Older and Disabled People. In: Abascal, Julio (Hrsg.) ; Barbosa, Simone (Hrsg.) ; Fetter, Mirko (Hrsg.) ; Gross, Tom (Hrsg.) ; Palanque, Philippe (Hrsg.) ; Winckler, Marco (Hrsg.): *Human-Computer Interaction – INTERACT 2015*. Springer, 2015 (Lecture Notes in Computer Science 9299), S. 669–670
- [PH03] Pasquero, Jérôme ; Hayward, Vincent: STReSS: A practical tactile display system with one millimeter spatial resolution and 700 Hz refresh rate. In: *Proceedings of EuroHaptics*, 2003, S. 94–110
- [PHD05] Petrie, Helen ; Harrison, Chandra ; Dev, Sundeep: Describing images on the web: a survey of current practice and prospects for the future. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction, part of HCI International (2005)*

- [PHKPO6] Petrie, Helen ; Hamilton, Fraser ; King, Neil ; Pavan, Pete: Remote usability evaluations with disabled people. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* ACM, 2006, S. 1133–1141
- [PLRW92] Polson, Peter G. ; Lewis, Clayton ; Rieman, John ; Wharton, Cathleen: Cognitive walkthroughs: a method for theory-based evaluation of user interfaces. In: *International Journal of Man-Machine Studies* 36 (1992), Nr. 5, S. 741–773
- [PM03] Poupyrev, Ivan ; Maruyama, Shigeaki: Tactile interfaces for small touch screens. In: *Proceedings of the 16th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* ACM, 2003, S. 217–220
- [PM14] Pölzer, Stephan ; Miesenberger, Klaus: 2D Presentation Techniques of Mind-maps for Blind Meeting Participants. In: *Studies in Health Technology and Informatics* 217 (2014), S. 533–538
- [PMPRG11] Poppinga, Benjamin ; Magnusson, Charlotte ; Pielot, Martin ; Rasmus-Gröhn, Kirsten: TouchOver map: audio-tactile exploration of interactive maps. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services* ACM, 2011, S. 545–550
- [PNW10] Prescher, Denise ; Nadig, Oliver ; Weber, Gerhard: Reading braille and tactile ink-print on a planar tactile display. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang (Hrsg.) ; Karshmer, Arthur (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2010 (Lecture Notes in Computer Science 6180), S. 482–489
- [Pow06] Power, Christopher: On the accuracy of tactile displays. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang L. (Hrsg.) ; Karshmer, Arthur I. (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2006 (Lecture Notes in Computer Science 4061), S. 1155–1162
- [PPM06] Pietrzak, Thomas ; Pecci, Isabelle ; Martin, Benoît: Static and dynamic tactile directional cues experiments with VTPlayer mouse. In: *Proceedings of EuroHaptics*, 2006, S. 63–68
- [PPP94] Pester, Eleanor J. ; Petrosko, Joseph M. ; Poppe, Karen J.: Optimum Size and Spacing for Introducing Blind Adults to the Braille Code. In: *Re:View* 26 (1994), Nr. 1, S. 15–22
- [PRB⁺11] Plimmer, Beryl ; Reid, Peter ; Blagojevic, Rachel ; Crossan, Andrew ; Brewster, Stephen: Signing on the tactile line: A multimodal system for teaching handwriting to blind children. In: *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)* 18 (2011), Nr. 3, S. 17:1–17:29
- [Pre09] Prescher, Denise: *Ein taktiler Fenstersystem mit Multitouch-Bedienung*, Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, Diplomarbeit, 2009
- [Pre14] Prescher, Denise: Redesigning input controls of a touch-sensitive pin-matrix device. In: *Proceedings of the International Workshop on Tactile/Haptic User Interfaces for Tabletops and Tablets*, 2014
- [PSD09] Pohl, Mathias ; Schmitt, Markus ; Diehl, Stephan: Comparing the Readability of Graph Layouts using Eyetracking and Task-oriented Analysis. In: *Computational Aesthetics*, 2009, S. 49–56
- [PSH97] Pavlovic, Vladimir I. ; Sharma, Rajeev ; Huang, Thomas S.: Visual interpretation of hand gestures for human-computer interaction: A review. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 19 (1997), Nr. 7, S. 677–695

- [PST⁺10] Peters, Alexander ; Spies, Roland ; Toussaint, Claude ; Fuxen, David ; Hamberger, Werner: Haptisches Touchpad zur Infotainmentbedienung. In: *i-com* 9 (2010), Nr. 1, S. 58–61
- [PTS⁺09] Pappas, Thrasyvoulos N. ; Tartter, Vivien C. ; Seward, Andrew G. ; Genzer, Boris ; Gourgey, Karen ; Kretzschmar, Ilona: Perceptual dimensions for a dynamic tactile display. In: *Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging* Bd. 7240 International Society for Optics and Photonics, 2009, S. 72400K-1 – 72400K-12
- [PW16a] Prescher, Denise ; Weber, Gerhard: *Comparing Two Approaches of Tactile Zooming on a Large Pin-matrix Device*. 2016. – unveröffentlicht
- [PW16b] Prescher, Denise ; Weber, Gerhard: Locating widgets in different tactile information visualizations. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Bühler, Christian (Hrsg.) ; Penaz, Petr (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2016 (Lecture Notes in Computer Science 9759), S. 100–107
- [PWS10] Prescher, Denise ; Weber, Gerhard ; Spindler, Martin: A tactile windowing system for blind users. In: *Proceedings of the 12th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility* ACM, 2010, S. 91–98
- [PWV09] Petrie, Helen ; Weber, Gerhard ; Völkel, Thorsten: Universal access to multimedia documents. In: Stephanidis, Constantine (Hrsg.): *The Universal Access Handbook*. CRC Press, 2009, Kapitel 46
- [Que94] Quek, Francis K.: Toward a vision-based hand gesture interface. In: Singh, Gurminder (Hrsg.) ; Feiner, Steven K. (Hrsg.) ; Thalmann, Daniel (Hrsg.): *Virtual Reality Software and Technology*. World Scientific, 1994, S. 17–31
- [RAD96] Ramstein, Christophe ; Arcand, Jean-François ; Deveault, Martin: Adaptive user interfaces with force feedback. In: *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems* ACM, 1996, S. 406–407
- [Ram96] Ramstein, Christophe: Combining haptic and braille technologies: design issues and pilot study. In: *Proceedings of the Second Annual ACM Conference on Assistive Technologies* ACM, 1996, S. 37–44
- [RC08] Rubin, Jeffrey ; Chisnell, Dana: *Handbook of Usability Testing: How to Plan, Design, and Conduct Effective Tests*. John Wiley & Sons, 2008
- [Ret94] Rettig, Marc: Prototyping for tiny fingers. In: *Communications of the ACM* 37 (1994), Nr. 4, S. 21–27
- [RGME07] Rasmus-Gröhn, Kirsten ; Magnusson, Charlotte ; Efring, Håkan: Ahead – Audio-haptic drawing editor and explorer for education. In: *IEEE International Workshop on Haptic, Audio and Visual Environments and Their Applications* IEEE, 2007, S. 62–66
- [RGOB15] Russomanno, Alexander ; Gillespie, R. B. ; O’Modhrain, Sile ; Burns, Mark: The design of pressure-controlled valves for a refreshable tactile display. In: *World Haptics Conference* IEEE, 2015, S. 177–182
- [RH94] Ramstein, Christophe ; Hayward, Vincent: The pantograph: a large workspace haptic device for multi-modal human-computer interaction. In: *Conference companion on Human Factors in Computing Systems* ACM, 1994, S. 57–58
- [RH09] Runeson, Per ; Höst, Martin: Guidelines for conducting and reporting case study research in software engineering. In: *Empirical Software Engineering* 14 (2009), Nr. 2, S. 131–164

- [ROE04] Rotard, Martin ; Otte, Kerstin ; Ertl, Thomas: Exploring scalable vector graphics for visually impaired users. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang L. (Hrsg.) ; Burger, Dominique (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2004 (Lecture Notes in Computer Science 3118), S. 725–730
- [RP10] Rastogi, Ravi ; Pawluk, Dianne T.: Automatic, intuitive zooming for people who are blind or visually impaired. In: *Proceedings of the 12th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility* ACM, 2010, S. 239–240
- [RPK10] Rastogi, Ravi ; Pawluk, Dianne T. ; Ketchum, Jessica M.: Issues of using tactile mice by individuals who are blind and visually impaired. In: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 18 (2010), Nr. 3, S. 311–318
- [RPK13] Rastogi, Rajiv ; Pawluk, TV ; Ketchum, Jessica: Intuitive tactile zooming for graphics accessed by individuals who are blind and visually impaired. In: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 21 (2013), Nr. 4, S. 655–663
- [RRL⁺09] Rantala, Jussi ; Raisamo, Roope ; Lylykangas, Jani ; Surakka, Veikko ; Raisamo, Jukka ; Salminen, Katri ; Pakkanen, Toni ; Hippula, Arto: Methods for presenting braille characters on a mobile device with a touchscreen and tactile feedback. In: *IEEE Transactions on Haptics* 2 (2009), Nr. 1, S. 28–39
- [RRS04] Röder, Brigitte ; Rösler, Frank ; Spence, Charles: Early vision impairs tactile perception in the blind. In: *Current Biology* 14 (2004), Nr. 2, S. 121–124
- [RSI96] Rudd, Jim ; Stern, Ken ; Isensee, Scott: Low vs. high-fidelity prototyping debate. In: *interactions* 3 (1996), Nr. 1, S. 76–85
- [SA01] Sheppard, Linda ; Aldrich, Frances K.: Tactile graphics in school education: perspectives from teachers. In: *British Journal of Visual Impairment* 19 (2001), Nr. 3, S. 93–97
- [Sam10] Samur, Evren: *Systematic Evaluation Methodology and Performance Metrics for Haptic Interfaces*, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Diss., 2010
- [Sas91] Sasse, Martina-Angela: How to T(r)ap Users' Mental Models. In: Tauber, Michael J. (Hrsg.) ; Ackermann, David (Hrsg.): *Mental Models and Human-Computer Interaction* 2. North-Holland, 1991 (Human Factors in Information Technology 7), S. 59–79
- [SB06] Sarodnick, Florian ; Brau, Henning: *Methoden der Usability Evaluation – Wissenschaftliche Grundlagen und praktische Anwendung*. Verlag Hans Huber, 2006
- [SBCEM14] Sánchez, Jaime ; Borba Campos, Marcia de ; Espinoza, Matías ; Merabet, Lotfi B.: Audio haptic videogaming for developing wayfinding skills in learners who are blind. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Intelligent User Interfaces* ACM, 2014, S. 199–207
- [SBC99] Schmidt, Albrecht ; Beigl, Michael ; Gellersen, Hans-W: There is more to context than location. In: *Computers & Graphics* 23 (1999), Nr. 6, S. 893–901
- [SBS10] Stefano, Federici ; Borsci, Simone ; Stamerra, Gianluca: Web usability evaluation with screen reader users: implementation of the partial concurrent thinking aloud technique. In: *Cognitive Processing* 11 (2010), Nr. 3, S. 263–272
- [SCF⁺12] Southern, Caleb ; Clawson, James ; Frey, Brian ; Abowd, Gregory D. ; Romero, Mario: An evaluation of BrailleTouch: mobile touchscreen text entry for the visually impaired. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services* ACM, 2012, S. 317–326

- [Sch85a] Schmidt, Robert F.: Somatoviscerale Sensibilität. In: Schmidt, Robert F. (Hrsg.): *Grundriß der Sinnesphysiologie*. Springer-Verlag, 1985, S. 36–81
- [Sch85b] Schweikhardt, Waltraud: Bildschirmtext – ein Rechnerunterstütztes Kommunikationsmittel auch für Blinde. In: Hansen, Hans R. (Hrsg.): *GI/OCC/ÖGI-Jahrestagung 1985*. Springer, 1985 (Informatik Fachberichte 108), S. 691–701
- [Sch85c] Schweikhardt, Waltraud: Interaktives Erkunden tastbarer Grafiken durch Blinde. In: Bullinger, Hans-Jörg (Hrsg.): *Software-Ergonomie'85: Mensch-Computer-Interaktion*. B.G. Teubner, 1985, S. 366–375
- [Sch02] Schuffelen, Marco: *On editing graphics for the blind*. URL: http://piaf-tactile.com/docs/Tactile_Graphics_Manual.pdf, 2002
- [SDMRG03] Sjöström, Calle ; Danielsson, Henrik ; Magnusson, Charlotte ; Rasmus-Gröhn, Kirsten: Phantom-based haptic line graphics for blind persons. In: *Visual Impairment Research* 5 (2003), Nr. 1, S. 13–32
- [SH98] Simon, Cecilia ; Huertas, Juan A.: How blind readers perceive and gather information written in braille. In: *Journal of Visual Impairment and Blindness* 92 (1998), Nr. 5, S. 322–330
- [SH11] Sears, Andrew ; Hanson, Vicki L.: Representing users in accessibility research. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* ACM, 2011, S. 2235–2238
- [Shn96] Shneiderman, Ben: The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualizations. In: *IEEE Symposium on Visual Languages* IEEE, 1996, S. 336–343
- [Sie13] Siedel, Lukas: *Vergleich von nicht-visuellen Interaktionsmechanismen basierend auf taktiler und auditiver Ausgabe*, Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, Großer Beleg, 2013
- [Sim11] Simpson, Christine: Living in a Tactile World: A Salute to Braille and other Tactile Markings. In: *Proceedings of World Congress Braille21*. Leipzig : Deutsche Zentralbücherei für Blinde (DZB), September 2011, S.1–5. – URL: http://braille21.dzb.de/files/papers_topic_6_simpson.doc – letzter Zugriff am 07.07.2016
- [SIML05] Slabosky, Beverly ; Ivory, Melody Y. ; Martin, Andrew P. ; Lacenski, Amelia: An Overview of Tactile Graphics Production and HCI Barriers in Existing Software Resources / University of Washington, Information School. 2005. – Technical Report. – IS-TR-2005-08-03
- [SK84] Schweikhardt, Waltraud ; Klöpfer, Klaus: Rechnerunterstützte Aufbereitung von Bildschirmtext-Grafiken in eine tastbare Darstellung. In: *Internationale Konferenz über Reliefdarstellungen für Blinde*. Deutsche Zentralbücherei für Blinde zu Leipzig, 1984, S. 97–107
- [SKNW09] Schiewe, Maria ; Köhlmann, Wiebke ; Nadig, Oliver ; Weber, Gerhard: What you feel is what you get: Mapping GUIs on planar tactile displays. In: *Universal Access in Human-Computer Interaction. Intelligent and Ubiquitous Interaction Environments*. Springer, 2009 (Lecture Notes in Computer Science 5615), S. 564–573
- [SKW10] Spindler, Martin ; Kraus, Michael ; Weber, Gerhard: A graphical tactile screen-explorer. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang (Hrsg.) ; Karshmer, Arthur (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2010 (Lecture Notes in Computer Science 6180), S. 474–481
- [SKY14] Stangl, Abigale ; Kim, Jeeun ; Yeh, Tom: 3D printed tactile picture books for children with visual impairments: a design probe. In: *Proceedings of the 2014 Conference on Interaction Design and Children* ACM, 2014, S. 321–324

- [SM04] 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), Nr. 6, S. 751-789
- [SM13a] Schumann, Heidrun ; Müller, Wolfgang: *Visualisierung: Grundlagen und allgemeine Methoden*. Springer-Verlag, 2013
- [SM13b] Shafik, M ; Mills, B: An Innovative Micro Actuator Using Electro Rheological Fluid Technology for Visually Impaired Tactile Display Information Technology Access Applications. In: *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition* American Society of Mechanical Engineers, 2013, S. V011T06A016
- [Sny03] Snyder, Carolyn: *Paper prototyping: The fast and easy way to design and refine user interfaces*. Morgan Kaufmann, 2003
- [SP96] Siira, Juhani ; Pai, Dinesh K.: Haptic texturing - a stochastic approach. In: *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation* IEEE, 1996, S. 557-562
- [SPA75] Schwartz, Arthur S. ; Perey, Alan J. ; Azulay, Alan: Further analysis of active and passive touch in pattern discrimination. In: *Bulletin of the Psychonomic Society* 6 (1975), Nr. 1, S. 7-9
- [SPP15] Savva, Andreas ; Petrie, Helen ; Power, Christopher: Comparing Concurrent and Retrospective Verbal Protocols for Blind and Sighted Users. In: Abascal, Julio (Hrsg.) ; Barbosa, Simone (Hrsg.) ; Fetter, Mirko (Hrsg.) ; Gross, Tom (Hrsg.) ; Palanque, Philippe (Hrsg.) ; Winckler, Marco (Hrsg.): *Human-Computer Interaction - INTERACT 2015*. Springer, 2015 (Lecture Notes in Computer Science 9296), S. 55-71
- [SRK+16] Swaminathan, Saiganesh ; Roumen, Thijs ; Kovacs, Robert ; Stangl, David ; Mueller, Stefanie ; Baudisch, Patrick: Linespace: A Sensemaking Platform for the Blind. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* ACM, 2016, S. 2175-2185
- [SS09] Sonderegger, Andreas ; Sauer, Juergen: The influence of laboratory set-up in usability tests: effects on user performance, subjective ratings and physiological measures. In: *Ergonomics* 52 (2009), Nr. 11, S. 1350-1361
- [SSCR01] Stankov, Lazar ; Seizova-Caji, Tatjana ; Roberts, Richard D.: Tactile and kinesthetic perceptual processes within the taxonomy of human cognitive abilities. In: *Intelligence* 29 (2001), Nr. 1, S. 1-29
- [ST07] Shinohara, Kristen ; Tenenberg, Josh: Observing Sara: a case study of a blind person's interactions with technology. In: *Proceedings of the 9th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility* ACM, 2007, S. 171-178
- [SW09] Schmidt, Michael ; Weber, Gerhard: Multitouch haptic interaction. In: Stephanidis, Constantine (Hrsg.): *Universal Access in Human-Computer Interaction. Intelligent and Ubiquitous Interaction Environments*. Springer, 2009 (Lecture Notes in Computer Science 5615), S. 574-582
- [SYU+08] Shimada, Shigenobu ; Yamamoto, Suguru ; Uchida, Yusuke ; Shinohara, Masami ; Shimizu, Yutaka ; Shimojo, Makoto: New design for a dynamic tactile graphic system for blind computer users. In: *SICE Annual Conference* IEEE, 2008, S. 1474-1477
- [TA79] Terzoeff, Ivan ; Ashcroft, Samuel C.: A Pilot Study and Research on Increasing Reading Rates with the Optacon (Final Report) / Ohio State University, Columbus College of Education. 1979. - Forschungsbericht

- [Tac12] Tactus Technology: *Tactus - A New Dimension of Touch*. URL: <http://tactustechnology.com/wp-content/uploads/2014/08/White-Paper-New-Tagged-PDF.pdf>, 2012. – letzter Zugriff am 07.07.2016
- [Tar11] Taras, Christiane: *Darstellungs- und Interaktionstechniken zur effizienten Nutzung grafischer Oberflächen durch Blinde und Sehbehinderte*, Universität Stuttgart, Institut für Visualisierung und interaktive Systeme, Diss., 2011
- [TBWW11] Toennies, Jenna L. ; Burgner, Jessica ; Withrow, Thomas J. ; Webster, Robert J.: Toward haptic/aural touchscreen display of graphical mathematics for the education of blind students. In: *World Haptics Conference IEEE*, 2011, S. 373–378
- [TE09] Taras, Christiane ; Ertl, Thomas: Interaction with Colored Graphical Representations on Braille Devices. In: *Universal Access in Human-Computer Interaction. Addressing Diversity* (2009), Nr. 5614, S. 164–173
- [Tel14] Telea, Alexandru C.: *Data Visualization: Principles and Practice (Second Edition)*. CRC Press, 2014
- [The14] The PDF Association, PDF/UA Competence Center: *Matterhorn Protocol 1.02 - PDF/UA Conformance Testing Model*. URL: http://www.pdfa.org/wp-content/uploads/2014/06/MatterhornProtocol_1-02.pdf, 2014. – letzter Zugriff am 03.06.2016
- [Thi07] Thimbleby, Harold: *Press on: principles of interaction programming*. The MIT Press, 2007
- [TMG15] Trewin, Shari ; Marques, Diogo ; Guerreiro, Tiago: Usage of Subjective Scales in Accessibility Research. In: *Proceedings of the 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility ACM*, 2015, S. 59–67
- [TRSE10] Taras, Christiane ; Raschke, Michael ; Schlegel, Thomas ; Ertl, Thomas: Running graphical desktop applications on tactile graphics displays made easy. In: *Proceedings of 3rd International Conference on Software Development for Enhancing Accessibility and Fighting Info-Exclusion*, 2010, S. 141–147
- [TUD11] Weber, Gerhard (Hrsg.): *Hyperbraille - Schlussbericht zum Förderprojekt des BMWi*. 2011
- [UBS95] Ungar, Simon ; Blades, Mark ; Spencer, Christopher: Visually impaired children's strategies for memorising a map. In: *British Journal of Visual Impairment* 13 (1995), Nr. 1, S. 27–32
- [UBS97] Ungar, Simon ; Blades, Mark ; Spencer, Christopher: Strategies for knowledge acquisition from cartographic maps by blind and visually impaired adults. In: *The Cartographic Journal* 34 (1997), Nr. 2, S. 93–110
- [VPHS07] Velázquez, Ramiro ; Pissaloux, Edwige E. ; Hafez, Moustapha ; Szewczyk, Jerome: Toward low-cost highly portable tactile displays with shape memory alloys. In: *Applied Bionics and Biomechanics* 4 (2007), Nr. 2, S. 57–70
- [VVH07] Vidal-Verdú, Fernando ; Hafez, Moustapha: Graphical tactile displays for visually-impaired people. In: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 15 (2007), Nr. 1, S. 119–130
- [VVMN05] Vidal-Verdú, Fernando ; Madueno, Manuel J. ; Navas, Rafael: Thermopneumatic actuator for tactile displays and smart actuation circuitry. In: *Proceedings of Smart Sensors, Actuators, and MEMS II International Society for Optical Engineering*, 2005, S. 484–492

- [VWB08] Völkel, Thorsten ; Weber, Gerhard ; Baumann, Ulrich: Tactile graphics revised: the novel BrailleDis 9000 pin-matrix device with multitouch input. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachim (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang (Hrsg.) ; Karshmer, Arthur (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2008 (Lecture Notes in Computer Science 5105), S. 835–842
- [War78] Warren, David H.: Perception by the blind. In: Carterette, Edward C. (Hrsg.) ; Friedman, Morton P. (Hrsg.): *Handbook of Perception – Perceptual Ecology* Bd. 10. Academic Press, 1978, S. 65–90
- [WB97a] Way, Thomas P. ; Barner, Kenneth E.: Automatic visual to tactile translation – Part I: human factors, access methods and image manipulation. In: *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering* 5 (1997), Nr. 1, S. 81–94
- [WB97b] Way, Thomas P. ; Barner, Kenneth E.: Automatic visual to tactile translation – Part II: Evaluation of the TACTile image creation system. In: *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering* 5 (1997), Nr. 1, S. 95–105
- [WB06a] Wall, Steven ; Brewster, Stephen: Feeling what you hear: tactile feedback for navigation of audio graphs. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* ACM, 2006, S. 1123–1132
- [WB06b] Wall, Steven A. ; Brewster, Stephen: Sensory substitution using tactile pin arrays: Human factors, technology and applications. In: *Signal Processing* 86 (2006), Nr. 12, S. 3674–3695
- [WCD+04] Webb, AL ; Carding, PN ; Deary, IJ ; MacKenzie, Kenneth ; Steen, Nick ; Wilson, Janet A.: The reliability of three perceptual evaluation scales for dysphonia. In: *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology and Head & Neck* 261 (2004), Nr. 8, S. 429–434
- [WCHL12] Wijekoon, Dinesh ; Cecchinato, Marta E. ; Hoggan, Eve ; Linjama, Jukka: Electrostatic modulated friction as tactile feedback: intensity perception. In: Isokoski, Poika (Hrsg.) ; Springare, Jukka (Hrsg.): *Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication*. Springer, 2012 (Lecture Notes in Computer Science 7282), S. 613–624
- [Web89a] Weber, Gerhard: *Interaktive Dialogtechniken für blinde Rechnerbenutzer*, Universität Stuttgart, Fakultät für Informatik, Diss., 1989
- [Web89b] Weber, Gerhard: Reading and pointing – modes of interaction for blind users. In: *Information Processing* (1989), S. 535–540
- [Web90] Weber, Robert P.: *Basic Content Analysis (Second Edition)*. Sage, 1990 (Quantitative Applications in the Social Sciences 49)
- [Web00] Weber, Gerhard: *Temporale Modellierung multimedialer interaktiver Systeme – Integration visueller und nicht-visueller Interaktionsformen*, Universität Magdeburg, Habilitationsschrift, 2000
- [Web08] Web Accessibility Initiative (WAI): Richtlinien für barrierefreie Webinhalte (WCAG) 2.0 / World Wide Web Consortium (W3C). 2008 (2.0). – Standard. – URL: https://www.w3.org/Translations/WCAG20-de/_ – letzter Zugriff am 07.07.2016
- [Wer23] Wertheimer, Max: Untersuchungen zur Lehre von der Gestalt. II. In: *Psychological Research* 4 (1923), Nr. 1, S. 301–350
- [WK00] Wetzel, Robin ; Knowlton, Marie: A comparison of print and braille reading rates on three reading tasks. In: *Journal of Visual Impairment and Blindness* 94 (2000), Nr. 3, S. 146–154

- [WLH04] Wagner, Christopher R. ; Lederman, Susan J. ; Howe, Robert D.: Design and performance of a tactile shape display using rc servomotors. (2004)
- [WLVK08] Wijntjes, Maarten W. ; Lienen, Thijs van ; Verstijnen, Ilse M. ; Kappers, Astrid M.: Look what I have felt: Unidentified haptic line drawings are identified after sketching. In: *Acta Psychologica* 128 (2008), Nr. 2, S. 255–263
- [WMW09] Wobbrock, Jacob O. ; Morris, Meredith R. ; Wilson, Andrew D.: User-defined gestures for surface computing. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* ACM, 2009, S. 1083–1092
- [Wor96] Wormsley, Diane P.: Reading rates of young braille-reading children. In: *Journal of Visual Impairment & Blindness* 90 (1996), Nr. 3, S. 278–82
- [WPKM94] Weber, Gerhard ; Petrie, Helen ; Kochanek, Dirk ; Morley, Sarah: Training blind people in the use of graphical user interfaces. In: Zagler, Wolfgang L. (Hrsg.) ; Busby, Geoffrey (Hrsg.) ; Wagner, Roland R. (Hrsg.): *Computers for Handicapped Persons*. Springer, 1994 (Lecture Notes in Computer Science 860), S. 25–31
- [WS]⁺14] Wilhelm, Elisabeth ; Schwarz, Thorsten ; Jaworek, Gerhard ; Voigt, Achim ; Rapp, Bastian E.: Towards displaying graphics on a cheap, large-scale braille display. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Fels, Deborah (Hrsg.) ; Archambault, Dominique (Hrsg.) ; Penáz, Petr (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2014 (Lecture Notes in Computer Science 8547), S. 662–669
- [WSMS16] Wörtwein, Torsten ; Schauerte, Boris ; Müller, Karin ; Stiefelhagen, Rainer: Mobile Interactive Image Sonification for the Blind. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Bühler, Christian (Hrsg.) ; Penaz, Petr (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2016 (Lecture Notes in Computer Science 9758), S. 212–219
- [WSS⁺70] White, Benjamin W. ; Saunders, Frank A. ; Scadden, Lawrence ; Bach-Y-Rita, Paul ; Collins, Carter C.: Seeing with the skin. In: *Perception & Psychophysics* 7 (1970), Nr. 1, S. 23–27
- [XIP⁺11] Xu, Cheng ; Israr, Ali ; Poupyrev, Ivan ; Bau, Olivier ; Harrison, Chris: Tactile display for the visually impaired using TeslaTouch. In: *CHI'11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* ACM, 2011, S. 317–322
- [XZW10] Xu, Xuemiao ; Zhang, Linling ; Wong, Tien-Tsin: Structure-based ASCII art. In: *ACM Transactions on Graphics* 29 (2010), Nr. 4, S. 52
- [YB02] Yu, Wai ; Brewster, Stephen: Comparing two haptic interfaces for multimodal graph rendering. In: *Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* IEEE, 2002, S. 3–9
- [YKB03] Yu, Wai ; Kangas, Katri ; Brewster, Stephen: Web-based haptic applications for blind people to create virtual graphs. In: *Proceedings of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* IEEE, 2003, S. 318–325
- [YKK⁺09] Yang, Tae-Heon ; Kim, Sang-Youn ; Kim, Chong H. ; Kwon, Dong-Soo ; Book, Wayne J.: Development of a miniature pin-array tactile module using elastic and electromagnetic force for mobile devices. In: *Third Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* IEEE, 2009, S. 13–17
- [YRB01] Yu, Wai ; Ramloll, Ramesh ; Brewster, Stephen: Haptic graphs for blind computer users. In: Brewster, Stephen (Hrsg.) ; Murray-Smith, Roderick (Hrsg.): *Haptic Human-Computer Interaction*. Springer, 2001 (Lecture Notes in Computer Science 2058), S. 41–51

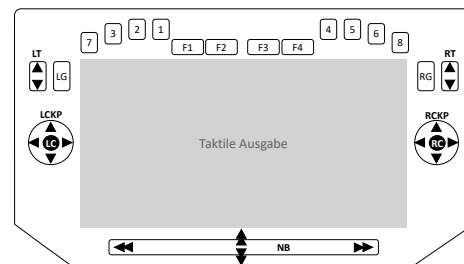
- [ZGS⁺07] Ziat, Mounia ; Gapenne, Olivier ; Stewart, John ; Lenay, Charles ; Bausse, Jerome: Design of a Haptic Zoom: levels and steps. In: *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (World Haptics 2007)* IEEE, 2007, S. 102–108
- [ZW10] Zeng, Limin ; Weber, Gerhard: Audio-haptic browser for a geographical information system. In: Miesenberger, Klaus (Hrsg.) ; Klaus, Joachin (Hrsg.) ; Zagler, Wolfgang (Hrsg.) ; Karshmer, Arthur (Hrsg.): *Computers Helping People with Special Needs*. Springer, 2010 (Lecture Notes in Computer Science 6180), S. 466–473
- [ZWF15] Zeng, Limin ; Weber, Gerhard ; Fickel, Alexander: ETA Wizard App: Make Design and Evaluation of Accessible Electronic Travel Aids Easy. In: Abascal, Julio (Hrsg.) ; Barbosa, Simone (Hrsg.) ; Fetter, Mirko (Hrsg.) ; Gross, Tom (Hrsg.) ; Palanque, Philippe (Hrsg.) ; Winckler, Marco (Hrsg.): *Human-Computer Interaction – INTERACT 2015*. Springer, 2015 (Lecture Notes in Computer Science 9299), S. 469–472

Eingabekommandos für den HyperReader

Im Folgenden erfolgt eine Gegenüberstellung der Tastatur- sowie der Tastenkommandos auf dem BrailleDis 9000 und dem BrailleDis 7200 für die wichtigsten HyperReader Funktionalitäten. Die Tastenbezeichnungen für die beiden Geräte finden sich in Abbildung A.1.



a) BrailleDis 9000



b) BrailleDis 7200

Abbildung A.1: Schematische Darstellung der BrailleDis Geräte und deren Bedienelemente

Tabelle A.1: Kommandos zur Bedienung der Bereiche

Aktion	Tastatur-Eingabe	Eingabe per BrailleDis 9000	Eingabe per BrailleDis 7200
Ein-/Ausblenden des Kopfbereichs	HR+k	138	138
Ein-/Ausblenden der Ansichtsartenliste	HR+v	12368	12368
Ein-/Ausblenden der Strukturleiste	HR+s	2348	2348
Ein-/Ausblenden der Fenstertitel-Leiste	HR+l	1238	1238
Ein-/Ausblenden des Detailbereichs	HR+d	1458	1458
Ändern des Kopfbereichsstatus (Umschalten zwischen Titel- und Menü-Anzeige)	HR+STRG+t	23458	23458
Ändern des Detailbereichsstatus (Umschalten zwischen Detailinformation und Braillex-Anzeige)	STRG+WIN+j	24578	24578
Ein-/Ausschalten der Vollbild-Darstellung	HR+ALT+ENTER	12367	12367
Alle Bereiche einblenden	HR+ALT+b	128	128
vertikale Teilung des Darstellungsbereichs	HR+SHIFT+t	234578	234578
horizontale Teilung des Darstellungsbereichs	HR+SHIFT+g	124578	124578
Blättern im Detailbereich	HR+Strg+Num6 (vor) bzw. HR+Strg+Num4 (zurück)	-	-
Blättern in der Fenstertitel-Leiste	HR+Strg+Num2 (vor) bzw. HR+Strg+Num8 (zurück)	-	-

HR (HyperReader Modifikationstaste) = Caps Lock

Tabelle A.2: Kommandos zur Erkundung

Aktion	Tastatur-Eingabe	Eingabe per BrailleDis 9000	Eingabe per BrailleDis 7200
Vergrößern einfach (kleiner Zoom-in)	HR++ (Plus-Zeichen)	1	LT (nach oben)
Vergrößern fünffach (großer Zoom-in)	HR+^	127	RT (nach oben)
Verkleinern einfach (kleiner Zoom-out)	HR+- (Minus-Zeichen)	7	LT (nach unten)
Verkleinern fünffach (großer Zoom-out)	HR+SHIFT+^	127+L	RT (nach unten)
An Höhe anpassen	HR+SHIFT+h	3	3
1:1-Darstellung	HR+SHIFT+. (Punkt)	3+R	1+F1
Zoomstufe abfragen	HR+SHIFT+z	135678	135678
Minimap ein/aus	HR+SHIFT+m	2	2
Verschieben nach links	HR+Pfeil links	4	NB (1. Stufe nach links)
Verschieben nach oben	HR+Pfeil rauf	5	NB (1. Stufe nach oben)
Verschieben nach unten	HR+Pfeil runter	6	NB (1. Stufe nach unten)
Verschieben nach rechts	HR+Pfeil rechts	8	NB (1. Stufe nach rechts)
Blättern nach links	HR+SHIFT+Pfeil links	4+R	NB (2. Stufe nach links)
Blättern nach oben	HR+SHIFT+Pfeil rauf	5+R	NB (2. Stufe nach oben)
Blättern nach unten	HR+SHIFT+Pfeil runter	6+R	NB (2. Stufe nach unten)
Blättern nach rechts	HR+SHIFT+Pfeil rechts	8+R	NB (2. Stufe nach rechts)
Sprung zum linken Rand	HR+Pos1	46+R	LCKP links
Sprung zum oberen Rand	HR+BildAuf	45+R	LCKP oben
Sprung zum unteren Rand	HR+BildAb	68+R	LCKP unten
Sprung zum rechten Rand	HR+ENDE	58+R	LCKP rechts
Sprung zum Systemfokus	HR+SHIFT+f	124	124
Sprung zum Mausfokus	HR+STRG+f	1247	1247
Letzte Zoom-/Scroll-Operation rückgängig machen	HR+z	1356+R	13568

HR (HyperReader Modifikationstaste) = Caps Lock

Tabelle A.3: Kommandos zur Bedienung der Braille-Fenster

Aktion	Tastatur-Eingabe	Eingabe per BrailleDis 9000	Eingabe per BrailleDis 7200
Bereich aktiv setzen	HR+a	-	-
Fenster minimieren	HR+ALT+n	1345+L	134578
Fenster maximieren	HR+ALT+x	1346+L	134678
Fenster wiederherstellen	HR+ALT+w	2456+L	245678
Fenster schließen	HR+ALT+s	234+L	23478
Braille-Fenster vorwärts durchgehen	HR+TAB	4568	4568
Braille-Fenster rückwärts durchgehen	HR+SHIFT+TAB	1237	1237
Desktop anzeigen	HR+SHIFT+d	14578	14578

HR (HyperReader Modifikationstaste) = Caps Lock

Tabelle A.4: Kommandos zu weiteren wichtigen HyperReader-Funktionen

Aktion	Tastatur-Eingabe	Eingabe per BrailleDis 9000	Eingabe per BrailleDis 7200
Gesten-Modus (Erkundung bzw. Maus)	STRG+WIN+g	L bzw. R	LG bzw. RG
Ansicht wechseln	STRG+SHIFT+ENTER	1236	1236
Aktuelle Ansicht neu rendern	HR+ESC	1235	1235
Darstellung invertieren	HR+ALT+i	-	-
Quickinfo erneut anzeigen	HR+STRG+q	12345	12345
Touch-Rekalibrierung	STRG+WIN+k	-	RG+13
Sprachausgabe stoppen	STRG	L+R	F1
Sprachausgabe um eine Aussage zurückspulen	HR+STRG+Pfeil links	123+L+R	1+F1+F2
Sprachausgabe um eine Aussage vorwärts spulen	HR+STRG+Pfeil rechts	456+L+R	4+F3+F4
Maus-Erkundungsmodus	STRG+WIN+m	-	1347
Ein-/Ausschalten der Tastaturemulation	STRG+WIN+b	12345678+L+R	12345678
Suchfunktion innerhalb des OSM-Baums	HR+f	12478	12478
Aufruf Konfigurationsmanager	HR+m	134	134

HR (HyperReader Modifikationstaste) = Caps Lock

Tabelle A.5: Kommandos zur PC-Tastenenulation auf der Stiftplatte

Tastatur-Eingabe	Eingabe per BrailleDis 9000	Eingabe per BrailleDis 7200
Pfeiltasten	-	RCKP
Pos1	-	4
Ende	-	8
Bild-Auf	-	5
Bild-Ab	-	6
Enter	-	RC
Tab	-	45
Shift+Tab	-	12

Taxonomie zur taktilen Interaktion

In den Abbildungen B.1 bis B.3 findet sich die vollständige grafische Darstellung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Taxonomie zur taktilen Interaktion. Zum Zwecke einer besseren Übersichtlichkeit sind die drei Dimensionen der Taxonomie, d. h. „*Intention*“, „*Interaktionsart*“ und „*Gerät*“, jeweils separat dargestellt.

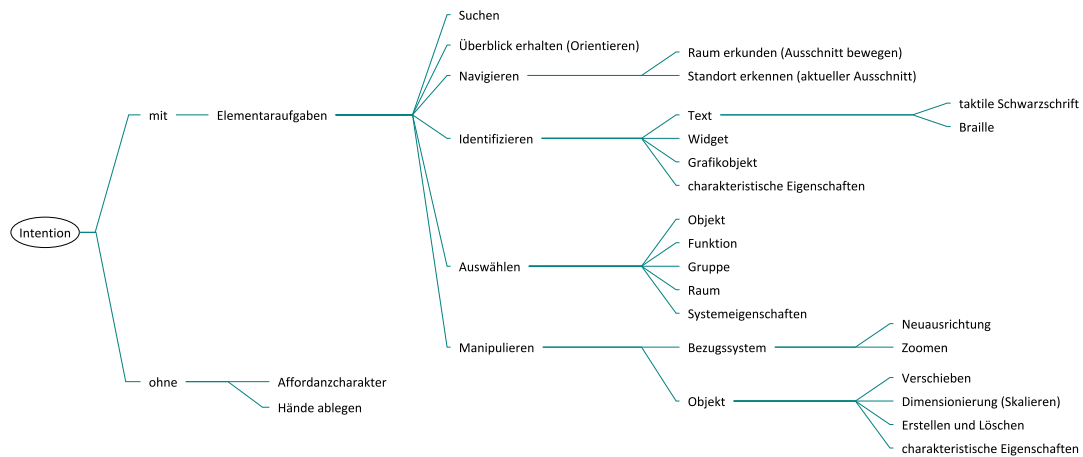


Abbildung B.1: Taxonomie zur taktilen Interaktion (Kategorie Intention)

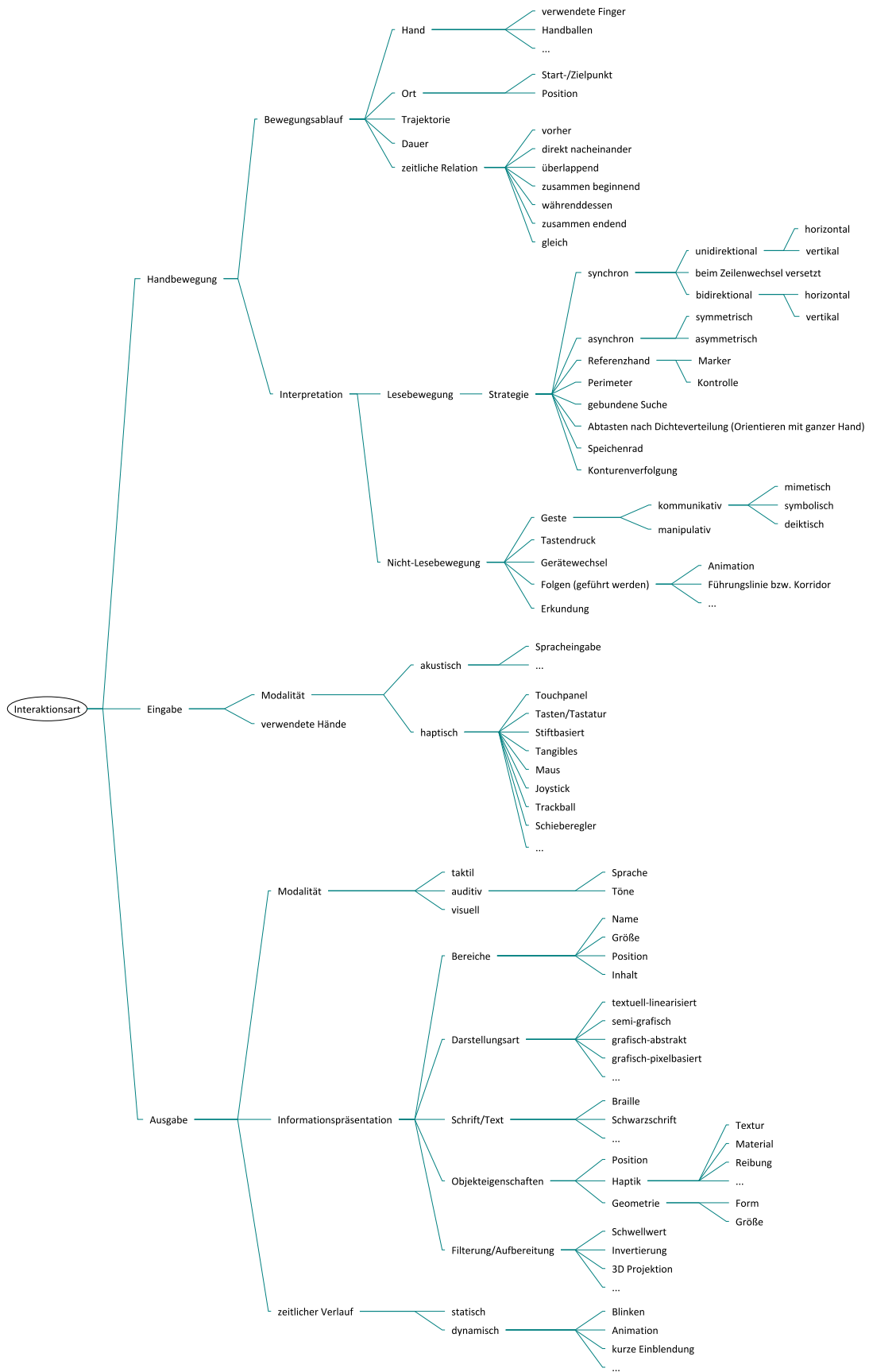
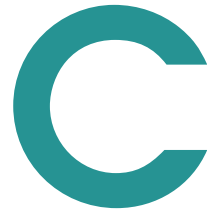


Abbildung B.2: Taxonomie zur taktilen Interaktion (Kategorie Interaktionsart)



Abbildung B.3: Taxonomie zur taktilen Interaktion (Kategorie Gerät)



Beschreibung von Interaktionen auf dem BrailleDis 7200

C.1 Einfache Erkundungsinteraktion

Als Beispiel einer einfachen Erkundungsinteraktion wird das Lesen von Brailletext beschrieben (vgl. auch Abbildung C.1).

- Intention: Identifizieren von Brailletext
- Handbewegung
 - Bewegungsablauf
 - * rechte und linke Hand
 - Finger: Zeige- und Mittelfinger
 - Ort: Startpunkt (0/9), Zielpunkt (116/47)
 - Trajektorie: horizontal zickzackförmig
 - Dauer: 32 Sekunden
 - * zeitliche Relation: gleich (rechte Hand = linke Hand)
 - Interpretation: Lesebewegung (synchron unidirektional horizontal)

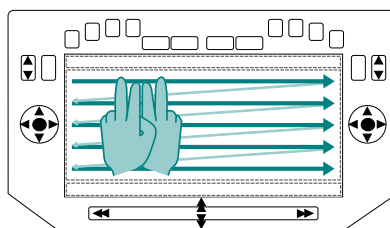


Abbildung C.1: Schematische Darstellung einer unidirektional horizontalen Leseinteraktion auf dem BrailleDis 7200

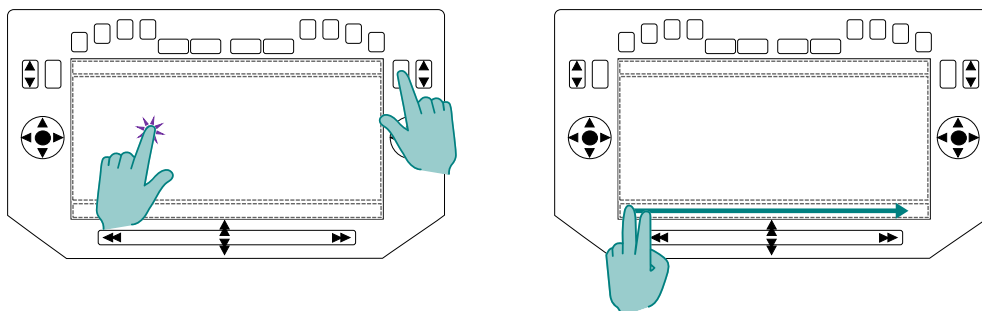
- keine Eingabe
- Ausgabe während der Lesebewegung
 - Modalität: taktil
 - Informationspräsentation
 - * Bereiche
 - Kopfbereich (AreaPositions.Top, 120 x 6 Pins)
 - Detailbereich (AreaPositions.Bottom, 120 x 6 Pins)
 - Darstellungsbereich (AreaPositions.Middle_Left, 120 x 48 Pins)
 - * Darstellungsart: textuell-linearisiert (Arbeitsansicht)
 - * Schrift/Text: Braille
 - zeitlicher Verlauf: statisch

C.2 Komplexe Interaktion

Als Beispiel einer komplexen Interaktion wird das Editieren eines Textfelds beschrieben. Diese Interaktion besteht aus drei Teilinteraktionen: 1) Klickgeste auf das Textfeld (vgl. Abbildung C.2a), 2) Eingabe des Textes mittels Tastatur und 3) Überprüfung der Eingabe (Lesen von Brailletext im Detailbereich, vgl. Abbildung C.2b).

1. Auswahl des Textfelds

- Intention: Auswählen (Objekt)
- Handbewegung
 - Bewegungsablauf
 - * rechte Hand
 - Finger: Zeigefinger
 - Ort: rechte Gestentaste
 - Trajektorie: Absenken/Anheben
 - Dauer: 0,5 Sekunden
 - * linke Hand
 - Finger: Zeigefinger
 - Ort: Startpunkt (32/25), Zielpunkt (32/25)



a) Interaktion zum Anwählen eines Elementes

b) Leseinteraktion im Detailbereich

Abbildung C.2: Schematische Darstellung von Interaktionen zum Editieren eines Textfelds

- Trajektorie: Punkt
 - Dauer: 0,2 Sekunden
 - * zeitliche Relation: währenddessen (linke Hand *d* rechte Hand)
- Interpretation: Nicht-Lesebewegung (deiktische Geste)
- Eingabe
 - Modalität: taktil (Taste als aktivierende Technologie + Geste)
 - verwendete Hände: rechte Hand für die Taste und linke Hand für die Geste
- Ausgabe *nach der Geste*
 - Modalität: taktil
 - Informationspräsentation
 - * Bereiche
 - Kopfbereich (AreaPositions.Top, 120 x 6 Pins)
 - Detailbereich (AreaPositions.Bottom, 120 x 6 Pins)
 - Darstellungsbereich (AreaPositions.Middle_Left, 120 x 48 Pins)
 - * Darstellungsart: semi-grafisch (Symbolansicht)
 - * Schrift/Text: Braille
 - zeitlicher Verlauf: statisch + dynamisch (Blinken des Fokus)

2. Manipulation des Textes

- Intention: Manipulieren (Verändern charakteristischer Eigenschaften des Objekts)
- Handbewegung
 - Bewegungsablauf
 - * rechte und linke Hand
 - Finger: alle
 - Ort: außerhalb des Gerätes (Tastatur)
 - Trajektorie: Absenken/Anheben an mehreren Punkten
 - Dauer: 7 Sekunden
 - * zeitliche Relation: gleich (linke Hand = rechte Hand)
 - Interpretation: Nicht-Lesebewegung (Tastendruck)
- Eingabe
 - Modalität: haptisch (externe Tastatur)
 - verwendete Hände: beide
- Ausgabe *während der Eingabe*
 - Modalität: taktil und auditiv¹
 - Informationspräsentation
 - * Bereiche
 - Kopfbereich (AreaPositions.Top, 120 x 6 Pins)
 - Detailbereich (AreaPositions.Bottom, 120 x 6 Pins)
 - Darstellungsbereich (AreaPositions.Middle_Left, 120 x 48 Pins)
 - * Darstellungsart: semi-grafisch (Symbolansicht)
 - * Schrift/Text: Braille
 - zeitlicher Verlauf: statisch + dynamisch (Blinken des Fokus)

¹ Ansage der eingegebenen Buchstaben per Sprachausgabe

3. Lesen des eingegebenen Textes im Detailbereich

- Intention: Identifizieren von Brailletext
- Handbewegung
 - Bewegungsablauf
 - * linke Hand
 - Finger: Zeige- und Mittelfinger
 - Ort: Startpunkt (0/58), Zielpunkt (115/58)
 - Trajektorie: gerade Linie
 - Dauer: 4 Sekunden
 - * *zeitliche Relation nicht notwendig, da nur linke Hand verwendet (rechte Hand ruht)*
 - Interpretation: Lesebewegung (unidirektional horizontal)
- *keine Eingabe*
- *Ausgabe während der Lesebewegung*
 - Modalität: taktil
 - Informationspräsentation
 - * Bereiche
 - Kopfbereich (AreaPositions.Top, 120 x 6 Pins)
 - Detailbereich (AreaPositions.Bottom, 120 x 6 Pins)
 - Darstellungsbereich (AreaPositions.Middle_Left, 120 x 48 Pins)
 - * Darstellungsart: semi-grafisch (Symbolansicht)
 - * Schrift/Text: Braille
 - zeitlicher Verlauf: statisch + dynamisch (Blinken des Fokus)

Zuordnung der Stiftplattenbedienung zu den Elementaraufgaben

Die Funktionalitäten des HyperReaders sowie des Tangram Arbeitsplatzes lassen sich, wie in den folgenden Tabellen dargestellt, erfolgreich den angepassten Elementaraufgaben der ISO 9241-910 (vgl. Abbildung 4.15) zuweisen.

Tabelle D.1: Zuordnung der Stiftplattenbedienung zur Elementaraufgabe Suchen

Elementaraufgabe: Suchen		HyperReader/Tangram-Arbeitsplatz Funktionalitäten	
Betroffenes Objekt	Eigenschaft	Interaktionsobjekt	Funktion
		OSM-Baum	nach Begriff durchsuchen
		<i>Strukturleiste unterstützt Suchen</i>	

Tabelle D.2: Zuordnung der Stiftplattenbedienung zur Elementaraufgabe Überblick erhalten (Orientieren)

Elementaraufgabe: Überblick erhalten (Orientieren)		HyperReader/Tangram-Arbeitsplatz Funktionalitäten	
Betroffenes Objekt	Eigenschaft	Interaktionsobjekt	Funktion
		Minimap	ein/aus
		<i>Überblicksansicht erlaubt das Überblick-Verschaffen</i>	

Tabelle D.3: Zuordnung der Stiftplattenbedienung zur Elementaraufgabe Navigieren

Elementaraufgabe: Navigieren		HyperReader/Tangram-Arbeitsplatz Funktionalitäten	
Betroffenes Objekt	Eigenschaft	Interaktionsobjekt	Funktion
Raum erkunden		Detailbereich	blättern
		Fenstertitelleiste	blättern
			scrollen
		Darstellungsbereich	blättern
			Sprung an die Ränder
		Audioausgabe	vor/zurück spulen abbrechen
Standort erkennen		Fokus	Mausfokus verfolgen
			Braillefokus verfolgen
			Braillefokus zentrieren
			Sprung zum Systemfokus
			Sprung zum Mausfokus
		<i>Scrollbarren und Minimap helfen beim Standort erkennen</i>	
		<i>Cursor blinkt im Detailbereich, um aktuelle Position der Textmarke zu erkennen</i>	

Tabelle D.4: Zuordnung der Stiftplattenbedienung zur Elementaraufgabe Identifizieren

Elementaraufgabe: Identifizieren		HyperReader/Tangram-Arbeitsplatz Funktionalitäten	
Betroffenes Objekt	Eigenschaft	Interaktionsobjekt	Funktion
Text	Braille	<i>taktile Ausgabe erlaubt es, Inhalte zu lesen</i>	
	Schwarzschrift	<i>taktile Ausgabe in Originalansicht</i>	
Widget		<i>taktile Ausgabe in Symbolansicht</i>	
Grafikobjekt		<i>taktile Ausgabe erlaubt es, Grafiken zu erkunden</i>	
charakterist. Eigenschaften		Darstellungsbereich	Zoomstufe abfragen
		OSM/DOM-Element	Klickgeste (Erkundung)
			Beschreibung ansagen
		<i>Ausgabe im Detailbereich erlaubt die Betrachtung der Eigenschaften</i>	

Tabelle D.5: Zuordnung der Stiftplattenbedienung zur Elementaraufgabe Auswählen

Elementaraufgabe: Auswählen		HyperReader/Tangram-Arbeitsplatz Funktionalitäten	
Betroffenes Objekt	Eigenschaft	Interaktionsobjekt	Funktion
Objekt		OSM/DOM-Element	Klickgeste (Maus)
			nächstes/vorheriges Element
		DOM-Element	Fokus abwählen
			Gruppenelement betreten/verlassen
		Fokus	Braillefokus auf Mausfokus setzen
		<i>Rückmeldung durch Audioausgabe, Detailbereich + Blinken</i>	
Funktion		Ansichtsarten	synchronisieren
		Brailletasten	PC-Tastenumulation starten/beenden
		Quickinfos	ausblenden bzw. erneut aufrufen
		Fokus	Braillefokus auf GUI markieren
			blinkender Braille-Rahmen ein/aus
		Darstellungsbereich	undo letzte Scroll-/Zoomoperation
		BrailleDis	Touch-Rekalibrierung
Gruppe			Farbfilterung
Raum		Braillefenster	aktivieren (Fensterwechsel)
			Desktop anzeigen
		Konfigurationseditor	aufrufen
Systemeigenschaften		Bereiche	Status von Kopf- bzw. Detailbereich
		Ansichtsart	umschalten (Ansichtswechsel)
			Schwellwert erhöhen/verringern
		Grafikausgabe (Darstellungsbereich)	Standard-Schwellwert
			Ausgabe invertieren
			Brailleschrift an/aus

Tabelle D.6: Zuordnung der Stiftplattenbedienung zur Elementaraufgabe Manipulieren

Elementaraufgabe: Manipulieren		HyperReader/Tangram-Arbeitsplatz Funktionalitäten	
Betroffenes Objekt	Eigenschaft	Interaktionsobjekt	Funktion
Bezugssystem	Zoomen	Darstellungsbereich	Zoom-in/out
			5fach Zoom-in/out
			Zoom auf 1:1-Darstellung
			Höhe einpassen
	Neuausrichtung	Bereiche	Druckzoom
			ein-/ausblenden
		verkleinern/vergrößern	
		Vollbildmodus	
		alle einblenden	
		Darstellungsbereich	vertikale Teilung
horizontale Teilung			
Teilung aufheben			
aktiv setzen			
Braillefenster	minimieren, maximieren, wiederherstellen, schließen		
Ansicht	neu rendern		
Hilfsraster	ein/aus		
Objekt	Verschieben	DOM-Element	verschieben
	Dimensionierung	DOM-Element	skalieren
	Erstellen und Löschen	DOM-Element	erstellen/löschen
	charakterist. Eigenschaften	DOM-Element	rotieren
			Objektfüllung ändern
			Linienstil ändern
Dokument	Titel/Beschreibung bearbeiten		
	Metadaten bearbeiten		

Beschreibungen zu den TLX-Faktoren

Zum Erheben der Beanspruchung eines Benutzers eignet sich der Task Load Index (TLX) [HS88]. Dabei muss der Proband seine empfundene Beanspruchung bei einer bestimmten Aufgabe für sechs konkrete Faktoren auf einer Skala von 0 = gering bis 20 = hoch ausdrücken. Üblicherweise muss er dabei selbst ein Kreuz auf der Skala setzen, was für blinde Menschen allerdings nicht möglich ist. Im Rahmen dieser Arbeit mussten die Teilnehmer deshalb ihre jeweilige Bewertung als prozentualen Wert zwischen 0 % (gering) und 100 % (hoch) angeben.

Um bei den Probanden ein korrektes Verständnis für die einzelnen Faktoren des TLX-Verfahrens sicherzustellen, wurden ihnen zusätzlich die folgenden Beschreibungen¹ als Hilfestellung gegeben:

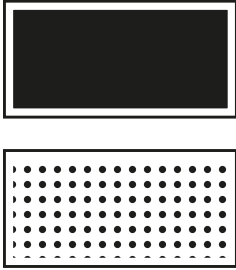

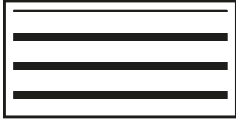
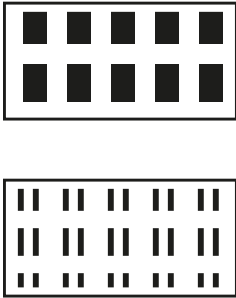
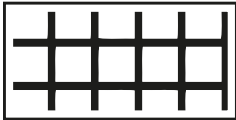
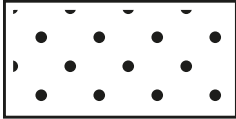
- *Geistige Anforderung*: Wie viel geistige Anforderung war bei der Informationsaufnahme und bei der Informationsverarbeitung erforderlich (z.B. Denken, Entscheiden, Rechnen, Erinnern, Hinsehen, Suchen ...)? War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex, erfordert sie hohe Genauigkeit oder ist sie fehlertolerant?
- *Körperliche Anforderung*: Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich (z.B. ziehen, drücken, drehen, steuern, aktivieren ...)? War die Aufgabe leicht oder schwer, einfach oder anstrengend, erholsam oder mühselig?
- *Zeitliche Anforderung*: Wie viel Zeitdruck empfanden Sie hinsichtlich der Häufigkeit oder dem Takt mit dem die Aufgaben oder Aufgabenelemente auftraten? War die Aufgabe langsam und geruhsam oder schnell und hektisch?
- *Leistung* (0 % = gut und 100 % = schlecht): Wie erfolgreich haben Sie Ihrer Meinung nach die vom Versuchsleiter (oder Ihnen selbst) gesetzten Ziele erreicht? Wie zufrieden waren Sie mit Ihrer Leistung bei der Verfolgung dieser Ziele?
- *Anstrengung*: Wie hart mussten Sie arbeiten, um Ihren Grad an Aufgabenerfüllung zu erreichen?
- *Frustration*: Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert (versus sicher, bestätigt, zufrieden, entspannt und zufrieden mit sich selbst) fühlten Sie sich während der Aufgabe?

¹ Quelle: https://www.keithv.com/software/nasatlx/nasatlx_german.html (letzter Zugriff am 07.07.2016)

Taktile Füllmuster

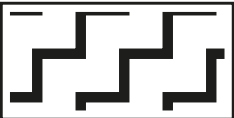
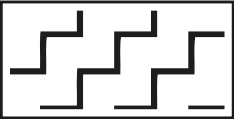



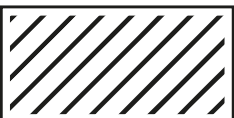
In den Tabellen F.1 und F.2 findet sich ein Überblick über die taktilen Füllmuster, welche im Rahmen der Texturenstudien (vgl. Abschnitt 7.3.2) auf den verschiedenen Ausgabemedien als gut unterscheidbar und äquivalent nutzbar evaluiert wurden.

Tabelle F.1: Taktiles Füllmuster Set (Teil I)

ID	Name des Musters	Medium	grafische Darstellung	SVG-Code
255	full pattern	PD, TE MP		<pre>fill="black" <pattern_id="full_pattern" _width="2.5mm" _height="2.5mm" _ patternUnits="userSpaceOnUse"> <circle_cx="1.25mm" _cy="1.25mm" _r="0.6mm"/> </pattern></pre>
3	vertical line	PD, TE, MP		<pre><pattern_id="vertical_line" _width="5mm" _height="0.5mm" _ patternUnits="userSpaceOnUse"> <line_x1="1.25mm" _y1="1mm" _x2="1.25mm" _y2="1.5mm" _ stroke="black" _stroke-width="1.3mm"/> </pattern></pre>
4	horizontal line	PD, TE, MP		<pre><pattern_id="horizontal_line" _width="0.5mm" _height="6mm" _ patternUnits="userSpaceOnUse"> <line_x1="1mm" _y1="1.25mm" _x2="1.5mm" _y2="1.25mm" _ stroke="black" _stroke-width="1.3mm"/> </pattern></pre>
12	dashed lines	PD TE, MP		<pre><pattern_id="dashed_lines_PD" _width="7.5mm" _ height="10mm" _patternUnits="userSpaceOnUse"> <rect_x="0.5mm" _y="0.5mm" _width="4mm" _ height="6.5mm" _fill="black" _stroke="none"/> </pattern> <pattern_id="dashed_lines_MP_TE" _width="7.62mm" _ height="7.62mm" _patternUnits="userSpaceOnUse" _ stroke="black" _stroke-width="1mm"> <line_x1="1.25mm" _y1="1.1mm" _ x2="1.25mm" _y2="6mm"/> <line_x1="6.28mm" _y1="1.1mm" _ x2="6.28mm" _y2="6mm"/> </pattern></pre>
14	grid pattern	PD, TE, MP		<pre><pattern_id="grid_pattern" _width="7.5mm" _height="7.5mm" _ patternUnits="userSpaceOnUse" _stroke="black" _ stroke-width="1.3mm"> <line_x1="3.75mm" _y1="1mm" _ x2="3.75mm" _y2="8.5mm"/> <line_x1="1mm" _y1="3.75mm" _ x2="8.5mm" _y2="3.75mm"/> </pattern></pre>
24	dotted pattern	PD, TE, MP		<pre><pattern_id="dotted_pattern" _width="10mm" _height="10mm" _ patternUnits="userSpaceOnUse" _fill="black" _stroke="none"> <circle_cx="1.25mm" _cy="1.25mm" _r="1mm"/> <circle_cx="6.25mm" _cy="6.25mm" _r="1mm"/> </pattern></pre>

PD = pin-matrix device (Stiftplatte); TE = high resolution tactile embosser (20 dpi Brailledruck);
MP = microcapsule paper (Schwellpapier)

Tabelle F.2: Taktiles Füllmuster Set (Teil II)

ID	Name des Musters	Medium	grafische Darstellung	SVG-Code
28	stair pattern	PD		<pre><pattern_id="stair_pattern_PD" _width="15mm" _height="15mm" _patternUnits="userSpaceOnUse"> <svg_xmlns="http://www.w3.org/2000/svg" _version="1.1" _width="15mm" _height="15mm" _viewBox="0 0 15 15"> <polyline _stroke="black" _stroke-width="1.8" _fill="none" _points="-1,3.75 3.75,3.75 3.75,-1"/> <polyline _stroke="black" _stroke-width="1.8" _fill="none" _points="3.75,15 8,3.75 11.25,11.25 11.25,3.75 15,8,3.75"/> </svg> </pattern></pre>
		TE, MP		<pre><pattern_id="stair_pattern_MP_TE" _width="12.8mm" _height="12.8mm" _patternUnits="userSpaceOnUse"> <svg_xmlns="http://www.w3.org/2000/svg" _version="1.1" _width="12.8mm" _height="12.8mm" _viewBox="0 0 12.8 12.8"> <polyline _stroke="black" _stroke-width="1" _fill="none" _points="-0.64,2.4 2.4,2.4 -0.64"/> <polyline _stroke="black" _stroke-width="1" _fill="none" _points="4,13.44 8,8 10.4,10.4 10.4,2.4 13.44,2.4"/> </svg> </pattern></pre>
35	diagonal line (wide-spaced)	PD		<pre><pattern_id="diagonal_line1_PD" _width="10mm" _height="10mm" _patternUnits="userSpaceOnUse"> <line _x1="2.5mm" _y1="-2.5mm" _x2="17.5mm" _y2="12.5mm" _stroke="black" _stroke-width="1.3mm"/> <line _x1="-2.5mm" _y1="2.5mm" _x2="17.5mm" _y2="12.5mm" _stroke="black" _stroke-width="1.3mm"/> </pattern></pre>
		TE, MP		<pre><pattern_id="diagonal_line1_MP_TE" _width="10.16mm" _height="10.16mm" _patternUnits="userSpaceOnUse"> <line _x1="5.85mm" _y1="-1.27mm" _x2="18.55mm" _y2="11.43mm" _stroke="black" _stroke-width="0.8mm"/> <line _x1="-1.77mm" _y1="1.27mm" _x2="8.39mm" _y2="11.43mm" _stroke="black" _stroke-width="0.8mm"/> </pattern></pre>
37	diagonal line (closely spaced)	PD		<pre><pattern_id="diagonal_line2_PD" _width="7.5mm" _height="7.5mm" _patternUnits="userSpaceOnUse"> <line _x1="12.5mm" _y1="-2.5mm" _x2="10mm" _y2="10mm" _stroke="black" _stroke-width="1.3mm"/> <line _x1="5mm" _y1="-2.5mm" _x2="-2.5mm" _y2="5mm" _stroke="black" _stroke-width="1.3mm"/> </pattern></pre>
		TE, MP		<pre><pattern_id="diagonal_line2_MP_TE" _width="5.08mm" _height="5.08mm" _patternUnits="userSpaceOnUse"> <line _x1="7.12mm" _y1="-1.27mm" _x2="-0.5mm" _y2="6.35mm" _stroke="black" _stroke-width="0.8mm"/> <line _x1="2.04mm" _y1="-1.27mm" _x2="-1.77mm" _y2="2.54mm" _stroke="black" _stroke-width="0.8mm"/> </pattern></pre>

PD = pin-matrix device (Stiftplatte); TE = high resolution tactile embosser (20 dpi Brailledruck); MP = microcapsule paper (Schwellpapier)