

# **Gestaltungsempfehlungen für touchscreenbasierte Benutzungsschnittstellen**

Michael Domhardt

kassel  
university



press

# **Gestaltungsempfehlungen für touchscreenbasierte Benutzungsschnittstellen**

Michael Domhardt

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ludger Schmidt, Universität Kassel  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte, TU Ilmenau

Tag der Disputation: 25. April 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2017  
ISBN 978-3-7376-0428-4 (print)  
ISBN 978-3-7376-0429-1 (e-book)  
DOI: 10.19211/KUP9783737604291  
URN: urn:nbn:de:0002-404296

© 2018, kassel university press GmbH, Kassel  
[www.upress.uni-kassel.de](http://www.upress.uni-kassel.de)

Umschlaggestaltung: Susanna Vogel

Printed in Germany

## **Zusammenfassung**

Bisher erfolgt die Gestaltung von Touchscreensystemen nach Kriterien für ergonomische Eingabemittel oder der Softwareergonomie. Der allgemeine Charakter dieser Empfehlungen deckt nicht touchscreenspezifische Besonderheiten ab. Hersteller- und softwarespezifische Design Guides enthalten keine Hinweise zur Berücksichtigung der technologiebedingten Interaktionsmöglichkeiten und -einschränkungen der verschiedenen technischen Komponenten eines Touchscreensystems. Bisher existiert kein Gestaltungsansatz, der die touchscreenspezifischen Besonderheiten systematisch berücksichtigt. Die technologischen Möglichkeiten von Touchscreensystemen sowie die die Gefahr einer physischen Überbeanspruchung des belasteten Bewegungsapparates werden dadurch bei der Systemgestaltung nur unzureichend berücksichtigt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher das Ziel verfolgt, einen ganzheitlichen Gestaltungsansatz zu erarbeiten, der die Besonderheiten der Touchscreentechnologien und -interaktion durch spezifische Gestaltungsempfehlungen berücksichtigt. Als Lösungsansatz wurde die Erweiterung bestehender Modelle um die Besonderheiten touchscreenbasierter Systeme verfolgt. Im ersten Schritt erfolgte die systematische Auswahl eines Modells eines interaktiven Systems als geeignetes Basismodell für Touchscreensysteme. Anschließend wurde dieses Modell um die charakteristischen Bestandteile eines Touchscreensystems erweitert. Anhand dieses Modells wurden Wissenslücken in den theoretischen Grundlagen identifiziert und daraus sechs Forschungsfragen abgeleitet. Um die Fragen systematisch zu beantworten, wurden Literaturanalysen und empirische Studien konzipiert, durchgeführt und ausgewertet.

Die theoretischen Grundlagen wurden mit den erarbeiteten Ergebnissen der Analysen und empirischen Studien zusammengeführt und als Basis für die Formulierung touchscreenspezifischer Gestaltungsempfehlungen genutzt. Diese Empfehlungen wurden anschließend im Basismodell verankert, um so einen ganzheitlichen Gestaltungsansatz für Touchscreensysteme zu erhalten. Für die praktikable Anwendung des Ansatzes wurde dieser in den menschenzentrierten Gestaltungsprozess integriert. Die Anwendbarkeit konnte anhand eines Praxisbeispiels erfolgreich demonstriert werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit erleichtern die Gestaltung touchscreenbasierter Systeme im Rahmen des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses. Auch eine formative analytische Evaluierung entsprechender Systeme kann durch die erarbeiteten touchscreenspezifischen Gestaltungsempfehlungen vereinfacht werden, indem diese als Konformitätskriterien verwendet werden.





## **Abstract**

So far the design of touchscreen systems is based on currently existing design recommendations that include among others criteria for ergonomic input devices or software ergonomics. Due to the general character of these recommendations, touchscreen specific details are neglected. Vendor and software specific design guides contain no references to technology-based possibilities and limitations for interaction of the various technical components from which a touchscreen system is composed. Until now, there is no systematic design approach which takes the specific particularities of touchscreens into account. The technological possibilities of touchscreen systems as well as the risk of physical overstraining of the affected locomotor system are thereby insufficiently considered in system design.

Therefore the aim of this work was the development of a holistic design approach for touchscreen systems that includes the particularities of touchscreen technologies and interaction. As a solution, the enhancement of existing models to the specific features of touchscreen-based systems was conducted. As a first step a suitable model of an interactive system was selected. This model was then enhanced to add the characteristic components of a touchscreen system. Using this model, knowledge gaps in the theoretical foundations could be identified and six specific research questions were derived. In order to answer these questions systematically, appropriate analyses and empirical studies were designed, conducted and evaluated.

The relevant theoretical foundations were merged with the results of analyzes and empirical studies. Based on that, design recommendations specific for touchscreens were created. These recommendations have been integrated into the base model to obtain a holistic design approach for touchscreen systems. For the practical application of the approach it was integrated into the human-centered design process. The applicability could be demonstrated successfully on a practical example.

The results of this work facilitates the design of touchscreen systems in the context of the human-centered design process. Even a formative analytical evaluation of such systems can be simplified by the developed touchscreen specific design recommendations when they are used as conformity criteria.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen und Forschungsbedarf</b>	<b>5</b>
2.1	Definitionen und Modelle . . . . .	5
2.2	Auswahl eines Basismodells für die Touchscreeninteraktion . . . . .	12
2.3	Subsystem Maschine – Touchscreentechnologien . . . . .	15
2.4	Benutzungsschnittstelle – Interaktion mittels Touchscreens . . . . .	16
2.4.1	Direkte Eingabe mittels Touchscreen . . . . .	17
2.4.2	Zusammenhang zwischen Bewegungsdauer und Zielgröße sowie -entfernung (Fitts' Law) . . . . .	18
2.4.3	Tippen, Ziehen und Gesten als touchscreenbasierte Interakti- onsformen . . . . .	19
2.4.4	Dauer und Intensität der Touchscreeninteraktion . . . . .	20
2.4.5	Biomechanik der Touchscreeninteraktion . . . . .	21
2.4.6	Haptische Rückmeldung bei der Touchscreeninteraktion . . . . .	23
2.5	Subsystem Mensch – Ergonomie von Touchscreensystemen . . . . .	24
2.5.1	Perzeption . . . . .	25
2.5.2	Kognition . . . . .	35
2.5.3	Biomechanik . . . . .	41
2.6	Methodische Grundlagen der Gestaltung interaktiver Systeme . . . . .	44
2.6.1	Menschzentrierter Gestaltungsansatz . . . . .	45
2.6.2	Spezifikation des Nutzungskontextes und Festlegen der Benut- zeranforderungen . . . . .	47
2.6.3	Allgemeine Gestaltungsempfehlungen . . . . .	48
2.7	Formulierung und Zusammenfassung der Forschungsfragen . . . . .	53
<b>3</b>	<b>Literaturanalyse der technologischen Realisierungsmöglichkeiten</b>	<b>57</b>
3.1	Bilderzeugung mittels elektronischer Anzeige . . . . .	58
3.1.1	Herleitung der Analysekriterien . . . . .	58
3.1.2	Analyse der technischen Realisierungen . . . . .	63
3.2	Berührungserfassung . . . . .	71
3.2.1	Herleitung der Analysekriterien . . . . .	71
3.2.2	Analyse der technischen Realisierungen . . . . .	76

3.3	Rückmeldungen . . . . .	84
3.3.1	Herleitung der Analysekriterien . . . . .	85
3.3.2	Analyse der technischen Realisierungen . . . . .	88
3.4	Softwareimplementierungen . . . . .	94
3.4.1	Herleitung der Analysekriterien . . . . .	95
3.4.2	Analyse der technischen Realisierungen . . . . .	98
3.5	Zusammenfassung der Analyseergebnisse . . . . .	112
3.6	Schlussfolgerung . . . . .	114
<b>4</b>	<b>Empirische Untersuchung der Touchscreeninteraktion</b>	<b>119</b>
4.1	Gebrauchstauglichkeit touchscreenbasierter Interaktionsformen . . .	119
4.1.1	Hintergrund . . . . .	120
4.1.2	Vorgehen . . . . .	122
4.1.3	Ergebnisse . . . . .	126
4.1.4	Diskussion . . . . .	132
4.1.5	Schlussfolgerung . . . . .	132
4.2	Dauer und Intensität der Touchscreeninteraktion im Arbeitsumfeld .	133
4.2.1	Hintergrund . . . . .	133
4.2.2	Vorgehen . . . . .	135
4.2.3	Ergebnisse . . . . .	136
4.2.4	Diskussion . . . . .	137
4.2.5	Schlussfolgerung . . . . .	138
4.3	Vorstudie Biomechanik . . . . .	138
4.3.1	Hintergrund . . . . .	139
4.3.2	Vorgehen . . . . .	139
4.3.3	Ergebnisse . . . . .	143
4.3.4	Diskussion . . . . .	145
4.3.5	Schlussfolgerung . . . . .	145
4.4	Computergestützte Analyse der Biomechanik . . . . .	146
4.4.1	Hintergrund . . . . .	146
4.4.2	Vorgehen . . . . .	149
4.4.3	Ergebnisse . . . . .	151
4.4.4	Diskussion . . . . .	152
4.4.5	Schlussfolgerung . . . . .	153
4.5	Touchscreeninduzierte Ermüdung des Hand-Arm-Systems . . . . .	153
4.5.1	Hintergrund . . . . .	154
4.5.2	Vorgehen . . . . .	155
4.5.3	Ergebnisse . . . . .	166
4.5.4	Diskussion . . . . .	172
4.5.5	Schlussfolgerung . . . . .	174

4.6	Einfluss haptischer Rückmeldungen auf die Interaktion . . . . .	175
4.6.1	Hintergrund . . . . .	175
4.6.2	Vorgehen . . . . .	177
4.6.3	Ergebnisse . . . . .	184
4.6.4	Diskussion . . . . .	187
4.6.5	Schlussfolgerung . . . . .	188
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung der Gestaltungsempfehlungen und Erprobung</b>	<b>189</b>
5.1	Gestaltungsempfehlungen des Subsystems Mensch . . . . .	190
5.2	Gestaltungsempfehlungen des Subsystems Maschine . . . . .	194
5.3	Verwendung der Gestaltungsempfehlungen im Gestaltungsprozess . .	198
5.4	Erprobung der Gestaltungsempfehlungen in der Praxis . . . . .	201
5.5	Diskussion . . . . .	204
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>209</b>
	<b>Anhang</b>	<b>213</b>
<b>A</b>	<b>Versuchsanleitung der Vorstudie zur empirischen Untersuchung der Biomechanik</b>	<b>215</b>
<b>B</b>	<b>Datenbankmodell der Auswertesoftware zur empirischen Voruntersuchung der Biomechanik</b>	<b>221</b>
<b>C</b>	<b>Auswertesoftware zur empirischen Voruntersuchung der Biomechanik</b>	<b>225</b>
<b>D</b>	<b>Inbetriebnahmeprotokoll zur empirischen Untersuchung der Biomechanik</b>	<b>247</b>
<b>E</b>	<b>Versuchspersonenerklärung zur empirischen Untersuchung der Biomechanik</b>	<b>251</b>
<b>F</b>	<b>Ablaufprotokoll zur empirischen Untersuchung der Biomechanik</b>	<b>255</b>
<b>G</b>	<b>Auswertesoftware zur empirischen Untersuchung der Biomechanik</b>	<b>259</b>
<b>H</b>	<b>Lizenz der verwendeten Bibliothek zur Verarbeitung der XML-Daten in der Auswertesoftware zur empirischen Untersuchung der Biomechanik</b>	<b>283</b>
<b>I</b>	<b>Inbetriebnahmeprotokoll zur empirischen Untersuchung der haptischen Rückmeldung</b>	<b>287</b>

J	Versuchspersonenerklärung zur empirischen Untersuchung der haptischen Rückmeldung	291
K	Ablaufprotokoll zur empirischen Untersuchung der haptischen Rückmeldung	295

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Einfaches Modell eines Mensch-Maschine-Systems . . . . .	6
2.2	Modell eines mechatronischen Systems . . . . .	7
2.3	Detailliertes Modell eines Mensch-Maschine-Systems . . . . .	8
2.4	Beispiel eines Mensch-Maschine-Systems . . . . .	8
2.5	Erweitertes Modell eines Mensch-Maschine-Systems . . . . .	9
2.6	Modell der Interaktion . . . . .	10
2.7	Modell der Mensch-Computer-Interaktion . . . . .	11
2.8	Basismodell angepasst an Touchscreensysteme . . . . .	15
2.9	Kooperation mehrerer Benutzer an einem Multitouchscreen . . . . .	17
2.10	Modell der Wahrnehmung . . . . .	25
2.11	Modell der menschlichen Informationsverarbeitung . . . . .	26
2.12	Lage des sichtbaren Lichts im Spektrum elektromagnetischer Wellen	27
2.13	Schematischer Aufbau des menschlichen Auges . . . . .	28
2.14	Verteilung der Photorezeptoren im menschlichen Auge . . . . .	29
2.15	Schematischer Aufbau des menschlichen Ohrs . . . . .	31
2.16	Physikalische und perzeptive Dimensionen von Klängen . . . . .	31
2.17	Beispiel für die Hörfläche des Menschen . . . . .	32
2.18	Prinzipskizze der Mechanorezeptoren der Haut . . . . .	33
2.19	Visualisierung der Proportionen entsprechend der Dichte der Hautrezeptoren . . . . .	35
2.20	Visualisierung der Funktionen des motorischen Kortex . . . . .	37
2.21	Schematische Darstellung der drei Leistungsstufen menschlichen Verhaltens . . . . .	39
2.22	Schematische Darstellung quergestreifter Skelettmuskeln . . . . .	42
2.23	Schematischer Aufbau einer motorischen Einheit . . . . .	43
2.24	Menschzentrierter Gestaltungsprozess . . . . .	46
3.1	Chromatizitätsdiagramm der CIE von 1931 . . . . .	62
3.2	Schematischer Aufbau und Funktionsprinzip einer Kathodenstrahlröhre	63
3.3	Aufbau und Funktionsprinzip eines Projektionssystems auf Basis von drei Flüssigkristallanzeigen . . . . .	69
3.4	Entstehungsprinzip des Parallaxenfehlers . . . . .	72
3.5	Kalibrierung eines Touchscreens . . . . .	73



3.6	Touchscreeninteraktion mit speziellen leitfähigen Handschuhen . . .	73
3.7	Simultane Touchscreeninteraktion mehrerer Nutzer mittels Multitouch	74
3.8	Ghosting . . . . .	74
3.9	Touchscreeninteraktion mittels Drag-and-drop . . . . .	75
3.10	Durch Fingerabdrücke verschmutzter Touchscreen . . . . .	75
3.11	Schematischer Aufbau eines resistiven Touchscreens . . . . .	76
3.12	Schematischer Aufbau kapazitiver Touchscreens . . . . .	78
3.13	Schematischer Aufbau eines SAW-Touchscreens . . . . .	78
3.14	Schematischer Aufbau eines APR-Touchscreens . . . . .	79
3.15	Schematischer Aufbau eines Touchscreens mit Infrarotgitter . . . . .	80
3.16	Schematischer Aufbau von Touchscreens auf Basis der digitalen Bild- verarbeitung . . . . .	82
3.17	Schematischer Aufbau von In-Cell-Touchscreens . . . . .	83
3.18	Vibrationsmotor als Aktuator elektromechanisch erzeugter Rückmel- dungen . . . . .	89
3.19	Funktionsprinzip der elektrotaktilen Rückmeldung . . . . .	91
3.20	Zustände der hydraulikbasierten haptischen Rückmeldung . . . . .	92
3.21	Spulenmatrix und Permanentmagnet der magnetischen Rückmeldung	93
3.22	Beispiele für implizite Formen der Touchscreeninteraktion (Gesten) .	97
3.23	Rückmeldungen zu Verzögerungen von Apple iOS . . . . .	99
3.24	Benachrichtigung von Apple iOS . . . . .	99
3.25	Rückmeldungen zu Verzögerungen von Google Android . . . . .	102
3.26	Benachrichtigung von Google Android . . . . .	103
3.27	Schaltflächenzustände von Google Android . . . . .	103
3.28	Unterschied zwischen sichtbarer und berührungssensitiver Fläche bei Google Android . . . . .	103
3.29	Geschwindigkeitsverlauf von Animationen in Microsoft Windows . .	107
3.30	Rückmeldungen zu Verzögerungen von Microsoft Windows . . . . .	107
3.31	Benachrichtigung von Microsoft Windows . . . . .	108
3.32	Schaltflächenzustände von Microsoft Windows . . . . .	108
3.33	Assistenzfunktion zur Autovervollständigung von Microsoft Windows	109
4.1	Aufgaben zur zur Untersuchung touchscreenbasierter Interaktionsformen	122
4.2	Versuchsaufbau zur Untersuchung touchscreenbasierter Interaktions- formen . . . . .	124
4.3	Altersverteilung der Stichprobe . . . . .	127
4.4	Technikaffinität der Stichprobe . . . . .	128
4.5	Effizienz der Aufgabenbewältigung nach Interaktionsformen . . . . .	129
4.6	Effizienz der Aufgabenbewältigung nach Interaktionsformen und Kör- perhaltung . . . . .	130
4.7	Zufriedenstellung der Probanden mit den Interaktionsformen . . . .	131

4.8	Kassensysteme an den beiden Studienorten . . . . .	136
4.9	Aufteilung der Aufgabendauer auf die Touchscreeninteraktion und Nebenaufgaben . . . . .	137
4.10	Versuchsaufbau zur Vorstudie der Biomechanik bei der Touchscreen- interaktion . . . . .	140
4.11	Im Movement Time Evaluator anzutippende Ziele der Vorstudie zur Biomechanik . . . . .	141
4.12	Beschleunigungssensor vom Typ Affectiva Q-Sensor 2.0 mit Markie- rungen für die Orientierung der drei Raumachsen . . . . .	142
4.13	Zeitverlauf des Betrags des Beschleunigungsvektors der Vorstudie . .	144
4.14	Statisches biomechanisches Modell nach . . . . .	147
4.15	Touchscreen-Interaktion an einem Kassensystem . . . . .	147
4.16	Statisches biomechanisches Modell zur Berechnung der Haltungsarbeit	148
4.17	Bewegungserfassung und Computermodele der Interaktion . . . . .	150
4.18	Softwaregestützte Analyse der Biomechanik mittels RAMSIS und AnyBody . . . . .	151
4.19	Interaktionsrelevante Muskulatur im Schulterbereich . . . . .	157
4.20	Versuchsplatz mit Proband . . . . .	158
4.21	Versuchsleiterplatz während der Ermüdungsaufgabe . . . . .	159
4.22	Verbrauchsmaterial für die Applikation der EMG-Elektroden . . . .	160
4.23	Positionierung der EMG-Elektroden an einer Probandin . . . . .	161
4.24	Anordnung der Ziele für die Tippaufgabe auf dem Touchscreen . . .	165
4.25	Ermüdungsaufgabe mittels Microsoft Rebound . . . . .	166
4.26	Ablauf des Versuchs zur empirischen Untersuchung der Biomechanik	167
4.27	Altersverteilung der Stichprobe . . . . .	168
4.28	Verteilung der Händigkeit in der Stichprobe . . . . .	168
4.29	Zeitverlauf des Betrags des Beschleunigungsvektors . . . . .	169
4.30	Verteilung der mittleren EMG-Frequenz je Muskel und Tippaufgabe	170
4.31	Zeitverlauf der Aktivität des Trapezmuskels . . . . .	171
4.32	Zeitverlauf der Aktivität des Deltamuskels . . . . .	172
4.33	Fahrsimulation der Spurwechselaufgabe . . . . .	178
4.34	Kapazitives Touchpad mit elektromechanischer haptischer Rückmeldung	179
4.35	CAD-Rendering der Höhen- und längsverstellbaren Armlehne beim 95. Perzentil männlich . . . . .	179
4.36	Höhen- und längsverstellbare Armlehne im Fahrsimulator . . . . .	180
4.37	Grafische Benutzungsschnittstelle der Software zum haptischen Touch- pad . . . . .	180
4.38	Versuchspersonenplatz der Studie zur haptischen Rückmeldung . . .	181
4.39	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der Studie zur hapti- schen Rückmeldung . . . . .	181
4.40	Altersverteilung der Stichprobe . . . . .	185

4.41	Technikaffinität der Stichprobe . . . . .	185
4.42	Ablenkung nach Zustand der haptischen Rückmeldung . . . . .	186
4.43	Effizienz der Aufgabenbearbeitung nach Zustand der haptischen Rückmeldung . . . . .	187
5.1	Basismodell für Touchscreensysteme . . . . .	189
5.2	Gestaltungsempfehlungen des Subsystems Mensch im Basismodell für Touchscreensysteme . . . . .	194
5.3	Gestaltungsempfehlungen des Subsystems Maschine im Basismodell für Touchscreensysteme . . . . .	199
5.4	Gestaltungsempfehlungen im Basismodell für Touchscreensysteme . .	200
5.5	Menschzentrierter Gestaltungsprozess . . . . .	200
5.6	Prototyp der Ladestation für Elektromobile . . . . .	202

# Tabellenverzeichnis

2.1	Abbildung der Bestandteile eines Touchscreensystems in verschiedenen Modellen . . . . .	14
2.2	Bestandteile des Nutzungskontextes und Verankerung in verschiedenen Erhebungsmethoden . . . . .	48
3.1	Wellenlängen und Lichtstromvielfache der Primärfarben für weißes Licht nach CIE 1931 . . . . .	61
3.2	Visuelle Bedienelemente von Apple iOS . . . . .	101
3.3	Interaktionsformen von Apple iOS . . . . .	102
3.4	Visuelle Bedienelemente von Google Android . . . . .	105
3.5	Interaktionsformen von Google Android . . . . .	106
3.6	Visuelle Bedienelemente von Microsoft Windows . . . . .	110
3.7	Interaktionsformen von Microsoft Windows . . . . .	111
3.8	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Analyse technologieabhängiger Interaktionsmöglichkeiten verschiedener Bilderzeugungstechnologien	113
3.9	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Analyse technologieabhängiger Interaktionsmöglichkeiten verschiedener Touchscreentechnologien	115
3.10	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Analyse technologieabhängiger Interaktionsmöglichkeiten verschiedener Rückmeldungstechnologien	116
3.11	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Analyse technologieabhängiger Interaktionsmöglichkeiten verschiedener Softwareplattformen .	117
4.1	Ausgeglichener Versuchsplan zur empirischen Studie der Interaktionsformen . . . . .	125
4.2	Effektivität der Aufgabenbewältigung nach Interaktionsformen . . .	128
4.3	Ergebnisse zum Test auf Normalverteilung der Effizienz je Interaktionsform . . . . .	129
4.4	Ergebnisse zum Test auf Normalverteilung des System Usability Score je Interaktionsform . . . . .	131
4.5	Ergebnisse zum Signifikanztest der Zufriedenstellung der Probanden mit den Interaktionsformen . . . . .	131
4.6	Ergebnisse zum Test auf Normalverteilung der mittleren EMG-Frequenz je Tippaufgabe . . . . .	170

4.7	Ergebnisse zum Signifikanztest der mittleren Frequenz je Tippaufgabe zum ersten Durchgang . . . . .	171
4.8	Versuchsplan mit Zustand der elektromechanischen haptischen Rück- meldung . . . . .	184

# 1 Einleitung

Bereits in den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurde ein über einer Anzeige kreuzförmig gespannter Draht mit angeschlossenem Spannungsteiler zur Erkennung der Berührung sogenannter SoftKeys vom britischen *Royal Radar Establishment* entwickelt und getestet (Johnson 1967). Im Gegensatz zum damals hoch spezialisierten Einsatzzweck einer Radarstation sind Touchscreens heute fast in allen Bereichen des täglichen Lebens zu finden. Neben Smartphones und Navigationsgeräten verfügen heutzutage E-Book-Reader, Fahrkartenautomaten, Kassensysteme, Industriesteuerungen, Fahrzeug- und Flugzeugcockpits ebenfalls über Touchscreens (u. a. Apple 2015b, TomTom 2016, Amazon 2014, Deutsche Bahn 2016, Orderman 2014, RAFI 2013, Tesla Motors 2016, Kent 2006). Die gesamte Geräteklasse der Tablets wäre ohne Touchscreen nicht realisierbar (z. B. Apple iPad, Glen Sanford 2015). Während ein großer Teil touchscreenbasierter Systeme für den Privatgebrauch bestimmt ist, kann in letzter Zeit zunehmend die Verwendung von Touchscreens im Arbeitsumfeld verzeichnet werden, z. B. an Büroarbeitsplätzen (Wigdor et al. 2007, Bi et al. 2011), zur Überwachung und Steuerung von industriellen Produktionsanlagen (Brecher et al. 2012) sowie im Medizinumfeld (Douglas et al. 2011, Lundström et al. 2011). Diese Verbreitung hat dazu geführt, dass bereits etablierte Softwarehersteller ihre Betriebssysteme um die Touchscreeninteraktion erweitert haben (z. B. Microsoft 2013b). Bei der Verfügbarkeit von Computern mit Touchscreens wird ein anhaltendes Wachstum erwartet: Heise Medien (2013) erwarten für das Jahr 2017, dass 40 % der Notebooks über einen Touchscreen verfügen werden; die Autoren der Studie von Sandler Research (2015) sehen über den Zeitraum vom Jahr 2014 bis 2019 ein Gesamtwachstum von 10,1 % für den Marktanteil von Notebooks mit Touchscreens. Ursachen für die weiterhin zunehmende Verbreitung von Touchscreensystemen sind unter anderem die flexiblen Gestaltungsmöglichkeiten grafischer Benutzungsschnittstellen in Kombination mit den direkten Interaktionsmöglichkeiten (Patterson & Hennessy 2013, Schlegel 2013a).

Für die Gestaltung touchscreenbasierter Systeme werden aktuell bestehende Gestaltungsempfehlungen angewendet, die u. a. allgemeine ergonomische Kriterien für Eingabemittel oder die Softwareergonomie beinhalten, aber durch den allgemeinen Charakter dieser Empfehlungen nicht alle Details abdecken (Galley-Taylor et al. 2011). Konkret für die Gestaltung von Touchscreensystemen bedeutet dieser Umstand, dass

neben dem Kompromiss der gleichzeitigen Positionierung eines stationären Touchscreens im Greifraum und Sehfeld des Benutzers (DIN EN ISO 9241-410) sowie Vorgaben für die Größe und Abstände von Schaltflächen (VDI/VDE 3850-3) nur sehr wenige touchscreenspezifische Besonderheiten Beachtung finden. Abseits allgemeiner Gestaltungsempfehlungen sind in einigen sogenannten Design Guides weitere Empfehlungen zur Gestaltung von touchscreenbasierten Benutzungsschnittstellen zu finden (Schickler et al. 2015). Prominente Beispiele hierfür sind die Design Guides von Apple (2015a), Google (2015) und Microsoft (2015b). Durch strikte Gestaltungsvorgaben sollen systemweit aber anwendungsübergreifend einheitliche Benutzungsschnittstellen erreicht werden, die eine konsistente Benutzerinteraktion fördern (Schickler et al. 2015). Diese hersteller- und softwarespezifischen Empfehlungen enthalten keine Hinweise auf die technologiespezifischen Interaktionsmöglichkeiten und -einschränkungen der verschiedenen Komponenten eines Touchscreensystems. Eine herstellerübergreifende einheitliche User Experience, die bei Anwendungen angestrebt wird, die auf mehreren Softwareplattformen gleichzeitig verfügbar sind und auch parallel verwendet werden (Galitz 2007, Hartson & Pyla 2012), wird durch Unterschiede in den Empfehlungen der verschiedenen Design Guides entgegen gewirkt (Hartson & Pyla 2012). Erschwerend kommt hinzu, dass durch den technologischen Fortschritt regelmäßig neue Interaktionsmöglichkeiten hinzukommen, wie zum Beispiel die Nutzung der Druckempfindlichkeit zur Interaktion beim Apple iPhone 6S (Apple 2015b). Bisher existiert kein systematischer Gestaltungsansatz, der diese touchscreenspezifischen Besonderheiten umfassend berücksichtigt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher das Ziel verfolgt, einen ganzheitlichen Gestaltungsansatz zu erarbeiten, der die Besonderheiten der Touchscreentechnologien und Touchscreeninteraktion durch touchscreenspezifische Gestaltungsempfehlungen berücksichtigt. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen die Gestaltung touchscreenbasierter Systeme im Rahmen des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses nach DIN EN ISO 9241-210 erleichtern. Auch eine formative analytische Evaluierung entsprechender Systeme kann vereinfacht werden, wenn die angestrebten touchscreenspezifischen Gestaltungsempfehlungen vergleichbar zu Heuristiken oder Checklistenelemente als Konformitätskriterien verwendet werden. Als Lösungsansatz wird die Erweiterung bestehender Modelle um die Besonderheiten touchscreenbasierter Systeme verfolgt. Zu diesen touchscreenspezifischen Besonderheiten werden Gestaltungsempfehlungen analytisch und empirisch abgeleitet. Durch die Ergänzung konkreter touchscreenspezifischer Gestaltungsempfehlungen entsteht ein umfassender und praktisch anwendbarer Gestaltungsansatz für Touchscreensysteme.

Der erste Schritt der Arbeit umfasst die Recherche des aktuellen Forschungsstandes zu den unterschiedlichen Modellen interaktiver Systeme und Empfehlungen zur deren Gestaltung sowie die Besonderheiten der Interaktion mit Touchscreensystemen (Kapitel 2). Aus den recherchierten Modellen wird systematisch ein geeignetes Modell

---

zur Verwendung im Rahmen dieser Arbeit ausgewählt. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden anhand dieses Modells die theoretischen Grundlagen auf Wissenslücken geprüft, die eine ganzheitliche Gestaltung von Touchscreensystemen bisher erschwert haben. Anhand der identifizierten Wissenslücken werden Forschungsfragen abgeleitet, welche anschließend entweder mittels Literaturanalyse (Kapitel 3) oder empirischer Studie (Kapitel 4) beantwortet werden. Die auf diese Weise gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage zur Ableitung touchscreenspezifischer Gestaltungsempfehlungen (Kapitel 5). Diese Gestaltungsempfehlungen werden mit den allgemeinen theoretischen Erkenntnissen in einem konkretisierten Modell eines Touchscreensystems zusammengeführt und mit dem menschenzentrierten Gestaltungsprozess nach DIN EN ISO 9241-210 verzahnt. Die Anwendbarkeit des so entstandenen ganzheitlichen Gestaltungsansatzes für Touchscreensysteme wird abschließend an einem praktischen Anwendungsbeispiel demonstriert.





## 2 Theoretische Grundlagen und Forschungsbedarf

Im Rahmen dieses Kapitels wird der Stand der Wissenschaft zur ganzheitlichen Gestaltung touchscreenbasierter Benutzungsschnittstellen dargelegt. Dazu erfolgt die Klärung relevanter Begriffe und Definitionen sowie die Abgrenzung des Themas. Anschließend werden anhand eines ausgewählten Modells die theoretischen Grundlagen zu Touchscreensystemen und der Interaktion mit solchen Systemen strukturiert dargestellt. Diese Grundlagen werden um das etablierte methodische Vorgehen zur Gestaltung interaktiver Systeme sowie die allgemeinen Gestaltungsempfehlungen ergänzt. Der identifizierte Forschungsbedarf wird zum Abschluss des Kapitels in Form von Forschungsfragen zusammengefasst.

### 2.1 Definitionen und Modelle

Als Benutzungsschnittstelle werden alle Bestandteile eines interaktiven Systems bezeichnet, die Informationen und Steuerelemente zur Verfügung stellen, die für den Benutzer notwendig sind, um eine bestimmte Aufgabe mit dem interaktiven System zu erledigen (DIN EN ISO 9241-210). Die Benutzungsschnittstelle ist daher ein Bestandteil des Mensch-Maschine-Systems und für jedes konkrete interaktive System spezifisch (Stone et al. 2005). Von einer touchscreenbasierten Benutzungsschnittstelle spricht man, wenn die Interaktion zwischen Benutzer und technischem System in einem Mensch-Maschine-System an einer berührungsempfindlichen Anzeige (Touchscreen) stattfindet.

Bei einem Touchscreen handelt es sich um „[...] ein Display mit berührungsempfindlicher bzw. positionsermittelnder Oberfläche“ (Schenk & Rigoll 2010). Die technischen Voraussetzungen zur Realisierung eines Touchscreens beinhalten mindestens eine elektronische Anzeige und die Berührungserfassung (Schenk & Rigoll 2010). Optional können technische Erweiterungen zur Erzeugung von auditiven oder haptischen Rückmeldungen vorhanden sein (Banter 2010). Softwareseitig sind für ein Touchscreen-system eine grafische Darstellung der interaktiven Oberfläche sowie Bestandteile zur Detektion von Berührungen erforderlich (Phares & Fihn 2012, Ruff & Laufs 2013).

Da der Begriff *Modell* in unterschiedlichen Disziplinen Verwendung findet, existieren mehrere Begriffsdefinitionen. Im Allgemeinen steht der Begriff *Modell* für ein vereinfachtes Abbild der Realität, wobei von einem realen Vorbild lediglich die Eigenschaften im Modell erfasst sind, die dem Verwendungszweck des Modells dienen (Stachowiak 1973, S. 129). Ein Modell dient dazu, einen komplexen Sachverhalt mit seinen fundamentalen Eigenschaften in reduzierter und vereinfachter Form für den Anwender des Modells darzustellen (Stachowiak 1973). Dazu verfügt es über die drei charakteristischen Hauptmerkmale Abbildung, Verkürzung und Pragmatismus (Stachowiak 1973, S. 131). Mit Hilfe von Modellen kann die Gestaltung und die Evaluierung interaktiver Systeme unterstützt werden (Paternò 2000).

Allgemein wird ein System als interaktiv bezeichnet, wenn ein Benutzer durch Handlungen den Ablauf eines Systems beeinflussen kann (Heinecke 2012). DIN EN ISO 9241-210 bezeichnet eine Kombination von Hardware, Software und bzw. oder Dienstleistungen, bei der Eingaben von einem Benutzer empfangen und Ausgaben zu einem Benutzer übermittelt werden, als interaktives System. Konkreter dient diese Kombination aus Hard- und Software dazu, den Benutzer bei der Durchführung einer Aufgabe oder beim Erreichen eines Ziels zu unterstützen (Dahm 2006, Stone et al. 2005, Dix et al. 2004). Stone et al. (2005) verwenden den Begriff Computersystem anstelle von System, verstehen aber darunter nicht nur den klassischen PC (Personal Computer) sondern auch alle eingebetteten Computersysteme, die heute allgegenwärtig und nahezu unsichtbar in vielen Alltagsgegenständen, wie zum Beispiel Smartphones, Geldautomaten oder Fahrzeugcockpits, zu finden sind.

Die Autoren Bubb & Schmidtke (1981) konkretisieren ein interaktives System als Mensch-Maschine-System (MMS), in dem ein Mensch über Sinnesorgane und Muskulatur verfügt und über Bedienelemente mit einer Maschine interagiert (Abbildung 2.1). Mit der technischen Unterstützung dieser Maschine gelangt der Mensch von einer Aufgabenstellung zur Aufgabenerfüllung (Bubb & Schmidtke 1981).

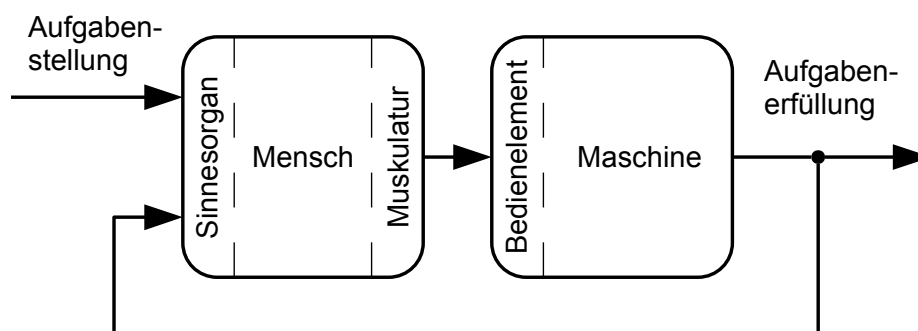


Abbildung 2.1: Einfaches Modell eines Mensch-Maschine-Systems nach Bubb & Schmidtke (1981, S. 265)

Detaillierter sind die Modelle von Johannsen (1993) und VDI 2206, die neben den bisher genannten Bestandteilen Material-, Energie- und Informationsflüsse vorsehen. Johannsen (1993) erwähnt die Möglichkeit des Zusammenwirkens mehrerer Menschen mit einem technischen System. Das Modell nach VDI 2206 (Abbildung 2.2) enthält auf Seite des mechatronischen Systems Bestandteile zur automatisierten Informationsverarbeitung und sieht den Mensch nur als optionale Einheit vor, wobei die Interaktion zwischen Mensch und System über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle erfolgt.

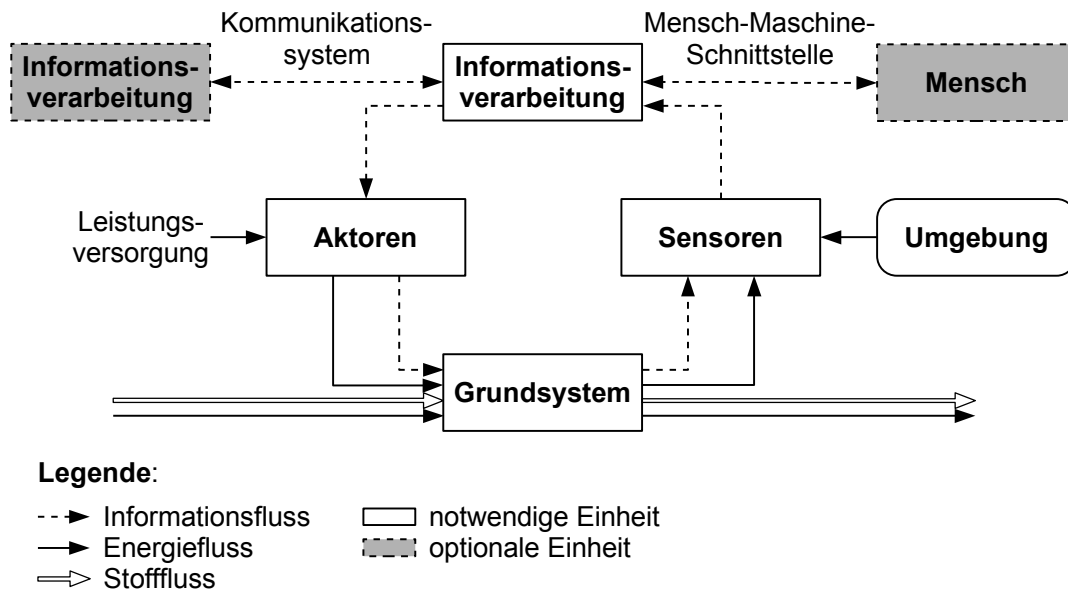


Abbildung 2.2: Modell eines mechatronischen Systems nach VDI 2206 (S. 14)

Im Modell von Timpe & Kolrep (2002) haben die Autoren viele Komponenten eines Mensch-Maschine-Systems bereits konkret benannt (Abbildung 2.3 auf S. 8). Es enthält die direkte und indirekte Vermittlung von Sensorinformationen sowie das motorische Einwirken des Menschen auf die Stellteile einer Benutzungsschnittstelle ebenso wie die Unterstützung des Menschen durch technische Automatik- und Hilfesysteme (Timpe & Kolrep 2002).

Im Beispiel eines Mensch-Maschine-Systems von Czaja & Nair (2012) treffen die Anforderungen des technischen Systems auf die Fähigkeiten des Benutzers (Abbildung 2.4 auf S. 8). Dies hat Auswirkungen auf die Leistung, Einstellung, Selbstwirksamkeit, Akzeptanz und letztendlich die Benutzung. Als Benutzereigenschaften werden das Alter, die Ausbildung und die technische Erfahrung genannt, die einen Einfluss auf die Perzeption, Kognition und Psychomotorik des Benutzers haben. In der Beschreibung des Modells werden zusätzlich eine innere und äußere Systemgrenze erwähnt.

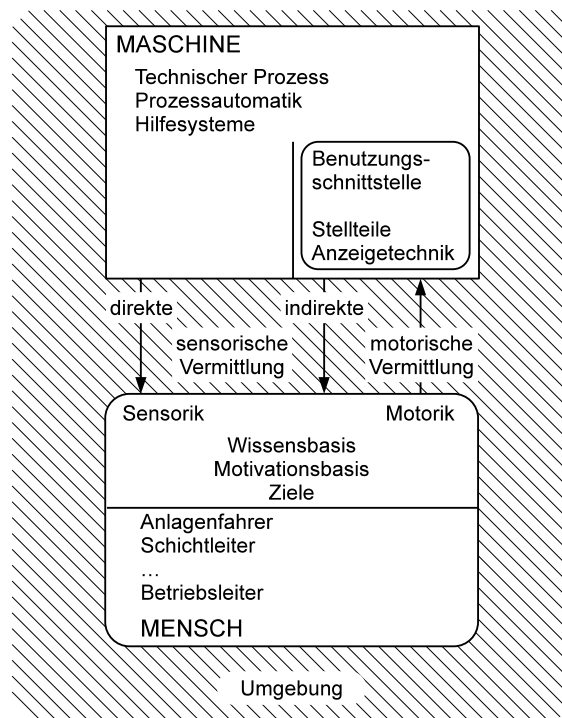


Abbildung 2.3: Detailliertes Modell eines Mensch-Maschine-Systems nach Timpe & Kolrep (2002, S. 12)

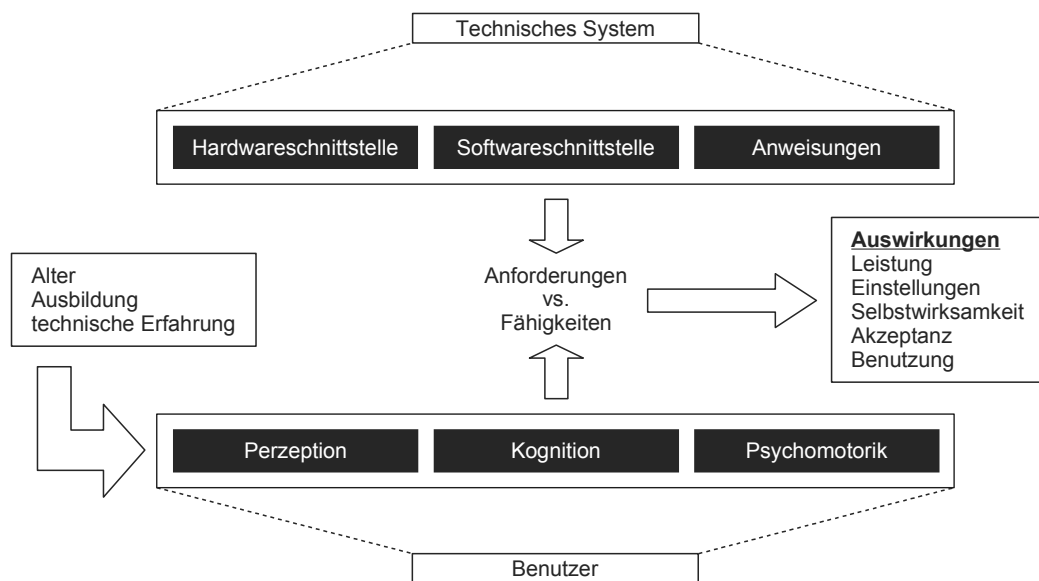


Abbildung 2.4: Beispiel eines Mensch-Maschine-Systems nach Czaja & Nair (2012, S. 44)

Zusammengefasst enthalten die verschiedenen dargelegten Modelle eines Mensch-Maschine-Systems als zentrale Bestandteile den Benutzer, das technische System mit der Benutzungsschnittstelle und die Aufgabe bzw. das zu erreichende Ziel. Es besteht die Möglichkeit zur Interaktion mehrerer Benutzer mit einem System. Ebenso muss die Umwandlung bzw. Verarbeitung der von außen zugeführter Information, Energie und Material von einem Ausgangs- in einen Endzustand durch die Prozesse bei der Aufgabenerfüllung im Inneren des Systems berücksichtigt werden. Abbildung 2.5 enthält daher eine erweiterte Version des von Johannsen (1993) verwendeten Modells eines Mensch-Maschine-Systems. Dieses Modell wird am Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik der Universität Kassel bereits seit mehreren Jahren in der Lehre verwendet. Die im Modell zwischen den Subsystemen Mensch und Maschine eingezeichneten Pfeilen an der Benutzungsschnittstelle stellen die Interaktion dar.

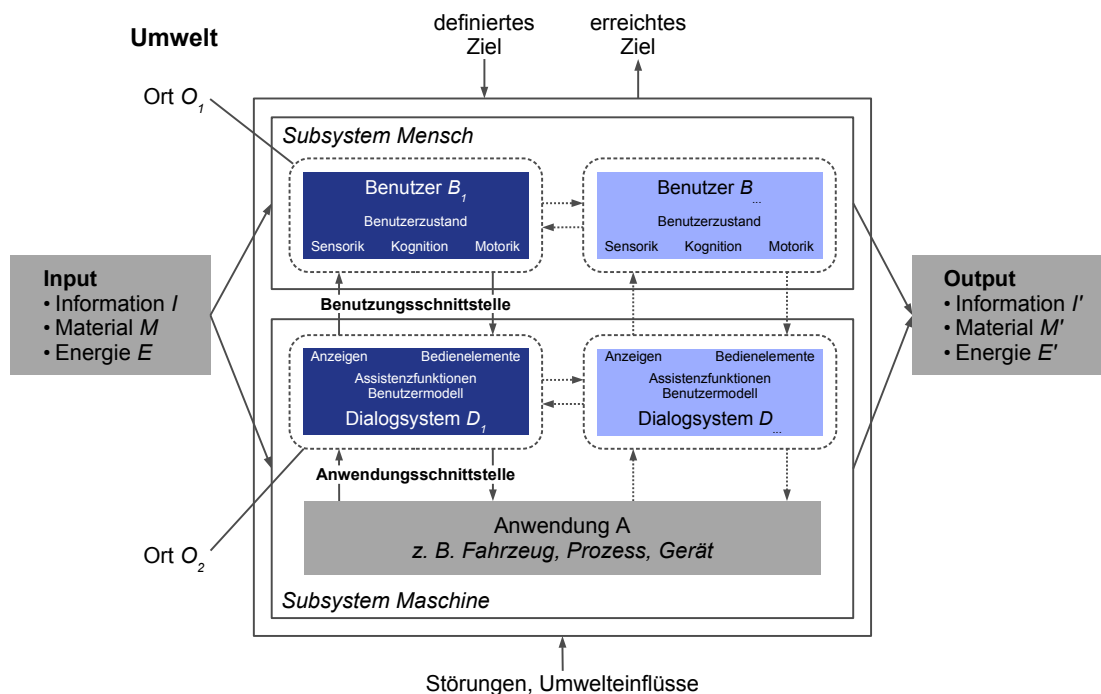


Abbildung 2.5: Erweitertes Modell eines Mensch-Maschine-Systems aus den Vorlesungen des Fachgebiets Mensch-Maschine-Systemtechnik der Universität Kassel

Bei der Interaktion gibt es mindestens zwei Beteiligte: den Benutzer und das System (Dix et al. 2004). Nach Johannsen (1993) umfasst die Interaktion des Menschen mit einer Maschine alle Möglichkeiten der Wechselwirkung zwischen den beiden Systemen. Sind zur Zielerreichung mehrere Iterationen von Benutzereingaben und Systemausgaben notwendig, spricht man von einem Dialogsystem (DIN EN ISO 9241-110).

Ein erstes umfassendes Modell der Interaktion ist der Ausführungs-Bewertungs-Zyklus nach Norman (1984). Dieser Zyklus unterteilt die Aktivitäten des Benutzers bei der Interaktion in verschiedene Phasen (Norman 1984, Norman 1988):

1. Festlegung des Ziels
2. Bildung der Absicht
3. Festlegen der Handlungssequenz
4. Ausführen der Aktion
5. Wahrnehmen des Systemstatus
6. Interpretieren des Systemstatus
7. Beurteilung des Systemstatus in Bezug auf die Ziele und Absichten

Wenn ein Benutzer aufgrund mangelnder Kenntnisse oder durch zu schwer verständliche Bedienelemente die Ausführung der Aktionen nicht erledigen und somit sein sich gesetztes Ziel nicht erreichen kann, entsteht bei den Schritten zwei bis vier eine interaktionshemmende Kluft, die von Norman (1990, S. 49) als „Gulf of Execution“ bezeichnet wird. Kann der Status des Systems falsch oder nicht wahrgenommen, interpretiert oder beurteilt werden (Schritte fünf bis sieben), liegt ein „Gulf of Evaluation“ vor (Norman 1990, S. 49).

Das Interaktionsmodell von Norman (1984) ist auf den Benutzer fixiert; das System als zweiter Bestandteil der Interaktion findet samt Benutzungsschnittstelle keine Berücksichtigung. Eine Erweiterung stellt daher das Modell von Abowd & Beale (1991) dar, da in diesem Modell Benutzer, System und Benutzungsschnittstelle gleichwertig berücksichtigt werden (Abbildung 2.6).

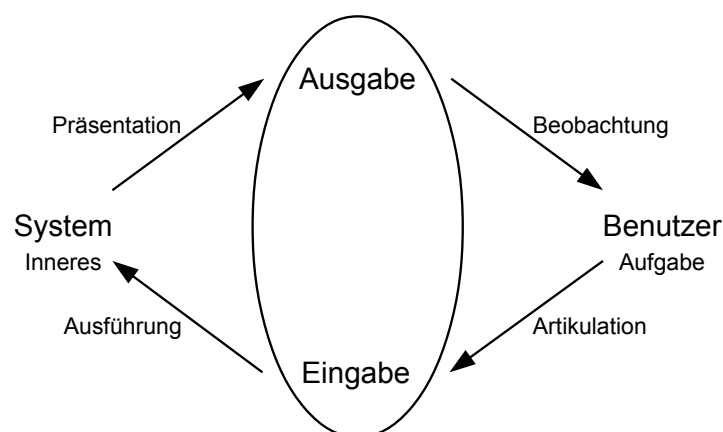


Abbildung 2.6: Modell der Interaktion nach Abowd & Beale (1991, S. 74)

Abowd & Beale (1991) benennen in ihrem Interaktionsmodell vier Bestandteile: das System, der Benutzer, die Eingabe und die Ausgabe, wobei die Eingabe und die Ausgabe zusammen die Benutzungsschnittstelle bilden (mittlerer Kreis in Abbildung 2.6). Diese Bestandteile sind nach Abowd & Beale (1991) an den vier Schritten der Interaktion beteiligt:

**Artikulation** Der Benutzer formuliert im ersten Schritt der Interaktion das Ziel und die Aufgabe. Der einzige Zugang zum System erfolgt für den Benutzer über eine Eingabe an der Benutzungsschnittstelle. Daher muss die Aufgabe in der Sprache der Benutzungsschnittstelle eingegeben werden.

**Verarbeitung** Die Eingabe wird an der Benutzungsschnittstelle in die innere Sprache übersetzt und vom System verarbeitet. Dabei ändert sich der Systemstatus.

**Präsentation** Der entsprechend der Eingabe veränderte Systemstatus wird dem Benutzer mitgeteilt. Dazu wird der komplexe Systemstatus in eine einfache Ausgabesprache übersetzt und an der Benutzungsschnittstelle ausgegeben.

**Beobachtung** Im letzten Schritt wird die Ausgabe der Benutzungsschnittstelle vom Benutzer beobachtet und beurteilt. Dabei findet beim Benutzer ein Abgleich der beobachteten Ergebnisse mit dem ursprünglich formulierten Ziel statt.

Nach Eason (1991) läuft die Interaktion zwischen Mensch und Computer auf drei verschiedenen Ebenen ab (Abbildung 2.7). Auf Ebene 1 findet der Informationsaustausch zwischen Mensch und Computer statt, während in Ebene 2 die Einflüsse aus Aufgabe und Umgebung umfasst (Eason 1991). Insgesamt ist die Mensch-Computer-Interaktion in einem sozialen, technischen und organisatorischen Rahmen eingebettet (Ebene 3), der wiederum Umgebungseinflüssen ausgesetzt ist (Eason 1991).

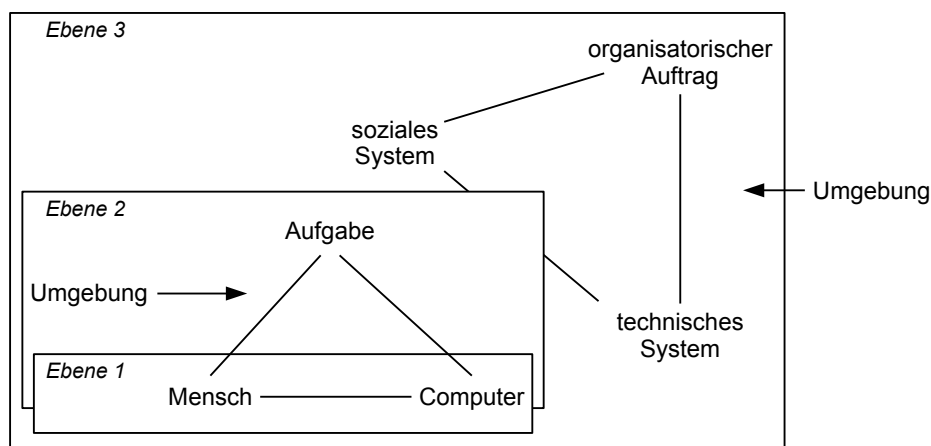


Abbildung 2.7: Modell der Mensch-Computer-Interaktion nach Eason (1991, S. 722)



In den bisher dargelegten Interaktionsmodellen fällt auf, dass nur ein einzelner Benutzer vorgesehen ist. Die Möglichkeit mehrerer Benutzer implizieren lediglich Dix et al. (2004), indem sie die Zahl der an der Interaktion Beteiligten mit mindestens zwei angeben. Ein Modell dazu liefern sie allerdings nicht, sondern beziehen sich auf Norman (1988) und Abowd & Beale (1991).

Anhand der aufgeführten Modelle für Mensch-Maschine-Systeme und Interaktion lässt sich eine Abgrenzung für interaktive Systeme vornehmen. Grundlegender Bestandteil der Interaktionsmodelle ist die Einbindung des Benutzers in einen geschlossenen Kreislauf („closed loop“). Dies ist durch die Beobachtung und Beurteilung des ausgegebenen Systemstatus gewährleistet. Systeme, die nach einer Eingabe den geänderten Systemstatus nicht über eine Ausgabe an den Benutzer kommunizieren, sind daher nicht als interaktive Systeme zu betrachten. Dies trifft zum Beispiel auf einige Industriesteuerungen oder Kommandosprachen für Computer zu.

### 2.2 Auswahl eines Basismodells für die Touchscreeninteraktion

Auf Basis der angeführten Modelle sollen sich die für die Interaktion mit einem Touchscreen relevanten ergonomischen Grundlagen in Perzeption, Kognition und Motorik unterteilen lassen. Da neben dem Aspekt der Motorik bei der Interaktion mit stationären Touchscreens auch die Körpermaße des Benutzers relevant sind, ist die Anthropometrie bei den ergonomischen Grundlagen ebenso zu berücksichtigen. Die beiden Punkte Motorik und Anthropometrie lassen sich unter dem Begriff Biomechanik zusammenfassen.

Aufgrund ihres pragmatischen Charakters (vgl. Abschnitt 2.1 und Stachowiak 1973) decken die dargelegten Modelle ihren jeweiligen Verwendungszweck ab. Die verschiedenen Verwendungszwecke der Modelle sind die Ursache für die Unterschiede bei den jeweiligen Bestandteilen und dem Aufbau. Auf Touchscreensysteme ist keines der dargelegten Modelle spezialisiert. Aus diesem Defizit ergab sich ein grundlegender Bedarf für eine Konkretisierung eines geeigneten Basismodells als Grundlage zur späteren Verankerung konkreter touchscreensystemspezifische Gestaltungsempfehlungen. Zur Auswahl eines Basismodells für die Touchscreeninteraktion wurden die dargelegten Modelle auf die Abbildung der Bestandteile eines Touchscreensystems analysiert (vgl. Abschnitt 2.1). In die Analyse wurden folgende Modelle aufgenommen:

- *einfaches Modell eines Mensch-Maschine-Systems* (vgl. Abbildung 2.1, Bubb & Schmidtke 1981)
- *Modell eines mechatronischen Systems* (vgl. Abbildung 2.2, VDI 2206)

- *detailliertes Modell eines Mensch-Maschine-Systems* (vgl. Abbildung 2.3, Timpe & Kolrep 2002)
- *Beispiel eines Mensch-Maschine-Systems* (vgl. Abbildung 2.4, Czaja & Nair 2012)
- *erweitertes Modell eines Mensch-Maschine-Systems* (vgl. Abbildung 2.5)

Das einfache Modell eines Mensch-Maschine-Systems enthält nach Bubb & Schmidtke (1981) ein *Sinnesorgan* und die *Muskulatur*. Die Perzeption und Biomechanik des Benutzers werden damit unvollständig vom Modell abgebildet. Die Kognition ist nicht Bestandteil des Modells. Im Bereich des technischen Systems weist das Modell von Bubb & Schmidtke (1981) einzig ein *Bedienelement* auf, mit dem zwar die Berührungserfassung, nicht aber die weiteren Komponenten eines Touchscreens abgebildet werden können.

Die Bestandteile Perzeption, Kognition und Biomechanik sind im Modell eines mechatronischen Systems nach VDI 2206 unter dem Begriff *Mensch* sehr stark verallgemeinert und zudem lediglich als optionaler Bestandteil enthalten. Auf der technischen Seite des Modells werden allgemein eine *Mensch-Maschine-Schnittstelle* sowie *Sensoren* erwähnt, mit denen sich die elektronische Anzeige und die Berührungserfassung eines Touchscreens abbilden lassen. Mit den technischen Bestandteilen *Kommunikationssystem* und *Informationsverarbeitung* kann eine Software modelliert werden. Über die ebenfalls erwähnten *Aktoren* sind auch Vorrichtungen für zusätzliche Rückmeldungen durch das Modell abgedeckt.

Im detaillierten Modell eines Mensch-Maschine-Systems von Timpe & Kolrep (2002) werden die Bestandteile Perzeption und Kognition als *Sensorik* und *Wissensbasis* umschrieben. Das Modell erwähnt im Bezug auf die Biomechanik die *Motorik*. Die Berührungserfassung lässt sich mit dem Modellbestandteil *Stellteile* abbilden. Der allgemeine Begriff *Anzeigetechnik* deckt eine elektronische Anzeige und auditive sowie haptische Rückmeldungen ab. Die Software eines Touchscreensystems kann der *Prozessautomatik* zugeordnet werden.

Auch wenn Czaja & Nair (2012) ihr Mensch-Maschine-Systems nur als Beispiel deklarieren, werden auf Seiten des Benutzers *Perzeption* und *Kognition* konkret genannt und die Biomechanik durch den Begriff *Psychomotorik* berücksichtigt. Das technische System des dargelegten Beispiels ist jedoch mit einer *Hard-* und einer *Softwareschnittstelle* sowie nicht weiter spezifizierten *Anweisungen* sehr allgemeinen gehalten. Die für Touchscreens notwendige elektronische Anzeige sowie die ggf. vorhandenen Erweiterungen für zusätzliche Rückmeldungen lassen sich dem Beispiel eines Mensch-Maschine-System von Czaja & Nair (2012) nicht eindeutig zuordnen.

Das erweiterte Modell eines Mensch-Maschine-Systems bildet sowohl die perzeptiven, kognitiven als auch biomechanischen Aspekte der Touchscreeninteraktion ab. Dabei werden die Begriffe *Sensorik* und *Motorik* anstelle von Perzeption und Biomechanik benutzt. Auf der technischen Seite eines Touchscreensystems sind sowohl die elektronische Anzeige als auch mögliche auditiven und haptischen Rückmeldungen unter dem Begriff *Anzeigen* im Modell abbildbar. Die *Bedienelemente* des Modells decken die Berührungserfassung eines Touchscreens ab. Die notwendige Softwarekomponente von Touchscreensystemen lässt sich im Modell dem *Dialogsystem* zuordnen.

Die Ergebnisse der Analyse zur Abbildung der Bestandteile eines Touchscreensystems in verschiedenen Modellen sind in Tabelle 2.1 zusammengetragen.

Tabelle 2.1: Abbildung der Bestandteile eines Touchscreensystems in verschiedenen Modellen

	einfaches Modell eines Mensch- Maschine-Systems <sup>1</sup>	Modell eines mechatronischen Systems <sup>2</sup>	detailliertes Modell eines Mensch- Maschine-Systems <sup>3</sup>	Beispiel eines Mensch- Maschine-Systems <sup>4</sup>	erweitertes Modell eines Mensch- Maschine-Systems <sup>5</sup>
✓ konkret abgebildeter Bestandteil					
○ allgemein oder unvollständig abgebildeter Bestandteil					
– nicht abgebildeter Bestandteil					
<b>Benutzer</b>					
Perzeption	○	○	✓	✓	✓
Kognition	–	○	✓	✓	✓
Biomechanik	○	○	○	○	○
<b>technisches System</b>					
elektronische Anzeige	–	○	✓	○	✓
Berührungserfassung	✓	✓	✓	✓	✓
Software	–	○	○	✓	○
Erweiterungen für Rückmeldungen	–	✓	✓	○	✓

<sup>1</sup> nach Bubb & Schmidtke (1981), <sup>2</sup> nach VDI 2206, <sup>3</sup> nach Timpe & Kolrep (2002),

<sup>4</sup> nach Czaja & Nair (2012), <sup>5</sup> des Fachgebiets Mensch-Maschine-Systemtechnik der Universität Kassel

Im direkten Vergleich (vgl. Tabelle 2.1) erreichen sowohl das detaillierte Modell eines Mensch-Maschine-Systems von Timpe & Kolrep (2002) als auch das erweiterte Modell eines Mensch-Maschine-Systems des Fachgebiets Mensch-Maschine-Systemtechnik der Universität Kassel eine nahezu vollständige Abbildung der technischen Bestandteile eines Touchscreensystems und der ergonomischen Grundlagen der Touchscreeninteraktion. Lediglich die Biomechanik und die für Touchscreensysteme notwendige Software sind in beiden Modellen unvollständig bzw. unkonkret vorhanden. Beachtet

man bei beiden Modellen die Anordnung der Benutzungsschnittstelle innerhalb des Mensch-Maschine-Systems, so erscheint die Platzierung zwischen *Subsystem Mensch* und *Subsystem Maschine* im erweiterten Modell eines Mensch-Maschine-Systems besser geeignet für Touchscreensysteme als die Positionierung innerhalb der *Maschine* zwischen *Hilfssystemen* und *Stellteilen* im detaillierten Modell eines Mensch-Maschine-Systems nach Timpe & Kolrep (2002). Das erweiterte Modell eines Mensch-Maschine-System des Fachgebiets Mensch-Maschine-Systemtechnik der Universität Kassel wurde daher als Basismodell des ganzheitlichen Gestaltungsansatzes für Touchscreensysteme ausgewählt.

In einem ersten Anpassungsschritt wurde der Begriff *Motorik* durch den Begriff *Biomechanik* ersetzt und das ursprünglich enthaltene *Dialogsystem* mit Hilfe des Begriffs *Softwareplattform* konkretisiert. Die touchscreenspezifischen Bestandteile *Berührungserfassung* und *Rückmeldungen* wurden im Subsystem Maschine in Richtung der Benutzungsschnittstelle ergänzt. Die Rückmeldungen umfassen dabei alle notwendigen technischen Bestandteile zur Erzeugung wahrnehmbarer Reize. Dabei kann es sich sowohl um visuelle Reize, wie zum Beispiel die grafische Darstellung einer Schaltfläche, als auch um Reize für weitere Wahrnehmungsmodalitäten handeln. Durch diese Anpassungen bildet das so entstandene Modell alle Bestandteile eines Touchscreensystems und die zur Touchscreeninteraktion notwendigen Fähigkeiten und Fertigkeiten des Benutzers bzw. der Benutzer vollständig und konkret ab. Das an Touchscreensysteme und die Touchscreeninteraktion angepasste Basismodell ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

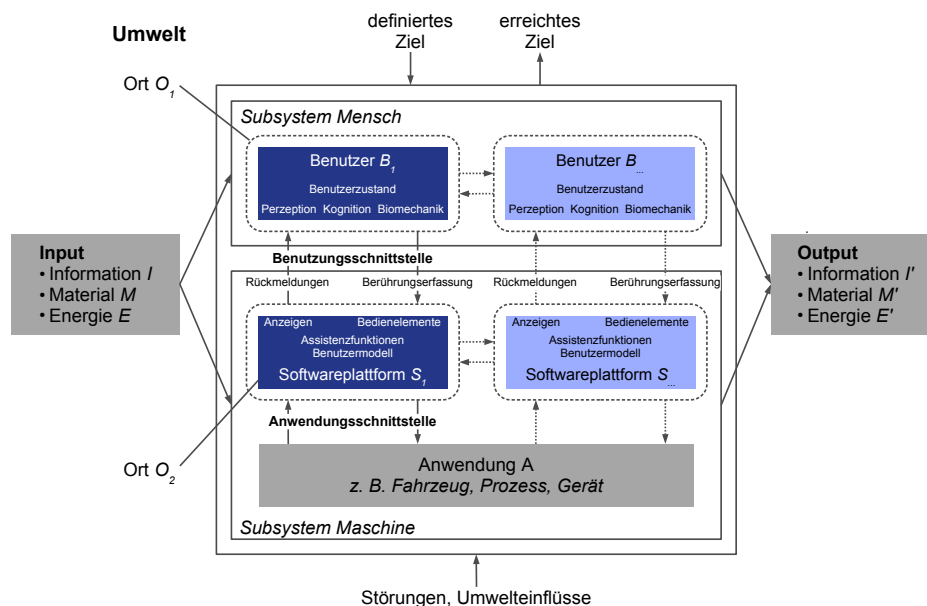


Abbildung 2.8: Basismodell angepasst an Touchscreensysteme

## 2.3 Subsystem Maschine – Touchscreentechnologien

Bei einer touchscreenbasierten Mensch-Maschine-Schnittstelle besteht diese auf der Seite der Maschine aus mehreren Bestandteilen (vgl. Abschnitt 2.1). Als notwendige Hardware lassen sich eine elektronische Anzeige zur Bilderzeugung, ein System zur Erfassung von Berührungen und gegebenenfalls einem System zur Erzeugung von auditiven und haptischen Rückmeldungen identifizieren. Softwareseitig sind eine grafische Darstellung der interaktiven Oberfläche sowie ein Treiber und weitere Softwarebestandteile zur Detektion von Berührungen und Verarbeitung der Eingaben enthalten.

Es existieren viele unterschiedliche technische Möglichkeiten, einen Touchscreen zu realisieren (Greenstein 1997). Der Einsatz von unterschiedlichen Technologien ist notwendig, um den Anforderungen des jeweiligen Nutzungskontextes des interaktiven Systems gerecht zu werden. In Unterabschnitt 2.6.2 werden diese im Detail betrachtet. Die auf Seite des Subsystems Maschine in die Interaktion involvierte Technik beeinflusst durch die Art der jeweiligen technischen Realisierung die Interaktion mit dem Menschen, wie Pickering (1986) und Laufs et al. (2010) für verschiedene Systeme zur Berührungserfassung festgestellt haben. Allerdings wird der Einfluss unterschiedlicher Technologien auf die Interaktion weder in den einschlägigen Normen zur Gestaltung von Touchscreensystemen (z. B. VDI/VDE 3850-3, DIN EN ISO 9241-400) noch in den Design Guides der Softwareplattformen mit integrierter Touchscreenunterstützung (z. B. Apple 2015a, Google 2015, Microsoft 2015d, Microsoft 2015b) berücksichtigt.

Zur Berücksichtigung dieser Einflüsse bei der Gestaltung von Touchscreensystemen war der Forschungsbedarf zu den Interaktionsmöglichkeiten und -einschränkungen der einzelnen Bestandteile eines Touchscreensystems zu decken. Dabei mussten die unterschiedlichen technischen Realisierungsmöglichkeiten der einzelnen Bestandteile berücksichtigt und systematisch analysiert werden.

## 2.4 Benutzungsschnittstelle – Interaktion mittels Touchscreens

Ein Design Guide enthält Vorgaben zur Gestaltung der Benutzungsschnittstelle von Anwendungen für die Softwareplattform eines Softwareherstellers (Schickler et al. 2015). Durch strikte Gestaltungsvorgaben sollen systemweit aber anwendungsübergreifend einheitliche Benutzungsschnittstellen erreicht werden, die eine konsistente Benutzerinteraktion fördern (Schickler et al. 2015). Eine herstellerübergreifende

einheitliche User Experience, wie sie bei Anwendungen angestrebt wird, die auf mehreren Softwareplattformen gleichzeitig verfügbar sind und parallel verwendet werden (Galitz 2007, Hartson & Pyla 2012), wird durch Unterschiede in den Empfehlungen verschiedener Softwarehersteller entgegen gewirkt (Hartson & Pyla 2012).

An einem Touchscreen erfolgt die Eingabe generell durch eine Berührung oder eine Bewegung mit einem Finger (Greenstein 1997). Können mehrere Berührungspunkte, also „multiple touches“, gleichzeitig erfasst und verarbeitet werden, spricht man von Multitouchscreens (Kin et al. 2009, Laufs et al. 2010), welche die Manipulation von Objekten mittels verschiedener Gesten ermöglichen (Zühlke 2012). Da an großen Multitouchscreens die Finger auch von verschiedenen Personen stammen können, sind solche Multitouch-Systeme zur Kollaboration mehrerer Benutzer geeignet (s. Abbildung 2.9, Wu & Balakrishnan 2003, Kin et al. 2009).

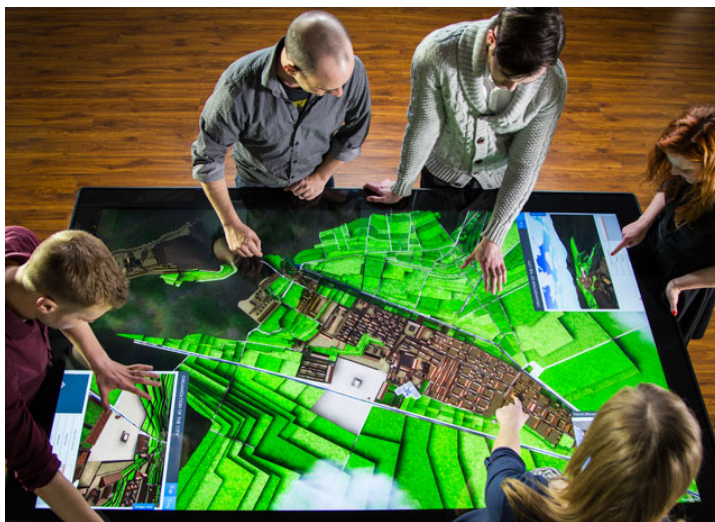


Abbildung 2.9: Kooperation mehrerer Benutzer an einem Multitouchscreen (Ideum 2015)

Die Art der Umsetzung einer Touchscreenberührung in eine Eingabe lässt sich über die Software beeinflussen. Eine Eingabe ist mittels Erst- oder Letztkontaktberührung möglich (DIN EN ISO 9241-400). So wird bei der Erstkontaktberührung z. B. einer Schaltfläche sofort angeklickt, sobald vom Touchscreen eine entsprechende Berührung erfasst wurde (DIN EN ISO 9241-400). Eine nachträgliche Korrektur nach dem Aufsetzen des Fingers auf den Touchscreen ist hingegen mit der Letztkontaktberührung möglich. Dabei findet die Aktivierung der Schaltfläche erst beim Beenden der Berührung durch das Abheben des Fingers statt (DIN EN ISO 9241-400). In der Zeit, in der vom Touchscreen eine Berührung erfasst wird, erfolgt lediglich eine Aktualisierung der Position.

### 2.4.1 Direkte Eingabe mittels Touchscreen

Da außer dem Finger kein spezielles Zeigewerkzeug, wie z. B. eine Maus, verwendet wird und auf diese Weise kein Abgleich zwischen Zeigewerkzeug und dargestellter Zeigeposition auf dem Display notwendig ist (Greenstein 1997), spricht man bei der Touchscreeninteraktion nicht nur von einer direkten Manipulation nach Shneiderman (1993) bzw. DIN EN ISO 9241-16, sondern von einer direkten Eingabe (Buxton 1990, Dix et al. 2004, Rogers et al. 2005, Kin et al. 2009, Zühlke 2012). Dies unterscheidet Touchscreens von Eingabegeräten wie z. B. die Maus oder das Touchpad, bei denen die Übersetzung einer Hand- oder Fingerbewegung in eine Cursorbewegung notwendig ist, da die Eingabe zum Teil in einer anderen Raumorientierung erfolgt als die Ausgabe und zudem die Umsetzung der Eingabe in die Ausgabe konfigurierbar ist. Wird zum Beispiel die Computermouse (indirektes Eingabemittel) auf dem Schreibtisch eine gewisse Strecke nach vorn verschoben, bewegt sich der Cursor auf dem Bildschirm in Abhängigkeit der (vor-)konfigurierten Mauseinflösung eine bestimmte Strecke nach oben (Rogers et al. 2005). Indirekte Eingabemittel erfordern im Gegensatz zu direkt wirkenden Eingabemitteln die grafische Darstellung der Cursorposition doch auch bei Touchscreens kann die Cursorposition nutzungskontextabhängig ein- und ausgeblendet werden (VDI/VDE 3850-3).

Zu den direkt wirkenden Eingabemitteln werden neben Touchscreens auch sprach- (Rogers et al. 2005), gesten- und blickgesteuerte Systeme sowie Brain-Computer-Interfaces (Domhardt & Schmidt 2009, Schmidt & Domhardt 2009) gezählt. Systeme, die auf der Interaktion mittels Touchscreen, Sprache, Gesten oder Augenbewegungen basieren, werden als Nachfolger der grafischen Benutzungsschnittstellen (englisch Graphical User Interface, GUI) unter dem englischen Begriff Natural User Interfaces (NUI) zusammengefasst (Ballmer 2010, Wigdor & Wixon 2011), da sich das jeweilige Eingabemittel unsichtbar in das System integrieren und auf natürliche Art ohne weitere Hilfsmittel benutzen lässt.

### 2.4.2 Zusammenhang zwischen Bewegungsdauer und Zielgröße sowie -entfernung (Fitts' Law)

Für die Touchscreeninteraktion ist eine angepasste grafische Benutzungsschnittstelle erforderlich, da die Größe der interaktiven Elemente, wie zum Beispiel von Schaltflächen, einen entscheidenden Einfluss auf die Interaktionsdauer und die Fehlerrate hat. Dies wurde z. B. von Sears & Shneiderman (1991) empirisch belegt. Eine Begründung lässt sich im Gesetz von Fitts (Fitts 1954) finden, das für viele Gebiete der Mensch-Maschine-Interaktion als Untersuchungs- und Gestaltungsmittel angepasst wurde (MacKenzie 1992). Es besagt, dass die Dauer, die benötigt wird, um eine

Zeigeaufgabe zu erfüllen, eine Funktion der Distanz zum Ziel und der Größe des Ziels ist. Der Zusammenhang ist in Gleichung 2.1 abgebildet.

$$\begin{aligned} MT &= a + b \cdot ID \\ ID &= \log_2 \frac{2A}{W} \end{aligned} \tag{2.1}$$

Die Größe  $MT$  entspricht der Bewegungsdauer (engl. „Movement Time“), die Variable  $A$  repräsentiert die Entfernung zum Ziel,  $W$  entspricht der Größe des Ziels oder der benötigten Genauigkeit und die  $ID$  gibt als „Index of Difficulty“ den Schwierigkeitsgrad, der Interaktion an. Die beiden Konstanten  $a$  und  $b$  beinhalten die Fähigkeiten des Menschen sowie die charakteristischen Eigenschaften des Eingabegeräts und lassen sich in Abhängigkeit des Nutzungskontextes empirisch erheben. Um die Bewegungsdauer zu minimieren, sind die Bedienelemente groß zu dimensionieren und so anzuordnen, dass bei einer Betätigung lediglich kurze Distanzen zurückzulegen sind.

Das Gesetz von Fitts nach Gleichung 2.1 ist nur für Zeigeaufgaben in einer Dimension, also entlang einer Linie, gültig. Zur Erweiterung des Gesetzes auf zweidimensionale Zeigeaufgaben, wie sie bei der Interaktion mit grafischen Benutzungsschnittstellen auftreten, gab es zahlreiche Ansätze, von denen sich die Formulierung entsprechend dem Shannon-Hartley-Gesetz zur Datenübertragung in der Nachrichtentechnik durchgesetzt hat (MacKenzie & Buxton 1992, DIN EN ISO 9241-410). Die Formulierung des Gesetzes von Fitts nach Shannon (siehe Gleichung 2.2) liefert auch für einen niedrigen Schwierigkeitsgrad valide Ergebnisse und vermeidet bei geringen Abstand  $A < 0,5 \cdot W$  einen Schwierigkeitsgrad kleiner Null.

$$\begin{aligned} MT &= a + b \cdot ID \\ ID &= \log_2 \left( \frac{2A}{W} + 1 \right) \end{aligned} \tag{2.2}$$

Unabhängig von ein- oder zweidimensionalen Zeigeaufgaben ist die Auslegung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle ein Kompromiss zwischen zulässiger Bewegungszeit und benötigter Genauigkeit. Eine Optimierung ist über die räumliche Anordnung und die Größe der Bedienelemente möglich.



### 2.4.3 Tippen, Ziehen und Gesten als touchscreenbasierte Interaktionsformen

Die Interaktionsmöglichkeiten eines Touchscreens umfassen neben dem Auslösen einer Eingabe durch eine Zeigeberührung, z. B. beim Anklicken einer Schaltfläche, auch die kontinuierliche Aktualisierung der Berührungsposition bei Folgeberührung, z. B. zum Betätigen eines Schiebereglers oder einer Wischgeste (DIN EN ISO 9241-400). Bei der Nutzung mehrerer Finger oder Hände sind weitere Differenzierungen der Eingaben, z. B. sekundärer Mausklick oder Zoom- und Rotationsgesten, möglich (Krueger et al. 1985, Kin et al. 2009). Bei der Eignung von Touchscreens für die drei unterschiedlichen Interaktionsformen Tippen, Ziehen und Geste gibt es je nach Autor unterschiedliche Auffassungen. Greenstein (1997) lässt lediglich Zeige- und Folgeaufgaben zu, schränkt die Eignung jedoch für die Eingabe alphanumerischer Daten ein. Laut Sears (1991) erfolgen alphanumerische Eingaben mit einer herkömmlichen Tastatur im Durchschnitt doppelt so schnell wie mit einem Touchscreen. Im Gegensatz dazu sind Touchscreens bei einfachen Zeigeaufgaben der indirekten Interaktion mit einer Maus überlegen (Kin et al. 2009). Daher sollten Touchscreens eher zur schnellen Positionierung eines Cursors, Optionsauswahl oder grafischen Interaktion und nur wenn unbedingt notwendig zur Eingabe alphanumerischer Daten verwendet werden (Sears 1991). Sind lediglich geringe Datenmengen einzugeben, bieten Touchscreensysteme gegenüber klassischen Eingabegeräten laut Plaisant & Sears (1992) folgende Vorteile:

- Haltbarkeit bzw. Vandalismusschutz für öffentlich zugängliche Systeme,
- Änderung des Tastaturlayouts, zum Beispiel zwischen QUERTZ und Dvorak,
- Änderung der Zeichenkodierung für die Internationalisierung, zum Beispiel zwischen lateinischen und kyrillischen Schriften,
- Änderung der Rückmeldung für Benutzer mit speziellen Bedürfnissen oder Einschränkungen und
- Ausnutzung des Platzes bei beschränkter Gerätegröße.

Die genannten Studien beziehen sich auf die Erfüllung verschiedener Zeigeaufgaben und Dateneingaben mittels Touchscreens, ohne dabei auf die mit Touchscreens möglichen Interaktionsformen Tippen, Ziehen und Geste systematisch zu vergleichen. Konkrete Hinweise zur Verwendung der unterschiedlichen Interaktionsformen sind bisher weder Bestandteil der allgemeinen Gestaltungsempfehlungen noch in den systemspezifischen Design Guides zu finden. Ein systematischer Vergleich der mit Touchscreens möglichen Interaktionsformen steht bisher aus. Das daraus resultierende

Forschungsinteresse umfasst die Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Eingabeformen auf die Interaktion sowie die Berücksichtigung dieser beim Erarbeiten von Gestaltungslösungen.

### 2.4.4 Dauer und Intensität der Touchscreeninteraktion

Während ein großer Teil touchscreenbasierter Systeme für den Privatgebrauch bestimmt ist, handelt es sich beim Untersuchungsgegenstand von Schultz et al. (1998) um ein Kassensystem, mit dem der Benutzer aus beruflichen Gründen interagiert. Die Verwendung von Touchscreens im Arbeitsumfeld hat in den vergangenen Jahren stetig zugenommen, z. B. an Büroarbeitsplätzen (Wigdor et al. 2007, Bi et al. 2011), zur Überwachung und Steuerung von industriellen Produktionsanlagen (Brecher et al. 2012) und auch im Medizinumfeld (Douglas et al. 2011, Lundström et al. 2011). Die Vorgaben für die Einrichtung dieser Arbeitsplätze beziehen sich allerdings oft nur auf klassische elektronische Anzeigen (z. B. BildscharbV, ANSI/HFES 100-2007) oder berücksichtigen die Dauer der Touchscreeninteraktion nicht (z. B. VDI/VDE 3850-3, DIN EN ISO 9241-410). Lediglich DIN EN ISO 9241-420 enthält den Hinweis, dass zumindest das Testen von Eingabegeräten wahrscheinlich Ermüdung zumindest einiger Körperteile verursachen wird. Konkret für Testabschnitte mittels der sogenannten Multitap-Eingabe oder ähnlichen Tätigkeiten empfiehlt DIN EN ISO 9241-420, eine Dauer von drei Minuten nicht zu überschreiten und anschließend Pausen gleicher Dauer einzuplanen. Eine Quellenangabe zu dieser Aussage oder Hinweise zur Übertragbarkeit dieser Empfehlung auf die Interaktion mit dem Eingabegerät abseits des Tests sind in DIN EN ISO 9241-420 nicht enthalten.

Bei klassischen Computerarbeitsplätzen wurde bereits frühzeitig erkannt, dass es eine Verbindung zwischen der anhaltenden Interaktion in unnatürlichen Körperhaltungen und der Entwicklung von körperlichen Beschwerden oder Erkrankungen des Bewegungsapparates gibt (z. B. Burgess-Limerick et al. 1998, Gerr et al. 2004). Nach Gerr et al. (2004) betreffen die Beschwerden oder Erkrankungen durch Computerarbeit häufig den oberen Rücken und die oberen Extremitäten. Aus diesem Grund schreibt z. B. die BildscharbV vor, dass die Arbeit am Computer regelmäßig durch andere Tätigkeiten oder Pausen unterbrochen wird, um die Belastung durch diese Interaktion zu verringern. Für die Interaktion und die Gestaltung von Touchscreensystemen gibt es keine entsprechenden Empfehlungen, welche die besondere Beanspruchung durch die Touchscreeninteraktion berücksichtigen. Für die Erarbeitung entsprechender Empfehlungen mangelt es bisher an gesicherten Erkenntnissen über die Nutzungsdauer von Touchscreensystemen im Arbeitsumfeld.

### 2.4.5 Biomechanik der Touchscreeninteraktion

Bereits Sears (1991) hat den Einfluss des Anstellwinkels eines stationären Touchscreens auf die subjektiv empfundene Ermüdung bei der Touchscreeninteraktion untersucht. Dabei wurde von den Probanden ein Anstellwinkel von  $30^\circ$  gegenüber der Horizontalen als am wenigsten und ein Winkel von  $75^\circ$  als am meisten ermüdend beurteilt (Sears 1991). Mit zunehmender Interaktionsdauer wurde von Plaisant & Sears (1992) eine kontinuierliche Zunahme der subjektiv empfundenen Ermüdung von Augen, Arm und Fingern festgestellt. Beide Autoren griffen auf nicht standardisierte Befragungsmethoden zurück und erhoben so die subjektiv empfundene Beanspruchung. Unter der Beanspruchung versteht man die subjektiven Folgen von Belastungen, wobei nach Rohmert & Rutenfranz (1983) Belastungen als objektive, von außen auf den Menschen einwirkende Einflussfaktoren aus Arbeitsaufgabe und Arbeitsumfeld definiert sind. Das Ausmaß der Folgen einer Belastung sind von den jeweiligen individuellen Gegebenheiten abhängig, so dass die gleiche Belastung bei verschiedenen Menschen zu unterschiedlich hohen Beanspruchungen führen (Rohmert & Rutenfranz 1983).

Ahlström et al. (1992) untersuchten mit einer Armauflage eine Möglichkeit zur Reduktion der touchscreeninduzierten Ermüdung und setzten mit der sogenannten Rated Perceived Exertion-Scale (RPE) nach Borg (1982) eine standardisierte Methode zur Erfassung der subjektiv empfundenen Ermüdung ein. Zudem wurde der Anstellwinkel des verwendeten Touchscreens in mehreren Stufen variiert. Die Studie ergab ein Minimum für die empfundene Ermüdung bei einem Anstellwinkel des Touchscreens von  $22,5^\circ$  gegenüber der Horizontalen und durch die Verwendung der Armauflage wurde die empfundene Ermüdung für alle Anstellwinkel reduziert (Ahlström et al. 1992). Auch Greenstein (1997) und Helander (2006) weisen darauf hin, dass das wiederholte Heben des Armes zum Erreichen des Touchscreens zur Ermüdung des Arms führen kann. In der Presse hat sich für die aus der Touchscreeninteraktion resultierende physische Ermüdung der Begriff „Gorillaarm“ etabliert (Carmody 2010, Pogue 2013).

Touchscreens sollten auf keinen Fall wie ein normaler Computermonitor aufgestellt werden (Sears 1991). Lediglich die Angaben zur Fixierlinie (vgl. DIN 5340) können bei der Positionierung eines Touchscreens von normalen Computermonitoren übernommen werden. So ist die Fixierlinie in entspannter sitzender Körperhaltung um  $\alpha_{\text{sitzend}} = 35^\circ$  gegenüber der Horizontalen nach unten geneigt (VDI/VDE 3850-2, DIN EN ISO 9241-5). In stehender Körperhaltung beträgt dieser Winkel etwa  $\alpha_{\text{stehend}} = 30^\circ$  (VDI/VDE 3850-2, DIN EN ISO 9241-5). Touchscreens sollten so positioniert sein, dass der Neigungswinkel der Fixierlinie innerhalb der Grenzen von  $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$  unterhalb der Sehachse bleibt (VDI/VDE 3850-2). Für die Neigung

des Touchscreens gegenüber der Horizontalen fanden Schultz et al. (1998) bei einer Analyse entsprechender Empfehlungen Werte im Bereich  $30^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$ . Die Autoren führten zudem eine empirische Studie an touchscreenbasierten Kassensystemen durch, bei der sie die subjektiven Präferenzen der Probanden auf die Neigung des Touchscreens erfassten, indem sie die Probanden den Winkel selbst einstellen ließen. Dabei konnten für den Touchscreen des Kassensystems Neigungswinkel im Bereich von  $19^\circ \leq \alpha \leq 54,5^\circ$  gegenüber der Horizontalen beobachtet werden (Schultz et al. 1998).

Ist ein Touchscreen im Bezug auf den Benutzer ortsfest montiert, ist häufig das Fehlen einer Armauflage feststellbar. Die Interaktion ohne Armauflage widerspricht den allgemeinen Empfehlungen der Fachliteratur, wie z. B. BGIA-Report 3/2008. Demnach stellt jede Aufgabe, die eine motorische Aktivität des Benutzers erfordert, eine physische Belastung dar. Der Verzicht auf eine Armauflage verstärkt die physische Belastung des Hand-Arm-Systems und des Schulterbereichs. Die Folgen dieser Belastung konnten bereits in früheren Untersuchungen zur Interaktion mit stationären Touchscreens in Form von Ermüdung qualitativ nachgewiesen werden. Diese Nachweise basierten auf Befragungen der VersuchsteilnehmerInnen. Ein Nachweis auf Basis physiologischer Messdaten wurde nicht geführt.

Abseits der Arbeitswissenschaft gab es keine Gestaltungsempfehlungen zu einer ermüdungsarmen Interaktionsdauer und gegebenenfalls notwendigen Erholungszeiten. Vorliegende arbeitswissenschaftliche Gestaltungsempfehlungen sind nicht auf Touchscreensysteme anwendbar, da diese Empfehlungen statische Arbeit, konkret Haltearbeit nach voraussetzen (Rohmert 1960, vgl. Rohmert 1993). Bei dieser Form der Arbeit werden zusätzlich zur Aufrechterhaltung der Körperhaltung (Haltungsarbeit) Kräfte auf Werkzeuge, Werkstücke oder Bedienelemente ausgeübt, die eine physische Belastung darstellen (Rohmert & Rutenfranz 1983). Laut Seeger et al. (2016) wirkt bei der Touchscreeneinteraktion auf das Bedienelement im Mittel eine Kraft von  $5,02 \pm 2,56$  N. Die physische Beanspruchung bei der Interaktion mit einem Touchscreen ist daher fast ausschließlich auf Haltungsarbeit zurückzuführen. Auch die objektive Erfassung der Folgen anhaltender Interaktion mit stationären Touchscreens sowohl auf die physische Beanspruchung des Benutzers als auch auf Effizienz und Effektivität der Aufgabenbearbeitung stand noch aus. Aus dem Stand der Forschung im Bereich der Biomechanik bei der Touchscreeninteraktion und dem Ziel, Empfehlungen für eine sinnvolle Interaktionsdauer und notwendige Erholungszeiten geben zu können, ergab sich ein Forschungsinteresse an der Quantifizierung der Ermüdung des Hand-Arm-Systems durch die Touchscreeninteraktion und die objektive Erfassung des Einflusses der Ermüdungseffekte auf die Interaktion.

### 2.4.6 Haptische Rückmeldung bei der Touchscreeninteraktion

Während physikalische Tasten und Schalter durch ihr Funktionsprinzip taktil wahrnehmbar sind und zudem über eine Krafterückmeldung bei einer Eingabe verfügen, ist dies bei Schaltflächen auf Touchscreens nicht der Fall (Burnett & Porter 2001, Choi & Kuchenbecker 2012, Xu & Bailey 2013). Benutzer nehmen bei einer Touchscreen-eingabe lediglich die Berührung einer glatten nahezu unbeweglichen Fläche wahr. Die haptische Wahrnehmung lässt sich an Touchscreens durch geeignete technische Maßnahmen künstlich ansprechen und so als zusätzliche Rückmeldungsmodalität nutzen (Hoggan et al. 2008).

Das Zusammenspiel einer „haptischen Eingabe“ und einer Krafterückwirkung kann nach Herczeg (2006) als einfachste Interaktionsform aufgefasst werden. Die Möglichkeiten zur Nutzung der Oberflächensensitivität der Haut als zusätzlichen Kommunikationskanal neben Sehen und Hören wurden bereits untersucht (z. B. Geldard 1960), wobei von den möglichen Stimuli nach Geldard (1960) ausschließlich die mechanische Erregung einen ausreichend schnellen und reproduzierbaren Reiz verursacht und sich zur Übermittlung von Informationen eignet. Durch die Nutzung der taktilen Wahrnehmung können mehrere Funktionen der Mensch-Maschine-Kommunikation unterstützt werden: Richtungsorientierung und -führung, Aufmerksamkeitsmanagement sowie Substitution einer anderen sensorischen Modalität (Jones & Sarter 2008). Chemische, thermische und elektrische Stimuli, die ebenfalls die somatoviscerale Wahrnehmung ansprechen, eignen sich nach Geldard (1960) aus Gründen der Reaktionszeiten und Reproduzierbarkeit nicht für die Verwendung als Informations- oder Kommunikationsmodalität.

Eine effektive Kombination aus visuellen, auditiven und taktilen Reizen stellt eine Kopplung der Modalitäten dar, bei der die Reize räumlich den gleichen Ursprung haben (Ferris & Sarter 2008, Jones & Sarter 2008). Allerdings müssen multimodale Reize so präzise kombiniert und synchronisiert werden, dass sie nicht nur den Anforderungen des Benutzers entsprechen, sondern auch zum Kontext und zur Funktionalität des Gesamtsystems passen (Jones & Sarter 2008). So sorgt die gleichzeitige Nutzung mehrerer Modalitäten zur Informationsübermittlung vor allem in komplexen Umgebungen für eine signifikante Verkürzung der Reizbeantwortung (Ferris & Sarter 2008). Die Nutzung von taktilen Rückmeldungen ist sinnvoll, wenn ein anderer Sinneskanal nicht in vollem Umfang nutzbar ist (Jones & Sarter 2008). Dies ist zum Beispiel bei Menschen mit Einschränkungen des Seh- oder Hörsinnes der Fall. Das Forschungsinteresse umfasst die Quantifizierung des Einflusses haptischer Rückmeldungen auf die Interaktion mit Touchscreensystemen.

## 2.5 Subsystem Mensch – Ergonomie von Touchscreensystemen

Die relevanten ergonomischen Grundlagen für die Interaktion mit einem Touchscreen umfassen die Perzeption, Kognition und Biomechanik (vgl. Abbildung 2.8 in Abschnitt 2.2). Die Interaktion mit einem Touchscreensystem besteht daher aus einer sensorischen und motorischen Leistung des menschlichen Körpers, weshalb man auch von Sensomotorik spricht (Schmidt & Lang 2007, Luhmann 2010). Das bedeutet, dass jeder Bewegung des Hand-Arm-Systems, die zur Interaktion mit einem Touchscreen notwendig ist, eine Sinnesmeldung vorausgeht (Schmidt & Lang 2007). Dies kann z. B. die Wahrnehmung der grafischen Benutzungsschnittstelle oder der Position und Orientierung des Hand-Arm-Systems sein. Zwischen dieser perzeptiven und motorischen Komponente der Bewegung des Hand-Arm-Systems laufen beim Mensch kognitive Prozesse ab, um die aufgenommenen Sinneseindrücke zu verarbeiten und die motorischen Kommandos zu generieren sowie die Aufmerksamkeit zu steuern (Pape 2010). Die Punkte sieben bis neun des Modells von Goldstein (2010b) in Abbildung 2.10 werden von Wickens et al. (2013) als Informationsverarbeitung bezeichnet und zusätzlich um den Aspekt der Aufmerksamkeit ergänzt. Dieses Modell ist in Abbildung 2.11 zu sehen und enthält die drei Verarbeitungskategorien Wahrnehmung, zentrale Informationsverarbeitung und Reaktion mit den jeweiligen Verarbeitungsinstanzen. Die durchgezogenen Pfeile deuten die Informationsweiterleitung und den Austausch an. Gestrichelte Pfeile und Linien weisen auf begrenzte Ressourcen hin.

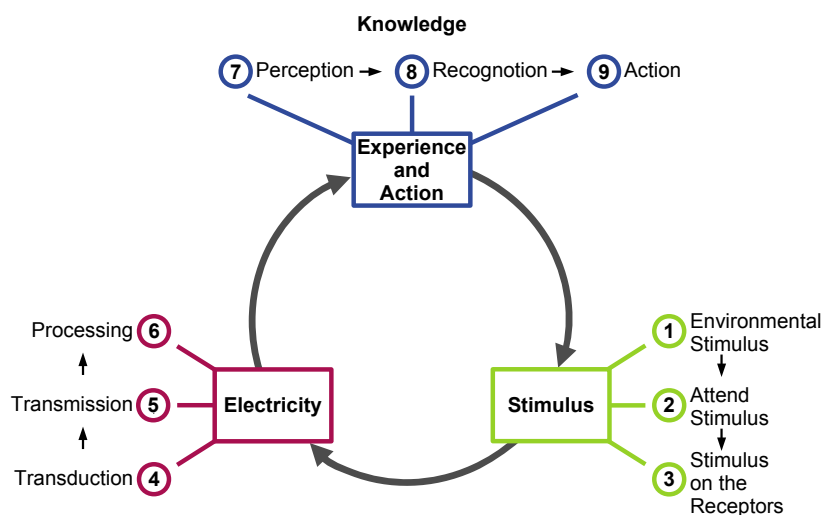


Abbildung 2.10: Modell der Wahrnehmung nach Goldstein (2010b, S. 6)

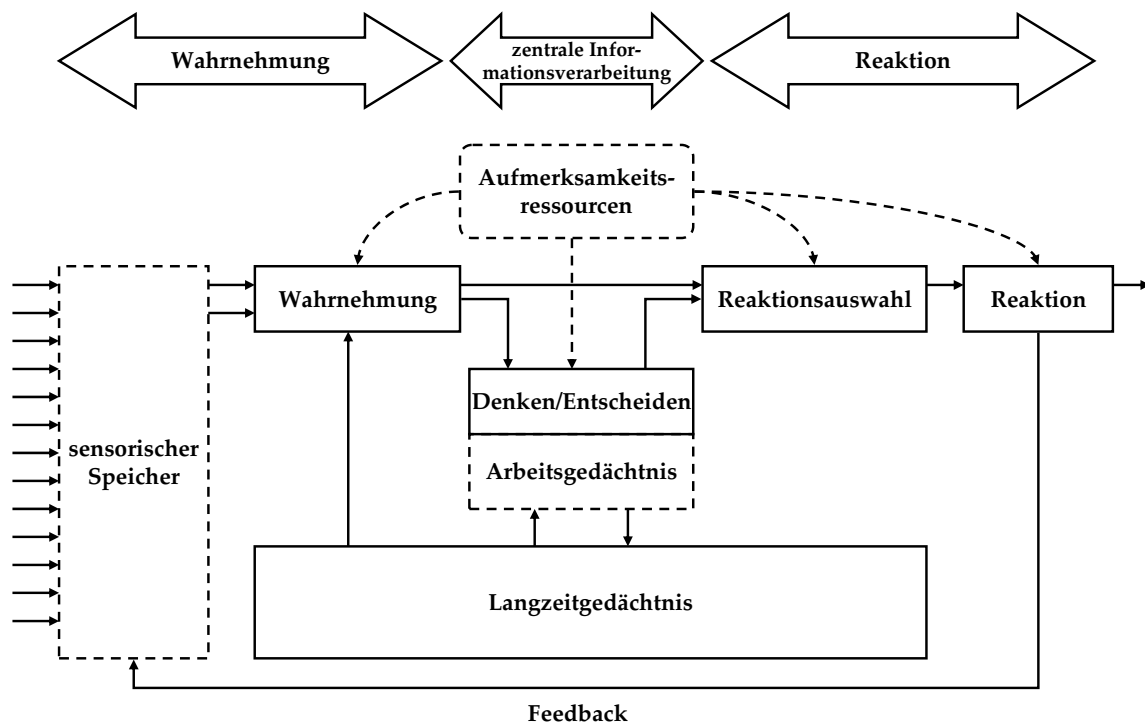


Abbildung 2.11: Modell der menschlichen Informationsverarbeitung nach Wickens et al. (2013, S. 102)

### 2.5.1 Perzeption

Die Interaktion mit einem Touchscreen erfolgt multimodal: Für Eingaben ist die Hand-Auge-Koordination notwendig; Rückmeldungen des Touchscreensystems erfolgen visuell und können zusätzlich auditiv oder haptisch unterstützt sein, so dass mehrere menschliche Sinne angesprochen werden. Die Grundlagen der Wahrnehmung sowie Physiologie und Leistungsfähigkeit der einzelnen beteiligten Sinnesmodalitäten werden im Folgenden erläutert.

Die Perzeption ist nach den physikalischen Kriterien der Sinnesrezeptoren unterteilt, zum Beispiel Mechanorezeptoren, Photorezeptoren, Chemorezeptoren und Thermorezeptoren (Campenhausen 1993, Mörike et al. 2001). Die Rezeptoren wandeln die Reize in Nervensignale um. Die menschliche Wahrnehmung kann anhand der Kausalkette Reiz – Erregung – Wahrnehmung erklärt werden (Campenhausen 1993). Statt Wahrnehmung wird auch der Begriff Erregungsbeantwortung verwendet, da dieser die Wahrnehmung mit einschließt und zusätzlich jede Reaktion des Körpers oder einzelner Organe auf einen Reiz umfasst (Mörike et al. 2001). Als Reiz oder Stimulus wird nach Pschyrembel & Arnold (2013) jede Bedingung oder Änderung der

chemischen beziehungsweise physikalischen Umgebung bezeichnet, die beim Überschreiten der so genannten Reizschwelle eine Antwort im Sinne einer Empfindung beziehungsweise einer Reaktion hervorruft. Diese Reizschwelle beschreibt die Intensität eines Stimulus, die mindestens aufgebracht werden muss, um eine Wahrnehmung desselben hervorzurufen (Schmidt & Lang 2007, Goldstein 2010b). Sie wird daher auch als Absolutschwelle, Reiz Limen (RL) oder Just Noticable Stimulus (JNS) bezeichnet (Schmidt & Lang 2007, Goldstein 2010b). Im Gegensatz dazu beschreibt die Unterschiedsschwelle den Wert, um den die Intensität eines Stimulus verändert werden muss, damit eine Änderung dieses Stimulus wahrgenommen werden kann (Schmidt & Lang 2007, Goldstein 2010b). Die Unterschiedsschwelle wird auch als Differenzschwelle, Differenz Limen (DL) oder Just Noticable Difference (JND) bezeichnet (Schmidt & Lang 2007, Goldstein 2010b). Ist ein Reiz zeitlich wenig oder gar nicht veränderlich, kommt es zur Adaption der Rezeptoren, wodurch der Reiz anschließend nicht mehr wahrnehmbar ist (Schönhammer 2009). Die Gewöhnung an einen sich ständig wiederholenden Reiz wird Habituation genannt und läuft auf höherer Ebene ab (Schmidt & Lang 2007). Im Gegensatz zur Adaption ist die Habituation aktiv über die Aufmerksamkeit beeinflussbar (Schönhammer 2009).

Für die Umwandlung des Reizes in eine Erregung sind spezialisierte reizaufnehmende Strukturen des Organismus, die Rezeptoren, verantwortlich (Mörke et al. 2001). Die unterschiedlichen Rezeptoren sind durch ihre Lage im Körper und ihre Ausstattung mit molekularen Rezeptorstrukturen auf verschiedene Reizarten spezialisiert, wodurch sie eine eingeschränkte Reizbarkeit und somit eine Reizspezifität aufweisen (Campenhausen 1993). Wird ein Rezeptor durch den Reiz erregt, auf den er spezialisiert ist, spricht man von einem adäquaten Reiz. Aber auch bei einem inadäquaten Reiz antwortet ein Rezeptor empfindungsspezifisch, also reizunabhängig mit der entsprechend spezialisierten Empfindung (Campenhausen 1993). So ist nach Campenhausen (1993) zum Beispiel bei einem Schlag auf das Auge ein heller Lichtblitz wahrnehmbar. Die Erregung durch den Reiz wird von den Rezeptoren als frequenzmodulierte Impulsfolge an die Nervenfasern übermittelt. Die Nervenzellen sind über Synapsen miteinander vernetzt, die die Impulsfolge einer Erregung verstärken oder abschwächen können und somit als Sympatikus oder Parasympatikus wirken (Campenhausen 1993). Werden mehrere menschliche Sinne gleichzeitig angesprochen, kann es zur intersensorischen Konkurrenz kommen, bei der der Mensch der Wahrnehmung einer Modalität unbewusst den Vorzug gibt (Schönhammer 2009).

### **Visuelle Wahrnehmung**

Die Aufnahme visueller Reize in Form von Licht wird durch das menschliche Auge als Wahrnehmungsorgan ermöglicht (Garhart & Lakshminarayanan 2012). Der wahrnehmbare und damit sichtbare Bereichs des elektromagnetischen Spektrums ist in Abbildung 2.12 dargestellt.



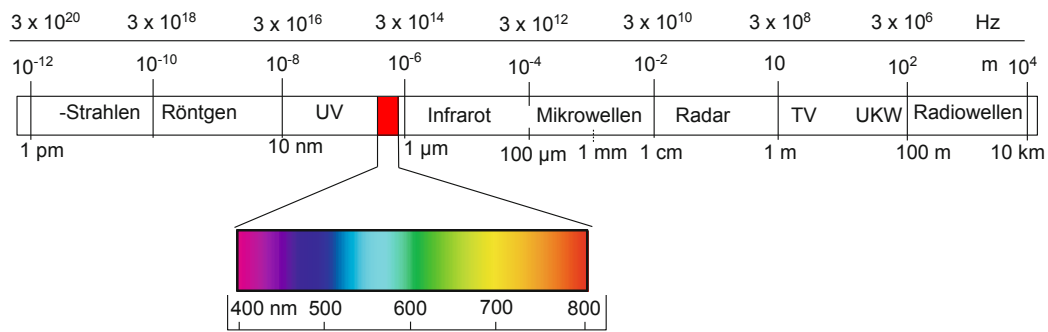


Abbildung 2.12: Lage des sichtbaren Lichts im Spektrum elektromagnetischer Wellen (Müller & Frings 2009, S. 506)

Das Auge ist ein optisches System, ähnlich einer Kamera (Schönhammer 2009), das aus Iris, Linse, Hornhaut (Cornea) und Netzhaut (Retina) besteht (Mörke et al. 2001). Licht, das von Objekten in der Umwelt reflektiert wird, trifft im menschlichen Auge nach der Fokussierung durch die Linse auf die Retina und wird dort durch Photorezeptoren in elektrische Signale zur Weiterleitung an das Gehirn gewandelt (Goldstein 2010b). Die Retina ist etwa 0,4 Millimeter dick (Goldstein 2010b) und die dort befindlichen Photorezeptoren lassen sich in Stäbchen und Zapfen unterscheiden (Schönhammer 2009, Goldstein 2010b, Bloj & Hedrich 2012, Garhart & Lakshminarayanan 2012). Der Aufbau des menschlichen Auges ist in Abbildung 2.13 schematisch dargestellt.

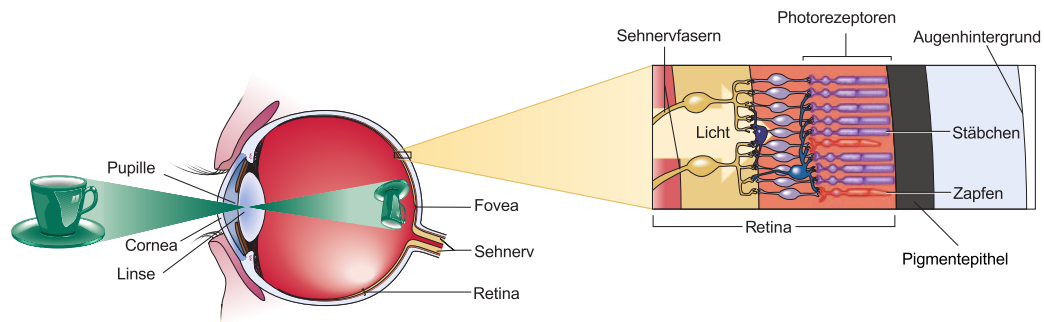


Abbildung 2.13: Schematischer Aufbau des menschlichen Auges nach Goldstein (2010b, S. 45)

Die Zapfen sind für die Detail- und Farberkennung verantwortlich. Es gibt drei Arten von Zapfen mit einem Empfindlichkeitsmaximum bei kurz-, mittel- und langwelliger Strahlung (K-, M-, und L-Zapfen; Schönhammer 2009). Die Sensibilitätsunterschiede der Zapfenarten im Bezug auf das Lichtspektrum ermöglichen die Farbdifferenzierung (Dix et al. 2004, Schönhammer 2009, Garhart & Lakshminarayanan 2012). Da sich der Farbeindruck aus den drei Rezeptorpotenzialen der Zapfenarten zusammensetzt, kann

jede Farbe unabhängig von ihrer Spektralverteilung mittels additiver Farbmischung mit den Primärfarben rot, grün und blau erzeugt werden. Man spricht deshalb auch von der trichromatische Theorie oder Dreifarbttheorie (Goldstein 2010b, Bloj & Hedrich 2012, Garhart & Lakshminarayanan 2012).

Die Photorezeptoren sind ungleichmäßig auf der menschlichen Retina verteilt (Abbildung 2.14 auf S. 29); die Zentralregion besteht ausschließlich aus Zapfen, die nach außen abnehmen (Østerberg 1935, Garhart & Lakshminarayanan 2012). Der Bereich mit der höchsten Zapfendichte wird Sehgrube, Foveola oder Fovea centralis genannt und entspricht dem Gebiet des schärfsten Sehens (Schenk & Rigoll 2010, DIN 5340). Dieser Bereich bietet für einen Sehwinkel von ca. 20 Winkelminuten die besten Abbildungsbedingungen (DIN 5340). Der Sehwinkel umschließt ausgehend vom Auge das Sehobjekt (DIN 5340), z. B. ein Zeichen oder Symbol. Die Dichte der Zapfen nimmt bis zu einem Winkel von 15° so weit ab, dass darüber hinaus keine Farbwahrnehmung möglich ist (Dix et al. 2004, Schenk & Rigoll 2010). Bei schwacher Beleuchtung arbeiten die Zapfen nicht, weshalb scharfes Sehen eine ausreichende Beleuchtung erfordert (Schönhammer 2009). Die Stäbchen ermöglichen keine Farbwahrnehmung sondern geben Helligkeitsunterschiede als Graustufen wieder.

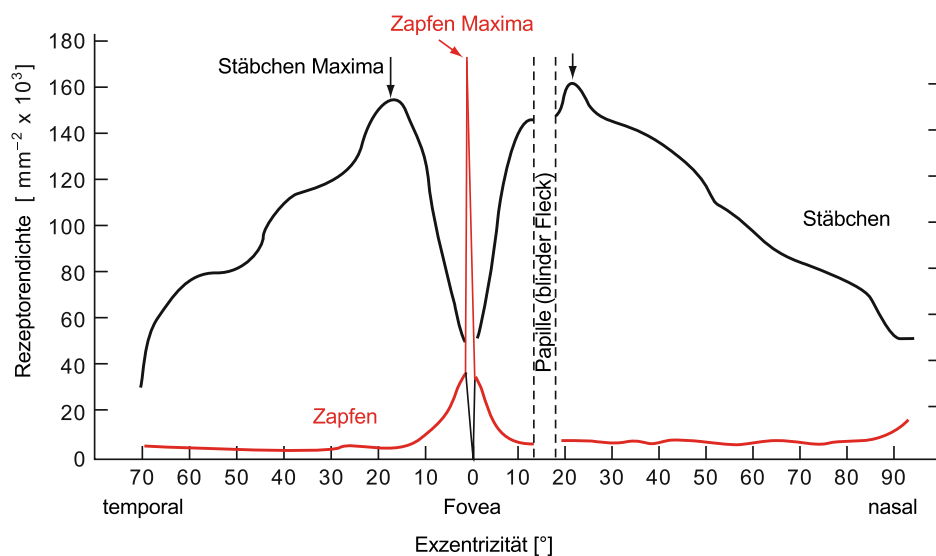


Abbildung 2.14: Verteilung der Photorezeptoren im menschlichen Auge nach Garhart & Lakshminarayanan (2012, S. 80), Daten von Østerberg (1935)

Als Maß für die Sehschärfe wird häufig der Visus verwendet; er umfasst den reziproken Wert des Sehwinkels, bei dem ein kritisches Detail noch erkennbar ist (DIN EN ISO 8596). Eine nichteingeschränkte Sehschärfe liegt bei einem Visus von 1 bzw. 100 Prozent vor (Müller 2011). Dies besagt, dass eine Struktur von der Größe einer Winkelminute erkannt wurde (Müller 2011). Die Abbildung des Objektes auf der

Retina ist entsprechend eines dioptrischen Systems vom Abstand des Objektes vor der Linse abhängig (Müller & Frings 2009). Damit das Auge ferne und nahe Objekte scharf abbilden kann, ist eine Anpassung der Linse erforderlich. Beim menschlichen Auge findet diese sogenannte Akkomodation über eine Reihe von Ciliarmuskeln statt, welche die Linse verformen (Müller & Frings 2009) und so eine scharfe Abbildung von unterschiedlich entfernten Objekten ermöglichen. Die begrenzte Verformbarkeit der Linse sorgt dafür, dass es eine Untergrenze für die Akkomodation im Nahbereich gibt (Müller & Frings 2009). Zudem lässt die Elastizität der Linse im Alter nach, wodurch die Nahakkomodation immer schwerer fällt und sich die sogenannte Altersweitsichtigkeit einstellt (Müller & Frings 2009, Müller 2011).

Die Wahrnehmung einer Farbe erfolgt anhand von drei Faktoren: Farbton, Helligkeit und Sättigung (Dix et al. 2004). Der Farbton entspricht dabei der Wellenlänge des Lichts (vgl. Abbildung 2.12); die Sättigung dem Weißanteil der Farbe. Im Schnitt sind ca. 150 Farbtöne vom Menschen unterscheidbar; durch Variation von Helligkeit und Sättigung bis zu sieben Millionen verschiedene Farbeindrücke wahrnehmbar (Dix et al. 2004). Die Anzahl der identifizierbaren Farben liegt bei ungeübten Menschen bei ungefähr zehn (Dix et al. 2004). Da nur drei bis vier Prozent der Fovea mit blausensitiven Zapfen besetzt sind, ist die Sehschärfe für blau geringer (Dix et al. 2004). Weitere Einschränkungen bei der Farbwahrnehmung betreffen ca. acht Prozent der Männer und ein Prozent der Frauen – sie sind farbenblind und können meist nicht zwischen rot und grün unterscheiden (Dix et al. 2004).

### **Auditive Wahrnehmung**

Das menschliche Ohr umfasst zwei Sinnesorgane – zum einen nimmt es Schallwellen zur auditiven Wahrnehmung und zum anderen Beschleunigungen für den Gleichgewichtssinn wahr (Sommer 1995). Für hörbare Rückmeldungen von Touchscreensystemen ist die Funktion der auditiven Wahrnehmung relevant. Dazu generiert das Touchscreensystem mechanische Schwingungen. Diese Schwingungen erzeugen in der sie umgebenden Luft periodische Verdichtungen, die in Form von Druckwellen durch die Luft weitergeleitet werden (Campenhausen 1993). Wenn diese Druckwellen entsprechend große Amplituden und Frequenzen aufweisen, um das Hörorgan zu reizen, spricht man von Schallwellen (Campenhausen 1993). Treffen diese Schallwellen auf das menschliche Ohr, werden sie durch die Ohrmuschel und den äußeren Gehörgang zum Trommelfell gelenkt (Klinke 2010). Das Trommelfell wird dadurch zum Schwingen gebracht und diese Schwingungen werden über die gelenkig verbundene Gehörknöchelkette aus Hammer, Amboss und Steigbügel zum sogenannten ovalen Fenster übertragen (Müller-Limmroth 1993). Das ovale Fenster stellt die Verbindung zum Innenohr dar (Klinke 2010). Das Innenohr besteht aus mehreren Hohlräumen und der Schnecke. Das eigentliche Hörorgan befindet sich im Inneren der Hörschnecke (Lippert et al. 2010). Dort liegen die Haarzellen, die als Rezeptoren fungieren und

sich bei mechanischen Schwingungen verbiegen, wodurch an der Haarwurzel ein Rezeptorpotenzial entsteht, das über den Hörnerv weitergeleitet wird (Sommer 1995). Die Haarzellen sind Mechanorezeptoren und mechanische Schwingungen stellen für sie einen adäquaten Reiz dar (Sommer 1995). Dieser Reiz wird von den Haarzellen an Nervenfasern übertragen, die zusammen in den Hörnerv münden. Die Anatomie des menschlichen Ohres ist in Abbildung 2.15 dargestellt.

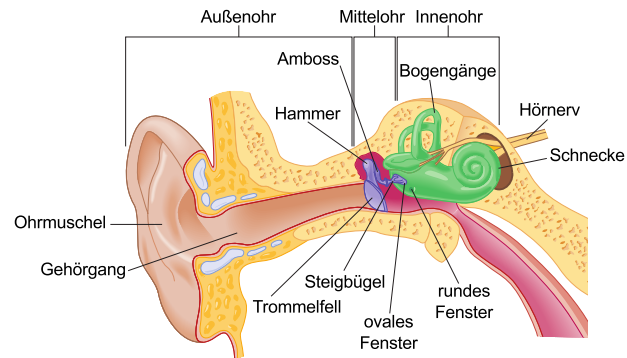


Abbildung 2.15: Schematischer Aufbau des menschlichen Ohrs nach Goldstein (2010b, S. 269)

So wie Farben durch die Eigenschaften Farbton, Helligkeit und Sättigung charakterisiert werden, so können Töne in Tonhöhe, Lautheit und Timbre variieren. Die Tonhöhe wird dabei durch die Frequenz der Schallwellen beeinflusst; die Lautheit ist eine Funktion der Intensität und Höhe des Tons (Carlson 2005, Goldstein 2010b). Je größer die Vibrationsamplitude eines Gegenstandes ist, umso größer ist auch die Intensität der Schallwellen und somit die Lautheit (Carlson 2005, Goldstein 2010b). Das Timbre wird durch die Mischung der verschiedenen Vibrationsfrequenzen bestimmt und gibt somit eine Information über die Art des Klangs (Carlson 2005). Abbildung 2.16 verdeutlicht diese Zusammenhänge.



Abbildung 2.16: Physikalische und perzeptive Dimensionen von Klängen nach Carlson (2005, S. 190)

Jugendliche können Töne im Frequenzbereich zwischen 18 Hertz und 20 Kilohertz wahrnehmen (Müller-Limmroth 1993, Dahm 2006). Mit zunehmendem Lebensalter sinkt die obere Frequenzgrenze stetig ab (Saup 1993). Maßgebend für die Lautheit ist der Schalldruck und die Frequenz. Damit ein Ton überhaupt wahrnehmbar ist, muss der Schwellenschalldruck zum Erreichen der auditiven Absolutschwelle erreicht sein. Der notwendige Schwellenschalldruck ist von der Frequenz des Tones abhängig (Müller-Limmroth 1993). Misst man für jede der Frequenzen zwischen 8 Hertz und 18 Kilohertz den Schwellenschalldruck und trägt ihn in einem Diagramm auf, erhält man die Hörschwellenkurve (Abbildung 2.17, Müller-Limmroth 1993). Diese Kurve bildet die untere Grenze der sogenannten Hörfläche. Nach oben ist die Hörfläche durch die Schmerzgrenze begrenzt (Müller-Limmroth 1993, Klinke 2010).

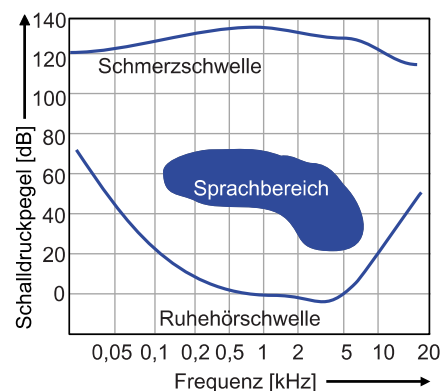


Abbildung 2.17: Beispiel für die Hörfläche des Menschen nach Dahm (2006, S. 65)

### Haptische Wahrnehmung

Der Begriff Haptik geht auf Dessoir (1892) zurück und umfasst die Wissenschaft aller biologischen und psychologischen Aspekte der menschlichen Berührungsprozesse (Grunwald 2008, S. 649), z. B. Druck, Berührung, Vibration, Temperatur, Schmerz, Körperlage, -kraft und -bewegung. Man spricht von einer taktilen Wahrnehmung, wenn eine passive Erregung der Hautsinne ohne eigene Bewegung von Finger, Hand oder Körper vorliegt (Grunwald 2008, S. 656). Die Wahrnehmung taktiler Reize erfolgt über die mechanischen Hautsinne. Die taktile Wahrnehmung wird daher auch Ekterozeption genannt (Schandry 2011, S. 229). Die Wahrnehmung statischer und dynamischer Körperhaltungen wird als Kinästhetik bezeichnet (Grunwald 2008, S. 650). Die Kinästhetik umfasst die Sinne zur Wahrnehmung der Lage und Position des Körpers und der Extremitäten im Raum sowie die Wahrnehmung der ausgeübten Kräfte und damit zusammenhängenden Bewegungen (Goldstein 2010b, Meßlinger 2010). Die dazu notwendigen Informationen umfassen den Dehnungs- und Spannungszustand der Muskeln und Sehnen und dienen zur Kontrolle und Steuerung der Bewegungen des Körpers (Goldstein 2010b, Meßlinger 2010).

Die Haptik ist ein Teilgebiet der Somatosensorik. Die Somatosensorik umfasst alle Sinne der menschlichen Wahrnehmung, die Informationen über den eigenen Körper einschließlich der Körperoberfläche und der inneren Organe liefern (Schandry 2011, S. 229). Dazu gehört neben taktiler und kinästhetischer Wahrnehmung auch die Viszerozeption bzw. Enterozeption, welche die Sensorik der inneren Organe umfasst (Schandry 2011, S. 229).

In allen Schichten der menschlichen Haut sind Rezeptoren enthalten, die aus marklosen Nervenendigungen mit speziellen reizaufnehmenden Einrichtungen bestehen und deshalb als primäre Sinneszellen bezeichnet werden (Sommer 1995). Die Intensität einer Reizantwort ist in Abhängigkeit des jeweiligen Rezeptors proportional zur Auslenkung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung des Reizes (Kern 2009). Die rezeptorischen Endigungen liegen entweder als freie Nervenendigungen vor oder sind als korpuskuläre Hautrezeptoren mit verschiedenen Zellstrukturen umhüllt (Sommer 1995). Je nach Literaturquelle werden der taktilen Wahrnehmung vier (Schmidt & Schaible 2006, Kunsch & Kunsch 2007, Smith 2008) bis sechs (Sommer 1995, Schmidt & Lang 2007, Kern 2009) verschiedene Rezeptortypen zugeordnet: Merkel-Zellen, Ruffini-Körperchen, Meißner-Tastkörperchen, Vater-Pacini-Lamellenkörperchen, Tastscheiben und Haarfollikelsensoren. Die sechs unterschiedlichen Mechanorezeptoren der Haut samt Reizselektivität und Adaptionsgeschwindigkeit sind in Abbildung 2.18 wiedergegeben.

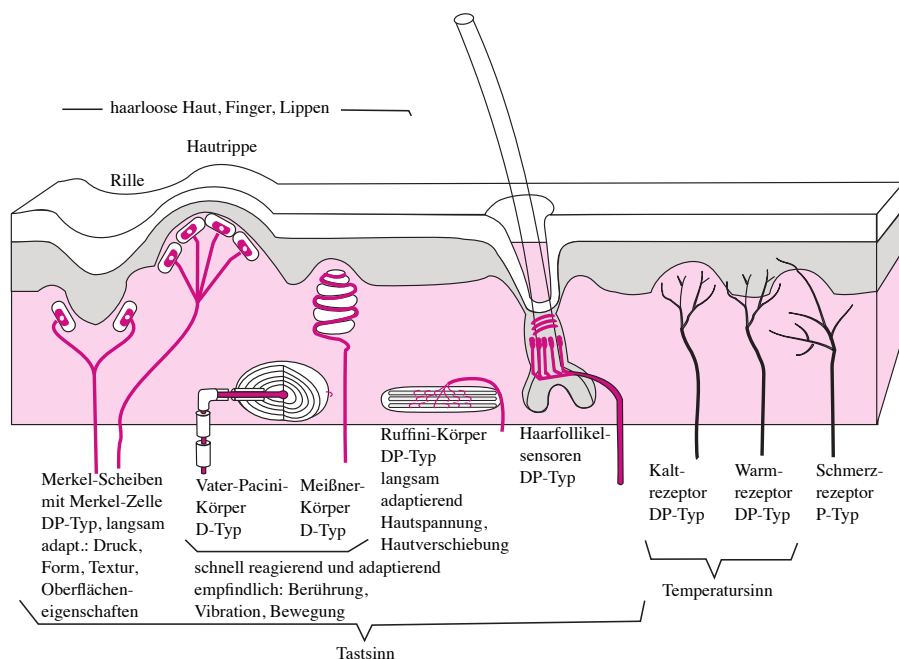


Abbildung 2.18: Prinzipskizze der Mechanorezeptoren der Haut (Müller & Frings 2009, S. 412)

Für die taktile Wahrnehmung ist die Vierkanaltheorie nach Gescheider et al. (2009) das am meisten etablierte Modell (Choi & Kuchenbecker 2012). Es bezieht sich auf vier verschiedene Mechanorezeptoren in der Haut, die sich in der Sensitivität und Reaktionsgeschwindigkeit auf einen Reiz unterscheiden, so dass sich mechanische Reize differenzieren lassen (Choi & Kuchenbecker 2012). Für die taktile Wahrnehmung sind nach Kunsch & Kunsch (2007) in erster Linie die sogenannten Merkel-Zellen entscheidend, die in der Oberhaut, auch Epidermis genannt, liegen (Sommer 1995) und langsam adaptierend sowie geschwindigkeits- und auslenkungsproportional (Kern 2009) auf Druck reagieren (Kunsch & Kunsch 2007). Der Mensch verfügt über zirka 60 Millionen Merkel-Zellen im ganzen Körper mit einer Größe von jeweils 100 Mikrometer (Kunsch & Kunsch 2007). In zweiter Linie sorgen die sogenannten Ruffini-Körperchen für die Wahrnehmung von Druck (Kunsch & Kunsch 2007). Sie sind langsam adaptierende Rezeptoren und reagieren geschwindigkeits- und auslenkungsproportional auf einen taktilen Reiz (Kern 2009). Ruffini-Körperchen liegen zusammen mit den Nervenplexen der Haarfollikel in den tieferen Schichten der Lederhaut (Sommer 1995) sowie in der Unterhaut und haben eine Länge von 0,5 bis 2 Millimeter (Kunsch & Kunsch 2007). Im Gegensatz dazu liegen die Meißner-Tastkörperchen in der Lederhaut (Corium) (Sommer 1995) und reagieren schnell adaptierend und geschwindigkeitsproportional (Kern 2009) auf Berührung (Kunsch & Kunsch 2007). Meißner-Tastkörperchen haben eine Länge von 100 Mikrometer und eine Dicke von 40 Mikrometer (Kunsch & Kunsch 2007). Vater-Pacini-Lamellenkörperchen liegen in der Unterhaut (Kunsch & Kunsch 2007) und reagieren schnell adaptierend und beschleunigungsproportional auf einen taktilen Reiz. Sie reagieren dadurch sehr gut auf Vibration (Kunsch & Kunsch 2007). Vater-Pacini-Lamellenkörperchen bestehen aus 20 bis 50 Zellen und haben dadurch eine Länge von vier und eine Dicke von zwei Millimetern (Kunsch & Kunsch 2007). Die Tastscheiben liegen in besonderen Vorbuchtungen der behaarten Haut (Sommer 1995).

Die Haut des Menschen bildet mit ihrer Fläche von maximal zwei Quadratmetern das größte menschliche Sinnesorgan (Sommer 1995). Im gesamten Körper befinden sich ca. 500.000 Meißner-Tastkörperchen, wovon bis zu 200 pro Quadratzentimeter an der Fingerspitze zu finden sind und ihre maximale Empfindlichkeit bei einer Frequenz von kleiner 60 Hertz aufweisen (Kunsch & Kunsch 2007). Die Anzahl von Vater-Pacini-Lamellenkörperchen im menschlichen Körper beträgt ca. 40.000, wovon bereits jeweils über 600 auf einer Handfläche lokalisiert sind (Kunsch & Kunsch 2007). Die maximale Empfindlichkeit der Vater-Pacini-Lamellenkörperchen wird zwischen 100 und 400 Hertz erreicht (Kunsch & Kunsch 2007). Je Quadratzentimeter Haut lassen sich daher mit entsprechend kleinen Reizelektroden im Mittel zwei Wärme-, 13 Kälte-, 25 Druck- und 200 Schmerzpunkte identifizieren (Sommer 1995). Kunsch & Kunsch (2007) geben die durchschnittliche Anzahl von Druckrezeptoren mit 27 Stück je Quadratzentimeter an. Allerdings schwanken diese Werte je nach Körperregion



erheblich; so ist zum Beispiel die Drucksensitivität an den Fingerkuppen aufgrund der Rezeptorendichte erheblich höher als im Durchschnitt (Sommer 1995). Die empfindlichsten Körperstellen für die Wahrnehmung taktiler Reize sind die Zunge, die Lippen und die Finger (Jones & Sarter 2008). Eine Visualisierung der ungleichmäßigen Rezeptorverteilung mittels Verzerrung der menschlichen Körperproportionen ist in Abbildung 2.19 dargestellt.

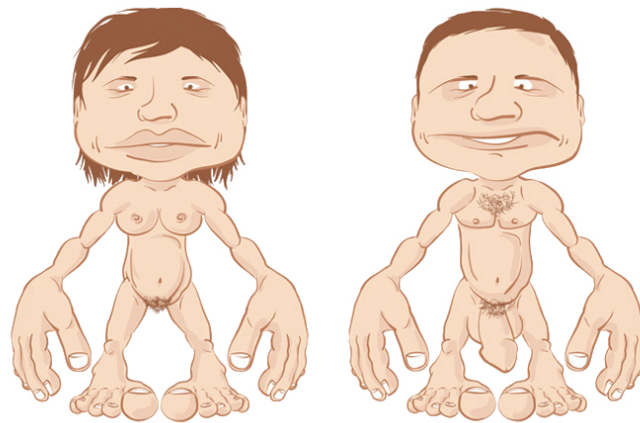


Abbildung 2.19: Visualisierung der Proportionen entsprechend der Dichte der Hautrezeptoren (Scratchtape 2008)

Ein Maß für die Rezeptorendichte der Haut ist die simultane Raumschwelle (Müller-Limmroth 1993), auch als Zweipunktschwelle oder Zwei-Punkt-Diskrimination bezeichnet. Sie wurde von Weber (1834) als geringste Distanz, bei der die räumliche Unterscheidung von zwei gleichzeitig wirkenden taktilen Reizen möglich ist, definiert. Die Zweipunktschwelle beträgt an den Fingerkuppen zwei Millimeter (Sommer 1995). Kunsch & Kunsch (2007) geben detailliertere Angaben zur simultanen Raumschwelle der Hände: Fingerspitzen 2,3 Millimeter; Daumen 9,0 Millimeter; Handinnenfläche 11,3 Millimeter und Handrücken 31,6 Millimeter. Die Reizschwelle für die taktile Wahrnehmung von Druck liegt bei 0,31 Milligramm pro Quadratmillimeter (Kunsch & Kunsch 2007). Wirken die taktilen Reize zeitlich versetzt, spricht man hingegen von der sukzessiven Raumschwelle (Müller-Limmroth 1993).

Die Hautrezeptoren unterscheiden sich in der Antwort auf einen mechanischen Reiz, so dass sie als Intensitäts-, Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsdetektoren bezeichnet werden können (Sommer 1995). Die Beschleunigungsdetektoren adaptieren sehr stark und geben auf jeden Reiz einen einzelnen Impuls ab, wobei bis zu einer Reizfrequenz von 400 Hertz passende Antwortimpulse abgegeben werden und man damit laut Kunsch & Kunsch (2007) auch von Vibrationsdetektoren sprechen kann. Die taktile Wahrnehmung des Menschen erfasst Frequenzen bis  $f_{\text{tak}} \leq 1000 \text{ Hz}$ ,



wobei die Wahrnehmung im Frequenzbereich von  $200 \text{ Hz} < f_{opt} < 300 \text{ Hz}$  am empfindlichsten ist, so dass bereits sehr kleine Amplituden für eine Wahrnehmung des Reizes ausreichen (Shimoga 1992). Bei der subjektiven Empfindung taktiler Reize verhalten sich wahrgenommene Intensität und Annehmlichkeit antiproportional zueinander wohingegen die bevorzugte Amplitude alters- und geschlechtsabhängig ist (Stein et al. 2016). Die kinästhetische Wahrnehmung ist im Frequenzbereich  $10 \text{ Hz} < f_{kin} < 30 \text{ Hz}$  möglich, wobei ebenso wie bei der taktilen Wahrnehmung die Impedanz des Benutzers an der Berührungsstelle die wahrgenommene Bandbreite beeinflussen kann (DIN EN ISO 9241-910).

### 2.5.2 Kognition

Kognitive Prozesse beeinflussen die Verarbeitung von Informationen – komplexe Entscheidungen benötigen mehr Zeit als Einfache (Helander 2006). Ein Maß zur Erfassung des kognitiven Aufwandes bei der Interaktion mit einer konkreten Benutzungsschnittstelle ist die Reaktionszeit (Helander 2006). Hick (1952) hat festgestellt, dass die Dauer, die benötigt wird um eine Entscheidung zu treffen, eine Funktion der Anzahl aller möglichen Optionen ist. Diese Reaktionszeit ist also von der Komplexität der Entscheidungsaufgabe abhängig (Helander 2006). Der Zusammenhang ist für einen einfachen Fall mit gleichwertigen Wahlmöglichkeiten in Gleichung 2.3 zu sehen (Proctor & Vu 2012). Die Größe  $RT$  entspricht der Reaktionszeit (engl. Reaction Time) und die Variable  $N$  beinhaltet die Anzahl der Wahlmöglichkeiten (Helander 2006). Die enthaltenen Konstanten stehen für die Bewegungszeit ( $a$ ) und die Informationsverarbeitungszeit ( $b$ ) und sind abhängig von Umgebung und Benutzer.

$$RT = a + b \cdot \log_2 N \quad (2.3)$$

Die Interaktion eines Menschen mit einem technischen System basiert auf wiederkehrenden Routinen, ist zustandsabhängig, und der nutzerseitige Umfang an Vorbereitung und Planung der Interaktion ist begrenzt (Stanton & Baber 2006). Diese Begrenzung resultiert neben der zur Verfügung stehenden Vorbereitungs- und Planungszeit aus den kognitiven Eigenschaften des Benutzers. Im bereits genannten Modell der Informationsverarbeitung (vgl. Abbildung 2.11 auf S. 26) sind mit Aufmerksamkeit, Gedächtnis und Entscheidungsprozessen kognitive Bestandteile enthalten, die bei der Gestaltung von touchscreenbasierten Benutzungsschnittstellen zu berücksichtigen sind.

Die Aufmerksamkeit ist ein kognitiver Prozess, der aus der Wahrnehmung von Informationen eine aktive Leistung macht, indem er verfügbare mentale Ressourcen auf ein bestimmtes Ereignis fokussiert. In diesem Fall spricht man von der fokussierten Aufmerksamkeit (Wickens & Carswell 2006). Im Gegensatz dazu ermöglicht die selektive

Aufmerksamkeit das Unterdrücken von Informationen durch eine Filterung bei der Wahrnehmung (Wickens & Carswell 2006). Ein Ergebnis der fokussierten Aufmerksamkeit wird von Campenhausen (1993) auch als „Cocktailpartyeffekt“ bezeichnet. Durch diesen Effekt ist man zum Beispiel in einem Raum mit vielen Menschen und lauten Hintergrundgeräuschen in der Lage, durch eine gezielte Fokussierung der Aufmerksamkeit entweder der eigenen Unterhaltung oder einem benachbarten Gespräch zu folgen (Campenhausen 1993, Schlick et al. 2010).

Die Wahrnehmung kann anhand der kognitiven Prozesse zur Informationsverarbeitung in zwei Varianten unterschieden werden. Die Wahrnehmung auf Basis aufgenommener und verarbeiteter Umweltreize (bottom-up) (Goldstein 2010a) und die Wahrnehmung unter Beeinflussung von Vorwissen und Erfahrungen, die aus dem Gedächtnis abgerufen wird. Diese kognitive Form der Wahrnehmung wird als top-down bezeichnet (Goldstein 2010a).

### **Bottom-up**

Die Verarbeitung der Informationen aus den taktilen und kinästhetischen Rezeptoren erfolgt im zerebralen Kortex, der in funktionale Gehirnbereiche unterteilt ist (Kern 2009). Der primäre Motorkortex ist der Ort zur Verarbeitung der Daten zur taktilen Empfindung (Kern 2009). Visualisiert man die Bereiche auf dem Motorkortex wie in Abbildung 2.20 auf S. 37 dargestellt, zeigt sich, dass große Bereiche zur Verarbeitung der Informationen der Finger und Hände zuständig sind (Kern 2009). Diese verzerrte Darstellung der menschlichen Körperteile, auch als Homunkulus bezeichnet, entsteht durch die Abbildung der mit den Kortexbereichen verbundenen Körperregionen und geht ebenso wie Abbildung 2.19 auf Penfield & Rasmussen (1950) zurück. Durch kurzzeitiges Training ist die Steigerung der Leistungsfähigkeit der haptischen Wahrnehmung (s. Unterabschnitt 2.5.1) möglich, da das Training die zentrale Verarbeitung durch Ausweitung der Hirnareale auf benachbarte Neurone im Homunkulus verbessert (Schönhammer 2009).

Die vom Sehnerv stammenden Informationen werden im visuellen Kortex verarbeitet. Die neuronalen Verknüpfungen ermöglichen die visuelle Informationsverarbeitung nach den Prinzipien Konvergenz, Erregung und Hemmung (Goldstein 2010b). Das Erkennen komplexer Objekte beginnt in der frühen Phase der kortikalen Verarbeitung (Goldstein 2010a). Jedes visuell erfasste Merkmal eines visuell erfassten Objektes kann sogenannte Merkmalsdetektoren in der Hirnrinde aktivieren (Goldstein 2010a). Diese Detektoren reagieren auf bestimmte Orientierungen visueller Merkmale und ermöglichen die Erkennung einzelner elementarer Geometrien (Goldstein 2010a). Aus diesen Geometrien sind gemäß der „Recognition-by-Components“-Theorie (RBC) nach Biederman (1987) alle visuell wahrgenommenen Objekte zusammengesetzt.

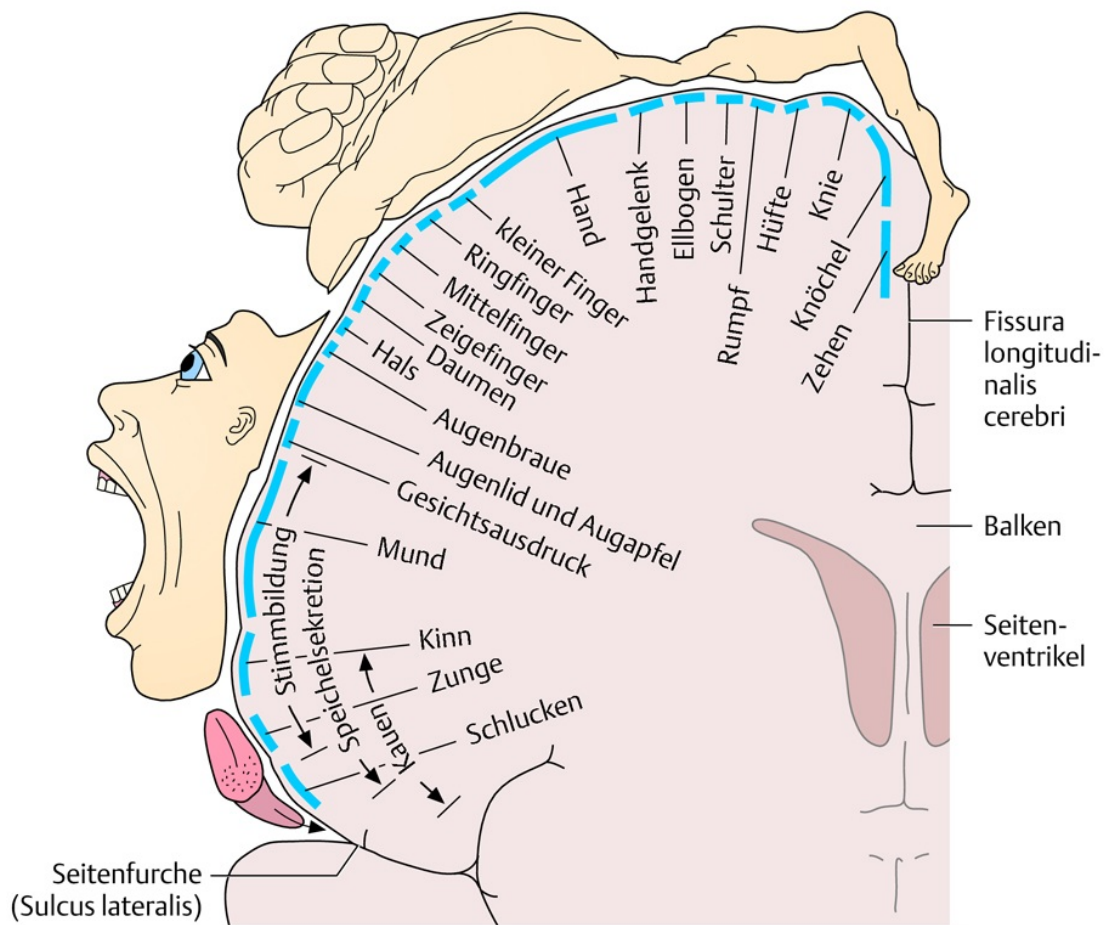


Abbildung 2.20: Visualisierung der Funktionen des motorischen Kortex (Faller & Schünke 2008)

Die kognitive Verarbeitung von Reizen aus Schallwellen erfolgt im auditiven Kortex (Carlson 2005, Goldstein 2010b). Während bei der visuellen Wahrnehmung unterschiedliche Wellenlängen zu einer einzigen Farbwahrnehmung synthetisch gemischt werden, erfolgt die auditive Wahrnehmung analytisch (Carlson 2005). Werden zwei unterschiedliche Schallwellen empfangen, entsteht kein Zwischenton, sondern beide Töne werden getrennt wahrgenommen (Carlson 2005). Die Frequenzanalyse findet im ventralen Bereich des auditiven Kortex statt (Carlson 2005). Aus Laufzeitunterschieden werden im dorsalen Bereich des auditiven Kortex Richtung und Entfernung der Schallquelle ermittelt (Carlson 2005). Die wahrgenommenen auditiven Informationen werden anschließend mit bekannten Sinneseindrücken verglichen (Goldstein 2010b) oder im Sprachzentrum weiterverarbeitet (Carlson 2005). Die Verarbeitung auditiver Reize ermöglicht die Unterscheidung von drei bis fünf ruhenden Schallquellen gleichzeitig (Dahm 2006).

## Top-down

Dahm (2006) vergleicht das Kurzzeitgedächtnis des Menschen, von Wickens et al. (2013) Arbeitsgedächtnis genannt (vgl. Abbildung 2.11 auf S. 26), mit dem flüchtigen Arbeitsspeicher eines Computers. Als Kapazitätsgrenze haben sich seit Miller (1956)  $7 \pm 2$  Chunks etabliert. Der Begriff Chunk umfasst eine Informationseinheit, von denen der Mensch im Schnitt fünf bis neun gleichzeitig wahrnehmen kann (Miller 1956, Dahm 2006). Die Dauer für die Fixierung eines Chunk im Langzeitgedächtnis wird mit fünf bis zehn Sekunden beziffert (Simon 1974). Das Ablegen von Informationen im Langzeitgedächtnis wird als Lernen bezeichnet (Dahm 2006). Die in Form von Erinnerungen, Wissen oder Erfahrung abgelegten Informationen sind die Grundlage für Entscheidungsprozesse und damit das menschliche Verhalten.

Nach Rasmussen (1983) kann menschliches Verhalten nach seinem Automatisierungsgrad in die drei Ebenen wissensbasiert, regelbasiert und fertigkeitsbasiert eingeteilt werden (Abbildung 2.21). Fertigkeitsbasiertes Verhalten wird durch das Unterbewusstsein gesteuert und kann durch mehrfache Übungen antrainiert werden (Rasmussen 1983). Das Unterbewusstsein handelt dabei nach sogenannten sensumotorischen Mustern, wobei Empfindungen des Menschen ohne bewusste Kontrolle nach einem Muster ausgeführt werden (Rasmussen 1983). Verfügt der Mensch für bestimmte Kombinationen sensorischer Informationen nicht über sensumotorische Muster, wird beim regelbasierten Verhalten die Information als sogenanntes Zeichen gedeutet und das entsprechende Verhaltensmuster aus einer Reihe bereits bekannter Verhaltensmuster angewendet (Rasmussen 1983). Ist kein passendes Verhaltensmuster vorhanden, werden die sensorischen Informationen als sogenanntes Symbol interpretiert, die im Unterschied zum Zeichen der regelbasierten Verhaltensebene sämtliche funktionalen Zusammenhänge enthalten, um auf Basis vorhandenen Wissens das entsprechende Verhalten abzuleiten (Rasmussen 1983).

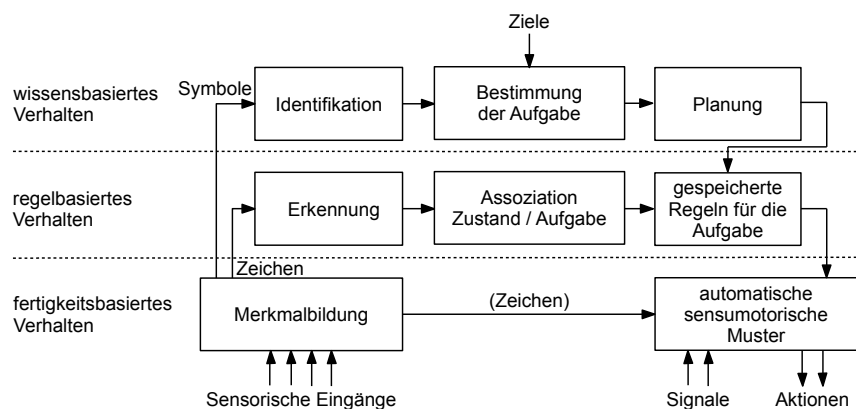


Abbildung 2.21: Schematische Darstellung der drei Leistungsstufen menschlichen Verhaltens nach Rasmussen (1983, S. 259)

Für eine intuitive Interaktion ist die schnelle und unbewusste Anwendung vorhandenen Wissens eine wichtige Voraussetzung (Blackler & Hurtienne 2007). Die beiden von Blackler & Hurtienne (2007) verglichenen Modelle der intuitiven Interaktion enthalten verschiedene Formen von Wissen, die eine schrittweise Zunahme des kognitiven Schwierigkeitsgrads aufweisen. Den kleinsten kognitiven Schwierigkeitsgrad weist die Interaktion bei Systemen mit einem hohen Aufforderungscharakter auf (Blackler & Hurtienne 2007). Gegenstände und Systeme mit einem hohen Aufforderungscharakter bieten dem Benutzer die Form der intendierten Verwendung oder Interaktion an (Dahm 2006). Der Aufforderungscharakter (engl. *Affordance*) wurde als Begriff von Gibson (1977) eingeführt und beschreibt ursprünglich die Offensichtlichkeit der Benutzungsmöglichkeiten eines Gegenstandes. Heute werden auch Interaktionsmöglichkeiten von Systemen nach ihrem Aufforderungscharakter beurteilt. Auf der zweiten Schwierigkeitsstufe kommt Wissen zum Einsatz, das im Laufe der eigenen Entwicklung aufgenommen wurde und seinen Ursprung im jeweiligen kulturellen und sozialen Umfeld hat (Blackler & Hurtienne 2007). Einen Schritt schwieriger ist die Interaktion auf Basis anwendungsspezifischen Wissens, das im gleichen oder einem anderen Anwendungsgebiet erlernt wurde (Blackler & Hurtienne 2007). Die Kenntnis der Auswirkung unterschiedlicher Verschlusszeiten bei analoger und digitaler Fotografie sind ein Beispiel für anwendungsbasiertes Wissen vom gleichen Gebiet während das Power-Symbol beim Gerät einer neuen Geräteklasse ein Beispiel für anwendungsbasiertes Wissen von einem anderen Gebiet ist. Die kognitiv anspruchsvollste Interaktion basiert auf Metaphern (Blackler & Hurtienne 2007). Das Wort Metapher stammt vom griechischen „*meta pherein*“ ab, was sich mit „anderswo hintragen“ übersetzen lässt (Dahm 2006). Der Begriff wurde von den Linguisten Lakoff & Johnson (1980) etabliert, als sie entdeckten, dass der Mensch bei Sprache in Metaphern denkt. Dieses Denkkonzept konnte in der Folge neben der Sprachverarbeitung für weitere Kognitionsprozesse bestätigt werden (Lakoff & Johnson 1981), wobei neben dem Begriff Metapher auch Bezeichnungen wie Analogien und Vermischung von Konzepten (engl. *Conceptual Blending*, nach Fauconnier & Turner 2002) verwendet werden. Die Interaktion mittels Metaphern beruht auf Wissen aus einer bekannten Situation, das auf eine neue Situation übertragen und angewendet wird (Blackler & Hurtienne 2007). Ein Beispiel hierfür ist die Schreibtischmetapher grafischer Benutzungsschnittstellen gängiger Betriebssysteme (Blackler & Hurtienne 2007).

Das für die intuitive Interaktion notwendige Wissen kann in Form von Schematas und mentalen Modellen vorliegen. Als Schema wird die einfache Zuordnung einer Bedeutung zu Rezeptorinformationen auf Basis vorhandenen Wissens bezeichnet (Goldstein 2010a). Der Begriff mentales Modell geht auf Craik (1943) zurück und beschreibt ein theoretisches Konstrukt über das individuelle Verständnis eines konkreten Benutzers zur Funktion eines Prozesses oder Systems (Allen 1997, Wilson 2006).

Je nach Inhalt kann zwischen mentalen Modellen des Benutzer, der Organisation, der Aufgabe und der Computeranwendung unterschieden werden (Dutke 1994). Laut Wilson (2006) werden mentale Modelle wie folgt charakterisiert:

- geistige Vorstellungen von Objekten, Aktionen, Situationen oder Personen;
- aufbauend auf Erfahrung und Beobachtung der Umwelt und dem eigenen Interesse;
- Simulationen, die im Verstand ausgeführt werden, um qualitative Schlussfolgerungen zu generieren;
- Unterstützung zum Verständnis eines Systems;
- Grundlage für die Beschreibung, Erklärung und Vorhersage des Systemverhaltens;
- Darstellung der Topografie, Struktur, Funktion und Benutzung eines Systems;
- enthalten Informationen zu räumlichen, kausalen und zufälligen Zusammenhängen;
- können Schematas enthalten;
- werden jedes Mal, wenn sie erforderlich sind, vom vorhandenen Wissen abgeleitet und variieren daher über die Zeit;
- sind sparsam, da sie jeweils nur die für einen bestimmten Anwendungsfall notwendigen Informationen beinhalten und
- sind unvollständig, instabil, mehr- und nicht eindeutig.

### 2.5.3 Biomechanik

Die Biomechanik ist eine interdisziplinäre Wissenschaft zur Analyse, Beschreibung und Beurteilung menschlicher Bewegung (Winter 2009). Die für die Bewegungen bei der Touchscreeninteraktion relevante Biomechanik umfasst den Aufbau der funktionalen Strukturen (Anatomie des Hand-Arm-Systems), die biochemischen und biophysikalischen Vorgänge zur Krafterzeugung (Muskelphysiologie), die Wirkung dieser Kräfte (Statik und Kinetik), den zeitlichen und räumlichen Verlauf der Bewegungen (Kinematik) sowie die Maße des menschlichen Körpers (Anthropometrie).

#### **Funktionelle Anatomie des Hand-Arm-Systems**

Anatomisch verteilen sich motorische Aufgaben beim Menschen zwischen Skelett (passiver Bewegungsapparat) und Muskulatur (aktiver Bewegungsapparat, Marées

2003). Bei der Touchscreeninteraktion ist der gesamte Körper in seiner Stütz- und Haltungsfunktion involviert. Die Ausführung einer Touchscreeneingabe mit einem Finger (vgl. Abschnitt 2.4) erfolgt über Bewegungen des Hand-Arm-Systems.

Nach Lippert et al. (2010) kann das menschliche Hand-Arm-System aufgrund der Anatomie in vier Abschnitte gegliedert werden. Beim ersten Abschnitt handelt es sich um den Schultergürtel, der teilweise auch zum Rumpf gezählt wird. Nummer zwei ist der Oberarm, der durch das Schultergelenk vom Schultergürtel getrennt wird. Durch das Ellbogengelenk werden Oberarm sowie der dritte Abschnitt, der Unterarm, unterteilt. Als vierter und letzter Abschnitt ist die Hand zu nennen, die direkt an das obere Handgelenk anschließt und ihrerseits noch einmal in Finger, Mittelhand und Handwurzel strukturiert werden kann (Lippert et al. 2010).

Die Skelettmuskulatur wird laut Badtke et al. (1999) nach ihrem Aussehen unter dem Mikroskop auch quergestreifte Muskulatur genannt (Abbildung 2.22). Der Muskelanteil der gesamten Körpermasse beträgt bei Männern etwa 40 bis 50 Prozent und etwa 25 bis 30 Prozent bei Frauen (Rohmert & Rutenfranz 1983). Die Hauptaufgabe der Muskulatur ist die Kraftentwicklung (Rohmert & Rutenfranz 1983).

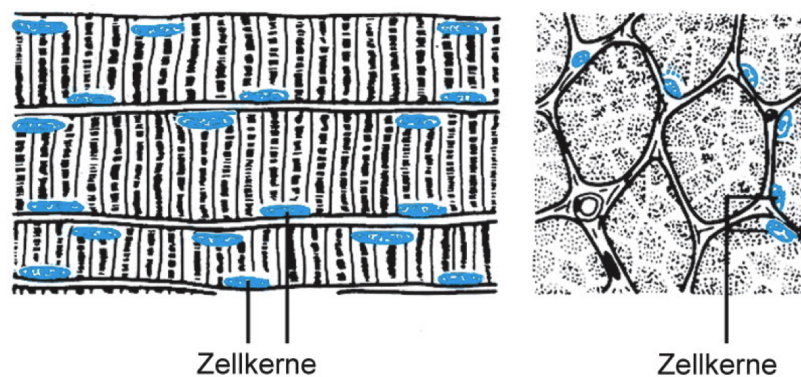


Abbildung 2.22: Schematische Darstellung quergestreifter Skelettmuskeln (Marées 2003, S. 25)

### Muskelphysiologie

Die Kontraktion einzelner Muskeln und Muskelgruppen der Skelettmuskulatur wird vom zentralen Nervensystem durch Signale über die somatischen Efferenzen ausgelöst, gesteuert und aufeinander abgestimmt (Marées 2003). Bei einer somatischen Efferenz handelt es sich um ein Motorneuron, das zusammen mit den versorgten Muskelfasern eine motorische Einheit bildet (Marées 2003). Der schematische Aufbau einer motorischen Einheit ist in Abbildung 2.23 dargestellt. Die Muskelfasern, die von einer einzelnen Nervenfaser innerviert werden, treten auch gemeinsam in Aktion (Marées 2003).

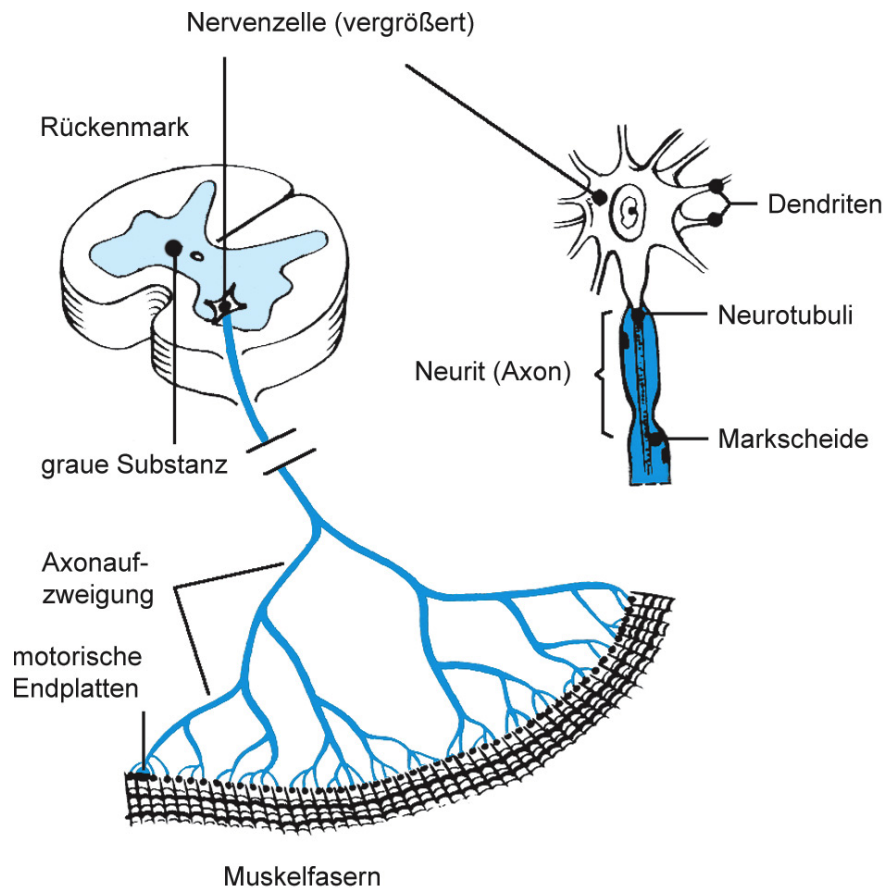


Abbildung 2.23: Schematischer Aufbau einer motorischen Einheit (Marées 2003, S. 50)

Für die elektrischen Prozesse in den Muskelzellen sind positiv geladene Ionen wie Kalium und Natrium sowie andere negativ geladene Anionen verantwortlich. Im intrazellulären Raum überwiegen negativ geladenen Ionen gegenüber dem extrazellulären Raum. Dieses Ionenungleichgewicht sorgt dafür, dass eine Potenzialdifferenz zwischen dem Inneren der Zelle und der Zellenumgebung zustande kommt. In Ruhe beträgt die Potenzialdifferenz – auch Ruhepotenzial genannt – zwischen dem Inneren der ruhenden Zellen und deren Zelloberfläche ca.  $-80\text{ mV}$  bis  $-90\text{ mV}$  (Marées 2003). Wird über die somatischen Efferenz eine Erregung an die Muskelfasern geleitet, modifizieren die Muskelzellenmembranen kurzfristig ihre Diffusionseigenschaften und damit die Permeabilität für bestimmte Ionen. Damit nimmt die im Ruhepotenzial vorhandene geringe Permeabilität der Muskelzellenmembran für Natriumionen schlagartig zu, wodurch kurzzeitig große Mengen an Natriumionen entlang des Konzentrationsgefälles in die Zelle eindringen und Kaliumionen heraus wandern (Badtke et al. 1999). Bei diesem Vorgang, der als Depolarisation bezeichnet wird,



wechselt der Zustand von der Ruhe zur Erregung. Die Depolarisation erfolgt, wenn das Membranpotenzial von -80 mV auf einen kritischen Schwellenwert von -60 mV gebracht wird. Das Zelleninnere wird hierdurch um 30 bis 40 mV positiv gegenüber dem extrazellulären Raum geladen (Marées 2003). Der zeitliche Verlauf des Membranpotenzials während der Erregung wird als Aktionspotenzial bezeichnet (Marées 2003). Nach der Depolarisation beginnt die Zelle bei der sogenannten Repolarisation damit, das Ruhepotenzial wieder herzustellen (Badtke et al. 1999, Marées 2003).

### **Statik und Kinetik**

Wird die Wirkung der Muskelkräfte betrachtet, kann man zwischen statischen und dynamischen Auswirkungen unterscheiden. Bei einer statischen Betrachtung stehen die wirkenden Kräfte im Gleichgewicht, so dass es zu keiner Bewegung kommt (Roth & Willimczik 1999). Die beteiligten Muskeln kontrahieren dabei isometrisch – der Spannungszustand wird erhöht, ohne dass es zu einer Längenänderung kommt (Schmidt & Lang 2007). Isometrische Muskelkontraktionen sind die Grundlage der Haltungsarbeit, die vom menschlichen Körper verrichtet wird, um die Einflüsse der Gravitationskraft auf die eigenen Körperteile zu neutralisieren und eine gewünschte Körperstellung einzuhalten (Schmidtke 1989). Zusätzlich zur Haltungsarbeit kann der menschliche Körper mittels isometrischer Muskelkontraktion ein Gleichgewicht zu äußeren wirkenden Kräften herstellen, wodurch er statische Haltearbeit verrichtet (Schmidtke 1989).

Dynamischen Auswirkungen der Muskelkräfte sind Ortsveränderungen und Rotationen sowie die Veränderung dieser Bewegungen. Die Betrachtung der daran beteiligten Kräfte wird als Kinetik bezeichnet (Roth & Willimczik 1999). Nach Sutter et al. (1989) beträgt die maximale Kraft, die ein Mensch mit dem gestreckten Zeige- oder Mittelfinger aufbringen werden kann  $F_{max} = 50 \text{ N}$ .

### **Kinematik**

Die Kinematik umfasst die räumliche und zeitliche Beschreibung der menschlichen Bewegungen in Form von Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen unabhängig von den verursachenden Kräften (Winter 2009). Die Touchscreeninteraktion erfolgt hauptsächlich durch Rotationen der einzelnen Segmente des Hand-Arm-Systems.

### **Anthropometrie**

Bei der Interaktion eines Menschen mit einem Touchscreen sind die kinetisch notwendigen Kräfte von der Länge der Hebelarme der Körpersegmente des jeweiligen menschlichen Körpers abhängig. Die wissenschaftliche Lehre von den Maßen, Maßverhältnissen und der Messung des menschlichen Körpers wird als Anthropometrie

bezeichnet (Schlick et al. 2010). Der Begriff Anthropometrie stammt aus dem Griechischen und setzt sich aus den Wörtern „anthropos“ (Mensch) und „metron“ (messen) zusammen (DIN EN ISO 15535). Neben den bereits erwähnten Begrenzungsmaßen des menschlichen Körpers, zu denen die Skelett- und Umrisssmaße gehören, sind auch die Funktionsmaße des menschlichen Körpers für die Touchscreeninteraktion relevant. Zu den anthropometrischen Funktionsmaßen zählen Bewegungsbereiche, Reichweiten und Sichtmaße (Gebhardt et al. 2009, Schlick et al. 2010). Für die räumliche Gestaltung eines Mensch-Maschine-Systems stehen Tabellenwerke mit anthropometrischen Daten in Form von Normen (z. B. DIN 33402-2), Schablonen (z. B. Diffrient et al. 1978) Handbüchern (z. B. DOD-HDBK-743A) oder systemspezifischen Design-Guides (z. B. NASA 2010) zur Verfügung. Je nach System werden unterschiedliche Bezugspunkte (z. B. Fuß, Hüfte, Auge) für die räumliche Gestaltung eines interaktiven Systems herangezogen (Helander 2006).

## 2.6 Methodische Grundlagen der Gestaltung interaktiver Systeme

Bei der Gestaltung von interaktiven Benutzungsschnittstellen werden bestimmte Ziele verfolgt, die Lang (2002) zusammengefasst: „Die Benutzungsoberfläche ist so zu gestalten, dass die Interaktion bestmöglich an die sensorischen, aktorischen und kognitiven Fähigkeiten und Grenzen des Menschen angepasst ist. Dabei sind die Randbedingungen der zu lösenden Aufgabe und die vorliegenden Situations- und Umwelteinflüsse zu beachten.“ Im Rahmen der Gestaltung versucht man daher, folgende Qualitäten von Benutzungsschnittstellen gezielt zu optimieren:

**Gebrauchstauglichkeit** Die Gebrauchstauglichkeit beschreibt das Maß, in dem ein Produkt durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext verwendet werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen (DIN EN ISO 9241-11). Der Begriff Gebrauchstauglichkeit (engl. Usability) ist im Rahmen der Normreihe so weit gefasst, dass die Aspekte der User Experience bei der menschenzentrierten Gestaltung ebenfalls umfänglich berücksichtigt werden (DIN EN ISO 9241-210).

**Effektivität:** Die Effektivität ist die Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der der Benutzer ein bestimmtes Ziel erreicht (DIN EN ISO 9241-11).

**Effizienz:** Die Effizienz umfasst den Aufwand, der im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit der Zielerreichung eingesetzt wurde (DIN EN ISO 9241-11).

**Zufriedenstellung:** Unter Zufriedenstellung bezeichnet die DIN EN ISO 9241-11 die Freiheit von Beeinträchtigungen und positive Einstellungen gegenüber der Nutzung des Produkts.

**Zugänglichkeit:** Die Zugänglichkeit ist das Ausmaß, in dem Produkte, Systeme, Dienstleistungen, Umgebungen oder Einrichtungen von Benutzern mit unterschiedlichsten Fähigkeiten und Eigenschaften genutzt werden können, um in einem bestimmten Nutzungskontext bestimmte Ziele zu erreichen (DIN EN ISO 9241-20).

Als ergonomisch kann somit nur ein System bezeichnet werden, das sich an den Bedürfnissen und Fähigkeiten der Benutzer orientiert (Heinecke 2012). Systeme mit Gestaltungsdefiziten in ergonomischer Hinsicht können die Menschen, die damit arbeiten, unnötig belasten oder gar gesundheitliche Schäden hervorrufen (Heinecke 2012).

### 2.6.1 Menschzentrierter Gestaltungsansatz

Bei der Gestaltung von Benutzerschnittstellen wird das Ziel verfolgt, den Benutzer bei der Erfüllung seiner Aufgaben im jeweils vorherrschenden Kontext zu unterstützen (Mannonen & Nieminen 2007). Um dies zu erreichen, empfiehlt die DIN EN ISO 9241-210 einen mehrstufigen iterativen Prozess unter Einbeziehung der Benutzer und Experten mehrerer Fachdisziplinen, der als menschzentrierter Gestaltungsprozess bezeichnet wird (Abbildung 2.24).

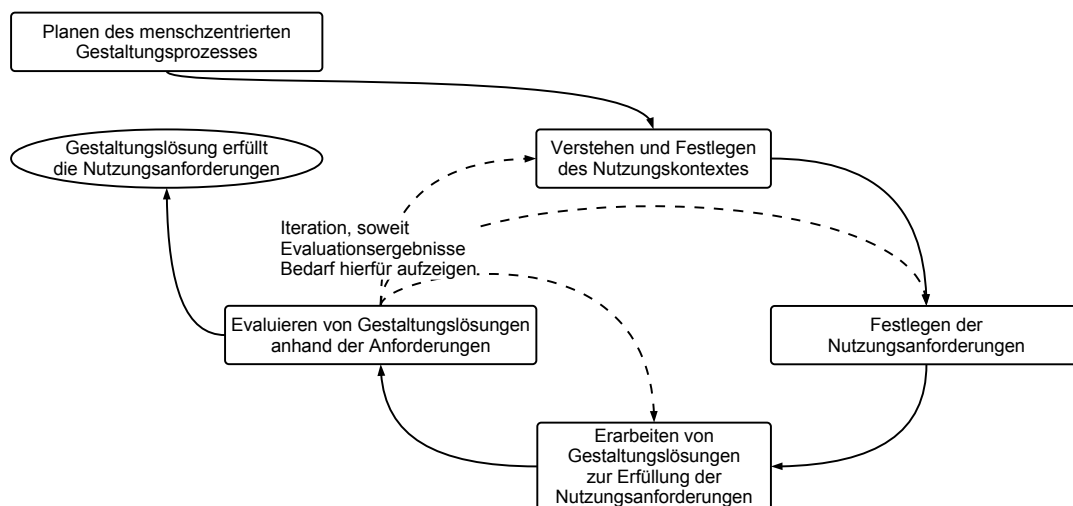


Abbildung 2.24: Menschzentrierter Gestaltungsprozess (DIN EN ISO 9241-210, S. 15)

Die Anwendung des Prozesses beginnt mit dem Projektstart und wird bis zur Markteinführung des interaktiven Mensch-Maschine-Systems mehrfach wiederholt (Schlick et al. 2010). Dabei werden die erarbeiteten Gestaltungslösungen aufgrund der Evaluierungsergebnisse und der Rückmeldungen von Benutzern stetig verbessert. Der menschenzentrierte Gestaltungsprozess gliedert sich nach DIN EN ISO 9241-210 in vier Phasen:

1. Nutzungskontext spezifizieren
2. Benutzeranforderungen festlegen
3. Gestaltungslösungen entwerfen
4. Gestaltungslösungen evaluieren

Dieser Prozess verfolgt durch die beschriebene Herangehensweise für die Gestaltung und Entwicklung von interaktiven Systemen das Ziel, die Systeme durch die Konzentration auf dessen Verwendung sowie die Anwendung von Kenntnissen und Techniken aus den Bereichen der Arbeitswissenschaft und Ergonomie gebrauchstauglicher zu machen (DIN EN ISO 9241-210). Die methodische Anwendung des Ansatzes verspricht „erhebliche ökonomische und soziale Vorteile für Benutzer, Arbeitgeber und Anbieter“, da die daraus resultierenden Produkte durch die hohe Gebrauchstauglichkeit kommerziell tendenziell erfolgreicher sind (DIN EN ISO 9241-210, S. 8). Ebenso können durch das menschenzentrierte Vorgehen Gefahren für die Sicherheit und Gesundheit der Benutzer vermieden werden.

### 2.6.2 Spezifikation des Nutzungskontextes und Festlegen der Benutzeranforderungen

Der Einstieg in den Kreislauf des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses erfolgt über das Verständnis des Nutzungskontextes (Abbildung 2.24, DIN EN ISO 9241-210). Dieses Verständnis ist notwendig, um die Gestaltungslücke zwischen technischen Möglichkeiten und Rahmenbedingungen der Gestaltungsaufgabe durch methodische Entscheidungen zu schließen (Oberquelle 2008).

Die Fachliteratur enthält unterschiedliche Definitionen, Inhaltsangaben und Modelle für den Nutzungskontext; die folgenden identischen Grundelemente lassen sich dennoch identifizieren: Benutzer, Benutzeraufgaben und Umgebungsbedingungen (Thomas & Bevan 1996, Pohl 2007, Oberquelle 2008). Die Benutzer lassen sich in Benutzergruppen (DIN EN ISO 9241-210, DIN ISO 20282-1), Fähigkeiten und Einschränkungen (Oberquelle 2008), Ausbildung, Vorkenntnisse, Alter und Geschlecht (Heinecke 2012) sowie die Zusammenarbeit mehrerer Benutzer (Joop & Ziegler 2010) konkretisieren. Das Element Benutzeraufgaben kann weiter in die Betrachtung

von Dauer und Häufigkeit (Heinecke 2012), Teilaufgaben (DIN EN ISO 9241-210, DIN ISO 20282-1), Interaktions- und Mediengestaltung (DIN EN ISO 14915-1) sowie das Aufzeigen von Verflechtungen (Herczeg 2009) unterschieden werden. Die Umgebungsbedingungen lassen sich in technische (DIN EN ISO 9241-210, Oberquelle 2008), soziale, kulturelle und organisatorische (DIN EN ISO 9241-210, DIN ISO 20282-1) sowie physikalische Umgebungsbedingungen (DIN EN ISO 9241-210, DIN EN ISO 9241-11) untergliedern.

Zur Ermittlung des Nutzungskontextes finden sich keine Hinweise auf ein geeignetes methodisches Vorgehen in den normativen Grundlagen. In der Fachliteratur sind unter anderem folgende Möglichkeiten zu finden: Aufgabenanalyse (Preece et al. 1994, Courage et al. 2008), Personas und Szenarios (Cooper et al. 2007, Mayhew 2008), Contextual Design (Holtzblatt et al. 2004) oder Usability Context Analysis (Thomas & Bevan 1996). Mit Hilfe dieser Methoden kann der Nutzungskontext eines interaktiven Systems ermittelt und die daraus resultierenden Benutzeranforderungen abgeleitet werden. Die Verankerung der einzelnen Bestandteile des Nutzungskontextes in den genannten Methoden ist in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Tabelle 2.2: Bestandteile des Nutzungskontextes und Verankerung in verschiedenen Erhebungsmethoden

	Aufgaben- analyse	Personas & Szenarios	Contextual Design	Usability Context Analysis
✓ enthaltenes Element				
○ optionales Element				
– nicht enthaltenes Element				
<b>Benutzer</b>				
Benutzergruppen unterscheiden	–	✓	✓	✓
Fähigkeiten und Einschränkungen	✓	✓	–	✓
Zusammenarbeit von Benutzern	–	✓	✓	–
<b>Aufgaben</b>				
Betrachtung von Teilaufgaben	✓	○	✓	✓
Interaktions- und Mediengestaltung	–	–	–	–
Aufzeigen von Verflechtungen	✓	○	✓	✓
<b>Umgebung</b>				
technische Umgebung	○	✓	✓	✓
soziale, kulturelle od. organisatorische Umgebung	–	✓	✓	✓
physikalische Umgebung	○	✓	✓	✓

Die theoretischen Grundlagen zu Inhalt und Ermittlung des Nutzungskontextes sowie der Festlegung von Benutzeranforderungen wurden in Auszügen bereits in Domhardt & Schmidt (2012b) veröffentlicht.

### 2.6.3 Allgemeine Gestaltungsempfehlungen

Bei der Gestaltung interaktiver Systeme kann man auf eine Reihe von allgemeinen Gestaltungsempfehlungen zurückgreifen. Eine grundlegende Empfehlung bei der Gestaltung ist die Nutzung des Aufforderungscharakters (engl. Affordance) nach Gibson (1977), so dass allein durch die Formsprache eines interaktiven Elements erkennbar ist, wie es benutzt werden kann (vgl. Unterabschnitt 2.5.2). Allgemein anerkannt und angewendet werden Grundsätze der Informationsdarstellung, Grundsätze der Dialoggestaltung und Gestaltprinzipien. Mit den Grundsätzen der Informationsdarstellung wird das Ziel verfolgt, dem Benutzer die Wahrnehmung visueller Informationen zu erleichtern, so dass dieser seine Aufgaben effektiv, effizient und zufriedenstellend erledigen kann (DIN EN ISO 9241-12). Die DIN EN ISO 9241-12 führt folgende sieben Grundsätze der Informationsdarstellung auf:

**Klarheit:** Die Vermittlung des Informationsgehalts erfolgt schnell und genau.

**Unterscheidbarkeit:** Die Unterscheidung der angezeigten Information ist gewährleistet.

**Kompaktheit:** Die Darstellung beschränkt sich auf die Informationen, die für die Aufgabe des Benutzers relevant sind.

**Konsistenz:** Die Informationsdarstellung von Informationen mit gleichem Inhalt bzw. gleicher Bedeutung erfolgt innerhalb einer Anwendung entsprechend den Erwartungen des Benutzers stets auf die gleiche Art und Weise.

**Erkennbarkeit:** Die Aufmerksamkeit des Benutzers wird auf die benötigte Information gelenkt.

**Lesbarkeit:** Die Informationen sind leicht zu lesen.

**Verständlichkeit:** Die Bedeutung der Informationen ist leicht verständlich sowie eindeutig, vermittelbar und erkennbar.

Zusätzlich zu den aufgeführten Grundsätzen der Informationsdarstellung weist die DIN EN ISO 9241-12 darauf hin, dass zum Erreichen der Zielstellung der Nutzungskontext des interaktiven Systems berücksichtigt werden muss und Erkenntnisse aus den Bereichen Physiologie, Psychologie, Typografie, graphische Gestaltung und Ergonomie berücksichtigt werden sollen.

Als Dialog wird eine Interaktion zwischen Benutzer und System verstanden, bei dem eine Folge von Benutzereingaben die Ausgaben des Systems beeinflussen, um ein Ziel zu erreichen (DIN EN ISO 9241-110). Die Eingaben beinhalten nicht nur Dateneingaben sondern auch navigierende Handlungen (DIN EN ISO 9241-110).

Die folgenden Grundsätze zur Gestaltung von Dialogen lassen sich aus DIN EN ISO 9241-110, Schlick et al. (2010) und Zühlke (2012) zusammentragen:

**Aufgabenangemessenheit:** Ein Dialog ist aufgabenangemessen, wenn er den Benutzer bei der Erledigung seiner Aufgaben unterstützt, ohne ihn mental oder körperlich unnötig zu belasten. Der Ablauf des Dialoges basiert auf den charakteristischen Eigenschaften der Arbeitsaufgabe und wird nicht durch die eingesetzte Technologie bestimmt. Die Informationsbereitstellung und die Ein- und Ausgabeformate sind an die Eigenschaften der Arbeitsaufgabe angepasst. Der Benutzer bekommt vom System lediglich Informationen und Dialogschritte präsentiert, die er zur erfolgreichen Aufgabenausführung benötigt. Aufgabentypische Eingabewerte sind für den Benutzer als Voreinstellung verfügbar.

**Selbstbeschreibungsfähigkeit:** Ein Dialog ist selbstbeschreibungsfähig, wenn für den Benutzer zu jedem Zeitpunkt offensichtlich ist, in welchem Dialog und an welcher Stelle im Dialog er sich befindet. An dieser Stelle sind für den Benutzer alle Handlungsoptionen und Interaktionsmöglichkeiten transparent und unmittelbar verständlich oder werden auf Anfrage des Benutzers erläutert. Die dargestellten Informationen leiten den Benutzer zum erfolgreichen Abschluss der Aufgabe, so dass die Notwendigkeit für den Zugriff auf externe Dokumente minimiert ist. Über Änderungen des Systemzustands wird der Benutzer informiert und bei notwendigen Systemeingaben erhält der Benutzer Informationen zur erwarteten Eingabe, wie Formate oder Einheiten.

**Erwartungskonformität:** Ein Dialog ist erwartungskonform, wenn er abhängig vom Nutzungskontext den Erwartungen und Bedürfnissen des Benutzers sowie allgemein anerkannten Konventionen und Standards entspricht. Dabei sollen Erfahrungen und Kenntnisse des Benutzers aus bisherigen und bekannten Arbeitsabläufen oder Systemen berücksichtigt werden. Dies kann durch die Verwendung von dem Benutzer vertrautem Vokabular und unmittelbaren sowie passenden Rückmeldungen durch das System sichergestellt werden. Informationsausgaben durch das System sind objektiv und konstruktiv gestaltet. Über längere Systemantwortzeiten ist der Benutzer zu informieren, wobei Art und Länge der Rückmeldungen den Benutzerbelangen genügen. Dargestellte Informationen sollten den Erwartungen des Benutzers entsprechend strukturiert und organisiert sein und die Formate den jeweiligen kulturellen und sprachlichen Konventionen entsprechen. Das Dialogverhalten und die Informationsdarstellung sollten innerhalb eines interaktiven Systems konsistent sein. Die Eingabeposition entsprechend der Benutzererwartung sinnvoll vorzugeben.

**Lernförderlichkeit:** Ein lernförderlicher Dialog unterstützt und leitet den Benutzer beim Erlernen der Nutzung eines interaktiven Systems. Dem System zugrundeliegende Konzepte werden dem Benutzer über Rückmeldung und Erläuterungen

zugänglich gemacht, so dass er ein konzeptionelles Verständnis vom interaktiven System bilden kann. Durch geeignete Unterstützung wird der Benutzer mit dem Dialog vertraut gemacht und der Lernaufwand minimiert. Für selten benutzte Dialoge wird eine Unterstützung bereit gestellt, die das erneute Erlernen des Dialogs ermöglicht. Zu jedem Zwischen- und Endergebnis der Eingabe gibt es ausreichende Rückmeldungen, um den Wissens- und Kompetenzerwerb des Benutzers zu fördern. Bei Eingabefehlern sollte eine Korrektur der Eingabe und eine Wiederholung des Dialogschritts möglich sein.

**Steuerbarkeit:** Bei einem steuerbaren Dialog ist der Benutzer in der Lage, den Dialogablauf selbständig zu starten sowie dessen Richtung und Geschwindigkeit bis zum Ziel zu variieren. Die Interaktionsgeschwindigkeit wird nicht vom System bestimmt, sondern ergibt sich aus den Eingaben des Benutzers. Das interaktive System ermöglicht Unterbrechungen bzw. den Abbruch des Dialoges. Nach einer Unterbrechung hat der Benutzer die Möglichkeit, den Dialog am Unterbrechungspunkt wieder aufzunehmen. Die Menge der dargestellten Informationen ist von der Arbeitsaufgabe abhängig aber dennoch vom Benutzer beeinflussbar. Jedes vorhandene Ein- und Ausgabemittel ist vom Benutzer verwendbar. Werden vom Benutzer Daten durch Eingaben verändert, bleiben die Originaldaten weiter verfügbar, wenn dies für die Aufgabe erforderlich ist.

**Fehlertoleranz:** Ein fehlertoleranter Dialog ermöglicht trotz fehlerhafter Eingaben das Erreichen des gewünschten Ergebnisses unter geringem oder ohne Korrekturaufwand des Benutzers. Voraussetzung für die Fehlertoleranz sind die Fehlererkennung und -vermeidung zur Schadensbegrenzung, die Fehlerkorrektur und das Fehlermanagement für den Umgang mit vorhandenen Fehlern. Der Benutzer wird durch das interaktive System unterstützt, Eingabefehler zu entdecken und zu vermeiden. Die Eingaben des Benutzers werden vom System vor der Verarbeitung auf Gültigkeit geprüft. Undefinierte Systemzustände oder Systemabbrüche durch Benutzerhandlungen werden vom System unterbunden. Bei einem Fehler wird dem Benutzer eine Erläuterung zur Verfügung gestellt, welche die Beseitigung des Fehlers erleichtert. Bei Bedarf kann der Benutzer auf weiterführende Informationen zum Fehler und dessen Beseitigung zugreifen. An Dialogpunkten, an denen gehäuft Fehler auftreten, erfolgt eine aktive Unterstützung zur Fehlerbeseitigung. Der Benutzer wird über Fehler, die das System automatisch korrigieren kann, informiert und es wird ihm die Möglichkeit zur Selbstkorrektur gegeben. Die Fehlerkorrektur lässt sich durch den Benutzer zurückstellen oder Fehler können gänzlich unkorrigiert bleiben, wenn eine Korrektur für den Dialog nicht erforderlich ist.

**Individualisierbarkeit:** Die Individualisierbarkeit eines Dialogs ermöglicht dem Benutzer die Anpassung der Interaktion und der Informationsdarstellung an seine



subjektiven Fähigkeiten und Bedürfnisse. Die Anpassung wird dem Benutzer an charakteristischen Punkten für heterogene Benutzerbelange ermöglicht. Der Detaillierungsgrad von unterstützenden Erläuterungen ist an das individuelle Wissen des Benutzers anpassbar. Der Benutzer hat die Möglichkeit zur Verwendung eigenen Vokabulars durch Umbenennen von Objekten und Funktionen. Bei dynamischen Ein- und Ausgaben kann der Benutzer die Geschwindigkeit an seine individuellen Bedürfnisse anpassen. Zudem hat der Benutzer die Wahl zwischen unterschiedlichen Dialogtechniken sowie Niveau und Methoden der Interaktion. Format und Typ von Aus- und Eingabedaten sind vom Benutzer beeinflussbar. Bei Bedarf kann der Benutzer zur Unterstützung seiner individuellen Fähigkeiten und Bedürfnisse Dialogelemente oder Funktionen hinzuzufügen oder neu ordnen. Alle individuellen Anpassungen des Benutzers können rückgängig gemacht werden, um zu den originalen Einstellungen zurückzukehren.

Die Grundsätze der Dialoggestaltung sind softwareunabhängig. Sie dienen als Leitlinien zur Beurteilung und ergonomischen Entwicklung von Dialogen an „Bildschirmgeräten“ (Zühlke 2012). Da die Bedeutung der Grundsätze vom Nutzungskontext des jeweiligen Systems abhängig ist, variiert die Bedeutung der einzelnen Grundsätze (DIN EN ISO 9241-110).

Die Gestaltprinzipien beschreiben, wie sich kleine Elemente bei der visuellen Wahrnehmung durch den Menschen zu einem Ganzen organisieren (Goldstein 2010b). Die Prinzipien beruhen auf Effekten der Gestaltpsychologie, die bereits seit Beginn des 20. Jahrhunderts von einer Gruppe Psychologen um Max Wertheimer erforscht wurden, z. B. durch Koffka (1936). Obwohl die Gestaltprinzipien auf Effekten der Wahrnehmungs- und Kognitionpsychologie basieren, sind sie als allgemein anerkannte Gestaltungsempfehlungen in den verschiedensten Literaturquellen zu finden, zum Teil auch unter abweichenden Bezeichnungen. Sie werden fälschlicherweise gelegentlich als *Gestaltgesetze* bezeichnet; allerdings sind Vorhersagen auf Basis der Gestaltprinzipien zu unpräzise, so dass die Gestaltprinzipien eher als Heuristiken oder Faustregeln zu verstehen sind (Goldstein 2010b). Zudem handelt es sich nicht um eine strikte Formulierung von Zusammenhängen oder Vorschriften zur Gestaltung, sondern die Gestaltprinzipien liefern eine Beschreibung für Tendenzen, die sich bei der Wahrnehmung von Einheiten durch gruppierte Reize beobachten lassen (Schönhammer 2009). In der Gestaltpsychologie ist daher auch die Rede von *Gestaltfaktoren* (Schönhammer 2009). Inhaltlich lassen sich die folgenden Gestaltprinzipien identifizieren:

**Prinzip der Prägnanz:** Dieses Gestaltprinzip wird auch als Prinzip der Einfachheit oder der guten Gestalt bezeichnet und gilt häufig als zentrales Gestaltprinzip. Es besagt, dass komplexe Elemente als Summe einfacher Elemente wahrgenommen

werden (DIN EN ISO 9241-12, Goldstein 2010b, Schlick et al. 2010, Zühlke 2012).

**Prinzip der Ähnlichkeit:** Einander ähnliche Elemente werden als Gruppe wahrgenommen, wobei die Ähnlichkeit durch Form, Farbe, Größe oder Orientierung der Elemente zustande kommen kann (DIN EN ISO 9241-12, DIN EN 894-1, Schönhammer 2009, Goldstein 2010b, Schlick et al. 2010).

**Prinzip der Nähe:** Nahe beieinanderliegende Elemente werden als zusammengehörig wahrgenommen (DIN EN ISO 9241-12, DIN EN 894-1, Schönhammer 2009, Goldstein 2010b, Schlick et al. 2010).

**Prinzip der Geschlossenheit** Bei der Wahrnehmung von Mustern besteht die Tendenz, das Muster so zu ergänzen, dass eine einfache geschlossene Form entsteht. Auf diese Weise werden auch offene oder unvollständige Formen erkannt (Anderson 2009, DIN EN 894-1, Zühlke 2012).

**Prinzip des guten Verlaufs** Elemente, die auf einer geraden oder sanft gebogenen Linie liegen, werden als zusammengehörig wahrgenommen (Schlick et al. 2010). Handelt es sich um Linien, werden diese so wahrgenommen, als folgten sie dem einfachsten Weg (Goldstein 2010b). Dieses Gestaltprinzip wird auch als Prinzip des glatten Verlaufs (Anderson 2009) oder der guten Fortsetzung (DIN EN 894-1, Schlick et al. 2010) bezeichnet.

**Prinzip des gemeinsamen Schicksals:** Elemente, welche ein gemeinsames Merkmal aufweisen, zum Beispiel die Bewegungsrichtung, werden als zusammengehörig wahrgenommen (DIN EN 894-1, Schönhammer 2009, Goldstein 2010b). Das Beispiel des synchronen Aufleuchtens von Elementen (DIN EN 894-1) fällt nach Goldstein (2010b) zu einem weiteren Gestaltprinzip: „Das Prinzip der zeitlichen Synchronität“.

**Prinzip der Vertrautheit:** Dieses Prinzip wird auch als Prinzip der Bedeutung bezeichnet und beschreibt, dass einzelne Elemente als Gruppe wahrgenommen werden, wenn diese bereits bekannt ist (Goldstein 2010b).

**Prinzip der gemeinsamen Region:** Elemente, die innerhalb einer gemeinsamen Region liegen, werden durch die Region als zusammengehörig wahrgenommen (Goldstein 2010b). Die gemeinsame Region kann zum Beispiel durch eine geschlossenen Kontur geschaffen werden (Schönhammer 2009).

## 2.7 Formulierung und Zusammenfassung der Forschungsfragen

Das Ziel der Arbeit war ein ganzheitliches Gestaltungsansatz für Touchscreensysteme, welcher die Belange interaktiver Systeme im Allgemeinen und die Besonderheiten der direkten Eingabe an Touchscreens (vgl. Abschnitt 2.4) im Speziellen umfassend berücksichtigt. Das Ergebnis muss daher sowohl die Bestandteile eines Touchscreen-systems abbilden als auch touchscreenspezifische Gestaltungsempfehlungen enthalten und im Rahmen des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses nach DIN EN ISO 9241-210 (vgl. Abbildung 2.24 auf S. 46) anwendbar sein. Touchscreens weisen im Vergleich zu herkömmlichen Eingabegeräten folgende Besonderheiten auf (siehe auch Abschnitt 2.3), die durch Gestaltungsempfehlungen für touchscreenbasierte Systeme berücksichtigt werden müssen:

- Subsystem Maschine – Touchscreentechnologien
  - Ein- und Ausgabemittel identisch
  - kein Unterschied zwischen Berührungspunkt und Punkt in der grafischen Benutzungsschnittstelle
  - meist keine grafische Darstellung der Cursorposition
  - variable Anordnung von Eingabeelementen
  - künstliche Rückmeldung abseits der visuellen Sinnesmodalität möglich und notwendig (z. B. auditiv und haptisch)
  - unterschiedliche Abmessungen bei sichtbarer und sensibler Fläche eines Eingabeelementes möglich
  - verschiedene technische Realisierungen der Berührungserfassung verfügbar
  - Ausnutzung des Platzes bei beschränkter Gerätegröße
- Benutzungsschnittstelle – Interaktion mittels Touchscreens
  - direkte Eingabe
  - kein Unterschied zwischen Berührungspunkt und Punkt in der grafischen Benutzungsschnittstelle
  - aufgabenangemessene Anordnung von Eingabeelementen möglich (z. B. Tastaturlayout)
  - kein Druckpunkt wie bei mechanischen Tasten

- Blindbedienung nur eingeschränkt möglich
- unterschiedliche Eingabeformen möglich (Tippen, Ziehen, Gesten)
- Subsystem Mensch – Ergonomie von Touchscreensystemen
  - Eingabe mit dem Finger
  - bei stationären Systemen Kompromiss zwischen Sehbereich und Reichraum notwendig

Die in Unterabschnitt 2.6.3 dargelegten allgemeinen Gestaltungsempfehlungen weisen bei einer Anwendung auf Touchscreensysteme im Bereich des Subsystems Maschine, der Benutzungsschnittstelle und im Bezug auf das Subsystem Mensch Lücken auf. So werden durch die Gestaltungsempfehlungen die Einflüsse unterschiedlicher technischer Realisierungen der Berührungserfassung, die Möglichkeiten unterschiedlicher Eingabeformen, die Besonderheiten der Biomechanik oder die Auswirkung künstlicher haptischer Rückmeldungen nicht abgedeckt. Der Entwurf von Gestaltungslösungen konnte durch diese unzureichender Berücksichtigung der spezifischen Besonderheiten als kritischer Schritt bei der menschenzentrierten Gestaltung touchscreenbasierter Systeme identifiziert werden.

Der in den Abschnitten 2.3, 2.4.3, 2.4.4, 2.4.5 und 2.4.6 beschriebene Forschungsbedarf wurde in Form folgender Forschungsfragen zusammengefasst:

1. Welche Interaktionsmöglichkeiten und -einschränkungen weisen die verschiedenen technologischen Realisierungsmöglichkeiten der einzelnen Bestandteile eines Touchscreensystems auf?
2. Wie gebrauchstauglich sind die grundlegenden touchscreenbasierten Interaktionsformen?
3. Wie zeitintensiv ist die Nutzung von Touchscreensystemen im Arbeitsumfeld?
4. Verändert sich die Interaktion durch die touchscreeninduzierte Ermüdung des Hand-Arm-Systems?
5. Können aus der touchscreeninduzierten Ermüdung des Hand-Arm-Systems Empfehlungen für die Dauer der Touchscreeninteraktion und der notwendigen Erholungspausen abgeleitet werden?
6. Lässt sich die Interaktion mit Touchscreensystemen durch haptische Rückmeldungen verbessern?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage 1 wurde eine systematische Literaturanalyse durchgeführt (Kapitel 3). Für die Themen der Forschungsfragen 2 bis 6 wurden jeweils ein empirischer Ansatz gewählt (Kapitel 4). Die auf diese Weise erarbeiteten Erkenntnisse ergänzen die dargelegten theoretischen Grundlagen und ermöglichten so die Ableitung von Gestaltungsempfehlungen und damit einen ganzheitlichen Gestaltungsansatz für touchscreenbasierte Systeme (Kapitel 5).

### 3 Literaturanalyse der technologischen Realisierungsmöglichkeiten

Ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle mittels Touchscreen entsprechend der Definition realisiert, kann diese Schnittstelle in mehrere Systembestandteile unterteilt werden (vgl. Abschnitt 2.1). Die technischen Systembestandteile sind im Basismodell für Touchscreensysteme (vgl. Abbildung 2.8 in Abschnitt 2.2) dem Subsystem Maschine zuzuordnen. Die technischen Voraussetzungen zur Realisierung eines Touchscreens beinhalten mindestens eine elektronische Anzeige und die Berührungserfassung. Jedes der in Abschnitt 2.3 genannten Grundsysteme beeinflusst durch die jeweilige technische Realisierung die Interaktion mit dem Menschen (vgl. Abschnitt 2.3). Um die systematische Auswahl geeigneter Technologien für die Subsysteme einer touchscreenbasierten Benutzungsschnittstelle (vgl. Abschnitt 2.4) anhand des jeweiligen Nutzungskontextes (vgl. Unterabschnitt 2.6.2) zu ermöglichen, wurden für jedes einzelne Subsystem die aktuell gängigen sowie bald verfügbaren technischen Realisierungsmöglichkeiten recherchiert und anhand interaktionsbeeinflussender Faktoren analysiert und gegenübergestellt. Als interaktionsbeeinflussende Faktoren wurden im Rahmen dieser Arbeit Möglichkeiten und Einschränkungen bei der Interaktion verstanden, die sich aus der konkreten technischen Realisierung eines Systems ergeben. Die unterschiedlichen technischen Realisierungen jedes Subsystems eines Touchscreens wurden anhand der ermittelten Interaktionsmöglichkeiten und -einschränkungen im Hinblick auf die gezielte systematische Auswahl einer geeigneten Technologie gegenübergestellt. Die bei der Analyse betrachteten Systembestandteile umfassten aktuell eingesetzte oder in naher Zukunft verfügbare Technologien zur Erzeugung elektronischer Bilder, zur Erfassung von Berührungen, zur Ausgabe von Rückmeldungen und zur softwaretechnischen Umsetzung touchscreenbasierter Benutzungsschnittstellen.

Im Zuge der Analyse wurden für jede Technologie zuerst der Aufbau und das Funktionsprinzip erläutert. Auf dieser Grundlage wurden anhand der interaktionsbeeinflussenden Faktoren die markanten Vor- und Nachteile der jeweiligen Technologie ermittelt und aufgeführt. Da anhand der Analyse eine gezielte Auswahl einer geeigneten Technologie für die Gestaltung interaktiver Touchscreensysteme erleichtert werden soll, wurden ausschließlich Technologien berücksichtigt, die aktuell oder

in naher Zukunft als funktionsfähiges System zur Verfügung stehen. Die Kosten und die Verfügbarkeit einer Technologie wurden nicht als Beurteilungskriterium herangezogen, da sich der Markt als zu schnelllebig herausgestellt hat. So kam es z. B. bei Touchscreens in jüngster Vergangenheit aufgrund der flächendeckenden Verbreitung von Smartphones und des damit einhergehenden Preisverfalls zu einer Verschiebung der Marktanteile von resistiven zu kapazitiven Touchscreens, so dass entgegen der Aussage von Schlegel (2013b) mittlerweile auch großflächige kapazitive Touchscreens wie z. B. der Ideum Colossus (Ideum 2015) wirtschaftlich herstellbar sind.

## 3.1 Bilderzeugung mittels elektronischer Anzeige

Die Systeme zur Ausgabe elektronischer Bilder werden auch als elektronische Anzeigen bezeichnet und können auf unterschiedlichen Technologien basieren. Bei Touchscreens kommen hauptsächlich die Technologien herkömmlicher Computermotoren zum Einsatz. Aktueller Stand der Technik sind sowohl bei Computermonitoren als auch bei Anzeigen der meisten Mobilgeräte Flüssigkristall- und LED-Anzeigen. Obwohl Computermonitore auf Basis der Kathodenstrahlröhre fast kaum noch zu finden sind, ist diese Technologie durch den ersten dokumentierten Touchscreen von Johnson (1967) historisch erwähnenswert. Bei Mobilgeräten zum Lesen von Büchern haben sich Anzeigen mit sogenanntem elektronischem Papier bzw. elektronischer Tinte etabliert. Stationäre Touchsysteme in Form interaktiver Tische, Wände oder Whiteboards werden oft auf Basis von Videoprojektoren realisiert. Es gibt weitere Technologien, die sich zwar zur Realisierung elektronischer Anzeigen eignen, aber bisher bei Touchscreensystemen eine untergeordnete Rolle spielen (z. B. Plasma-Anzeigen), so dass sie nicht Bestandteil dieser Arbeit sind.

### 3.1.1 Herleitung der Analysekriterien

Da die Technologien elektronischer Anzeigen nicht ideal sind (DIN EN ISO 9241-303), können bei der visuellen Wahrnehmung (vgl. Abschnitt 2.5) des elektronisch erzeugten Bildes technologiespezifische Artefakte festgestellt werden, welche die wichtigste Wahrnehmungsmodalität der Touchscreeninteraktion und damit auch die Interaktion an sich beeinflussen. Für eine befriedigende Mensch-Anzeige-Interaktion müssen elektronische Anzeigen laut DIN EN ISO 9241-303 zahlreiche Anforderungen erfüllen. Die Norm listet die Leserlichkeit und Lesbarkeit, die Leuchtdichte, die Wiedergabetreue sowie visuelle Artefakte als Anforderungen an elektronische Anzeigen auf. Die Wiedergabetreue umfasst die Farbwiedergabe sowie den möglichen

Betrachtungswinkel. Die erwähnten visuellen Artefakte umfassen Unregelmäßigkeiten bei den bereits erwähnten Anforderungen, welche meist auf technologische Besonderheiten zurückzuführen sind. Die ebenfalls in der DIN EN ISO 9241-303 erwähnten Anforderungen an Sehbedingungen, spezielle physikalische Umgebungen sowie Leserlichkeit der Informationscodierung und Grafiken sind unabhängig von der technischen Realisierung elektronischer Anzeige und eignen sich daher nicht zur Herleitung von Analysekriterien. Die Darstellung leserlicher Informationen für lesbare Texte ist eine der Hauptaufgaben elektronischer Anzeigen (DIN EN ISO 9241-302). Neben dem Einfluss typografischer Merkmale wird die Leserlichkeit und Lesbarkeit von Schrift auf elektronischen Anzeigen nach Ziefle (2002) und DIN EN ISO 9241-303 durch die drei Kriterien Kontrast, Auflösung und Bildwiederholfrequenz maßgeblich beeinflusst. Anhand der erwähnten Quellen ließen sich folgende Analysekriterien zur Beurteilung unterschiedlicher technologischer Realisierungen ableiten:

- Kontrast & Leuchtdichte
- räumliche Auflösung
- Pixeldichte
- Bildwiederholfrequenz
- Farbwiedergabe
- Betrachtungswinkel
- technologische Besonderheiten

Um Information elektronisch sichtbar zu machen, ist ein **Kontrast** zwischen der zu visualisierenden Information und dem Hintergrund notwendig (DIN EN ISO 9241-303). Dieser Kontrast wird auch als Leuchtdichteverhältnis bezeichnet (DIN EN ISO 9241-302, Goodman 2012) und ist eine photometrische Größe, die den Leuchtdichteunterschied zwischen benachbarten Flächen beziffert (DIN 32975). Es existieren mehrere Formeln zur Berechnung (Ziefle 2002), von denen die Gleichung 3.1 nach Michelson laut DIN 32975 und DIN EN ISO 9241-302 anzuwenden ist. Dabei ist  $K$  der Kontrast,  $L_O$  die Leuchtdichte des Sehobjektes und  $L_U$  die Leuchtdichte des Umfelds. Die beiden zur Berechnung notwendigen Leuchtdichten  $L_O$  und  $L_U$  lassen sich gemäß DIN 5036-3 ermitteln.

$$K = \frac{L_O - L_U}{L_O + L_U} \quad (3.1)$$

Nahezu alle verfügbaren elektronischen Anzeigen basieren auf irgendeiner Art Rastergrafiken. Das Bild entsteht aus einer großen Anzahl farbiger Punkte, die in einem rechteckigen Raster angeordnet sind (Dix et al. 2004). Unter der **räumlichen**



**Auflösung** einer elektronischen Anzeige, die laut DIN EN ISO 9241-302 für die Wiedergabetreue relevant ist, ist sowohl die Anzahl als auch die Dichte bzw. Größe dieser farbigen Bildpunkte zusammengefasst. Die Bildpunkte sind die elementaren Flächen- und Farbelemente und werden auch als Pixel bezeichnet. Handelt es sich um eine mehrfarbige Anzeige, ist der Pixel „[...] das kleinste ansteuerbare Element, das in der Lage ist, den gesamten Farbenbereich zu erzeugen, oder das kleinste Element, das in der Lage ist, die volle Funktionstüchtigkeit der Anzeige herzustellen“ (DIN EN ISO 9241-302). Als Auflösung einer elektronischen Anzeige wird allgemein das Verhältnis der Pixelanzahl in horizontaler und vertikaler Richtung angegeben, z. B. 1680 x 1050. Die unterschiedlichen Abmessungen elektronischer Anzeigen bei teils identischer Auflösung führen zu unterschiedlich großen Pixeln und damit zu einer anzeigenspezifischen **Pixeldichte**. Für die Pixeldichte hat sich die Einheit Pixel per Inch (ppi) etabliert. Durch das Invertieren der Pixeldichte erhält man die Größe Pixelpitch, die den Abstand zwischen zwei gleichfarbigen Bildpunkten beschreibt (Chen et al. 2012b). Je kleiner der Pixelpitch, also je größer die Pixeldichte, umso mehr feine Details lassen sich im elektronisches Bild darstellen. Die Pixeldichte ist vor der Helligkeit, dem Farbton und der Sättigung der wichtigste Einflussfaktor auf die Schärfe eines Bildes.

Die **Bildwiederholfrequenz** oder Abtastfrequenz ist ein Maß für die Anzahl der Einzelbilder, die pro Sekunde von einer Anzeige wiedergegeben werden (DIN EN ISO 9241-302, Schlick et al. 2009, Goodman 2012). Sie resultiert aus der Summe von Anstiegszeit, Haltezeit und Abfallzeit, die eine elektronische Anzeige zur Darstellung eines Bildes benötigt (DIN EN ISO 9241-302). Die Bildwiederholfrequenz wird in Hertz (Hz) oder als Bildwiederholrate in Frames per Second (fps) angegeben.

Ist die Bildwiederholfrequenz einer elektronischen Anzeige zu niedrig, nimmt der Mensch ein Flimmern (Schlick et al. 2009) oder gar die Einzelbilder an sich wahr. Ist hingegen die Abtastfrequenz zu hoch für die verwendete Anzeigetechnologie, wird das neue Bild bereits dargestellt bevor das vorhergehende Bild vollständig ausgeblendet ist (Blankenbach 2012c). Die Ursache ist das Nachleuchten des vorhergehenden Einzelbildes auf einer elektronischen Anzeige, was aus der technologiespezifischen erforderlichen Dauer zur Änderung der Leuchtdichte eines Bildpunkts resultiert. Auch der sogenannte Regenbogeneffekt ist direkt von der Abtastfrequenz abhängig. Er wird sichtbar, wenn sich zeitlich schnell verändernde Bildinhalte mit einer Anzeigentechnologie dargestellt werden, bei der die einzelnen Farbanteile des Bildes zeitlich nacheinander erzeugt werden (Vandenberghe 2012). Während eine Farbe dargestellt wird, hat sich das Bild bereits verändert, so dass die folgende Farbe, die eigentlich mit der ersten Farbe zu einem gemeinsamen Farbeindruck gemischt werden sollte, räumlich neben der zuerst dargestellten Farbe abgebildet wird. Im zeitlichen Verlauf entsteht so ein Regenbogen mit den einzelnen Farben des Bilderzeugungssystems (drei bis sieben verschiedene Farben).

Neben der bereits erwähnten räumlichen Auflösung ist auch die **Farbwiedergabe** ein Merkmal für die Wiedergabetreue elektronischer Anzeigen (DIN EN ISO 9241-302). Die wiedergegebene Farbe einer elektronischen Anzeige lässt sich anhand von Farbton, Intensität und Sättigung beschreiben (Dix et al. 2004, Westland 2012a). Der Farbton wird durch die spektrale Wellenlänge des Lichts festgelegt, das der Pixel einer elektronischen Anzeige abgibt; die Intensität ist die Helligkeit und die Sättigung der Weißanteil der Farbe (Westland 2012a). Aufgrund der trichromatischen Farbwahrnehmung durch das menschliche Auge (vgl. Abschnitt 2.5) basiert auch die elektronische Farbwiedergabe auf der additiven Mischung von drei Primärfarben (Westland & Cheung 2012). Die Primärfarben, mit denen sich durch Mischung die größte Farbpalette (auch Gamut genannt) realisieren lassen, sind Rot, Grün und Blau. Im heute größtenteils noch angewendeten Normvalenzsystem der CIE aus dem Jahr 1931 basiert der jeweilige Farbton und die Intensität der drei Primärfarben auf den damaligen technischen Möglichkeiten. Die konkreten Wellenlängen und Helligkeitswerte der damals verwendeten Primärfarben sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Die empirische Ermittlung der Anteile der drei Primärfarben an äquidistanten Stellen der Spektrallinie und deren lineare Transformation von RGB-Anteilen zu XYZ-Werten führten bei zweidimensionaler Darstellung zum Diagramm in Abbildung 3.1. Die dort abgebildete hufeisenförmige Hüllkurve entspricht der Spektrallinie und bildet die Grenze zwischen wahrnehmbaren und theoretischen Farbtönen.

Tabelle 3.1: Wellenlängen  $\lambda$  und Lichtstromvielfache  $\Phi$  der Primärfarben für weißes Licht nach CIE 1931 (Westland 2012b)

	$\lambda$ [nm]	$\Phi$ [lm]
Rot	700	1
Grün	546,1	4,5907
Blau	435,8	0,06

In den technischen Systemen zur Erzeugung elektronischer Bilder weichen die verwendeten Primärfarben und Leuchtdichteanteile zur Erzeugung weißen Lichts vom beschriebenen Normvalenzsystem der CIE von 1931 ab; das Resultat sind zahlreiche technologiespezifische RGB-Standards (Westland & Cheung 2012). Der mit den unterschiedlichen RGB-Standards erreichbare Gamut deckt den Farbraum der CIE von 1931 nie vollständig ab (Westland & Cheung 2012). Dieser Umstand ist in Abbildung 3.1 anhand des Dreiecks im Inneren der charakteristischen Hufeisenform dargestellt. Jedoch erreichen auch innerhalb eines Standards nicht alle betreffenden Technologien zur Bilderzeugung den bereits eingeschränkten vorgegebenen Gamut. Bei der Erzeugung farbiger elektronischer Bilder summieren sich also sowohl standard- als auch technologiespezifische Einschränkungen des Gamuts und schränken damit die Farbwiedergabe ein.

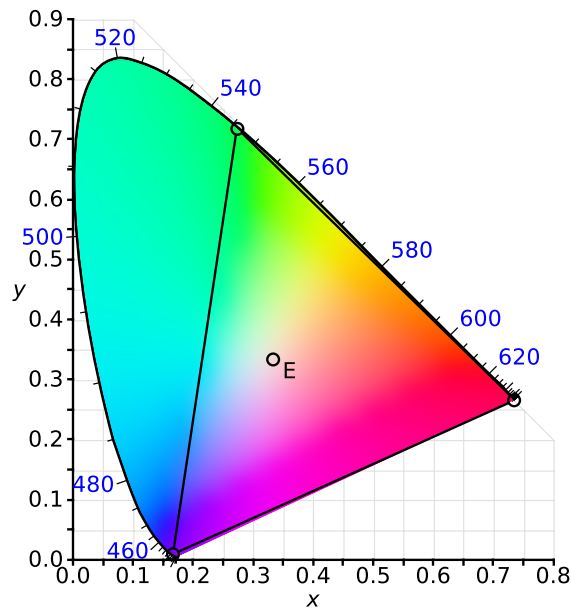


Abbildung 3.1: Normvalenzsystem der CIE von 1931 nach Westland (2012b)

Der **Betrachtungswinkel** einer elektronischen Anzeigen beeinflusst die Erkennbarkeit der dargestellten Information, da der Kontrast und die Farbwiedergabe bei elektronischen Anzeigen winkelabhängig sind (Blankenbach 2012d, Goodman 2012). Der Betrachtungswinkel ergibt sich aus dem doppelten Wert des maximal möglichen Winkels zwischen der Senkrechten der Anzeigenoberfläche und der Sehachse (Begriffe vgl. DIN EN ISO 9241-302), unter dem der Bildinhalt noch erkennbar bzw. lesbar ist. Als Grenzwert für effizient erkenn- bzw. lesbaren Bildschirminhalt empfiehlt Ziefler (2002) ein Kontrastverhältnis zwischen 5:1 und 10:1. Das Kontrastverhältnis  $KV$  berechnet sich aus dem Quotienten der Leuchtdichten zwischen weißen  $L_{ws}$  und schwarzen Pixeln  $L_{sw}$  nach Gleichung 3.2. Der daraus resultierende Betrachtungswinkel einer elektronischen Anzeige wird als Wertepaar in horizontaler und vertikaler Richtung angegeben.

$$KV = \frac{L_{ws}}{L_{sw}} \quad (3.2)$$

**Technologische Besonderheiten** führen bei einigen Anzeigentechnologien zu visuell wahrnehmbaren Artefakten. Als mögliche visuelle Artefakte erwähnt DIN EN ISO 9241-303 die Ungleichmäßigkeit der Leuchtdichte, der Farbe und des Kontrastes. Obwohl diese Artefakte die visuelle Wahrnehmung beeinflussen, nennt die DIN EN ISO 9241-303 lediglich kritische Schwellwerte, aber keine Ursachen. Diese finden sich in einer räumlich ungleichmäßigen Ausleuchtung des Bildes (Goodman 2012),

verursacht durch die Hintergrundbeleuchtung (Boyd 2012) oder das Umgebungslicht (Blankenbach 2012a). Ebenso zählen unterschiedlich alternde Farben (Blankenbach 2012c) oder ein ungünstiger Betrachtungswinkel (Blankenbach 2012d) zu den visuellen Artefakten. Unter dem visuellen Artefakt der unerwünschten Reflektionen werden Blendung, Reflexe oder Spiegelungen auf einer elektronischen Anzeige zusammengefasst, die durch die gerichtete Reflektion von Umgebungslichtquellen entstehen und dadurch den Leuchtdichtekontrast verringern (DIN EN ISO 9241-302).

### 3.1.2 Analyse der technischen Realisierungen

Auf Basis des physikalischen Funktionsprinzips lassen sich mehrere Realisierungen von elektronischen Anzeigen unterscheiden (Schlick et al. 2009), die jeweils spezifische Möglichkeiten und Einschränkungen bei der Darstellung eines Bildes in Touchscreen-systemen mit sich bringen. Prinzipiell lassen sich die Anzeigentechnologien danach charakterisieren, wie das zur Erzeugung des Bildes benötigte Licht zum Auge des Menschen kommt. So kann das Licht von der Anzeige selbst stammen (Emission) (Schlick et al. 2009). Solche Systeme werden deshalb auch als selbstleuchtende Anzeigen bezeichnet (Heinecke 2012). Bei nicht selbstleuchtenden Anzeigen wird das Licht einer entsprechenden Beleuchtungsquelle durch die Anzeige moduliert (Transmission) (Schlick et al. 2009) oder das Umgebungslicht zur Sichtbarmachung des elektronischen Bildes genutzt (Reflektion, Schlick et al. 2009, Heinecke 2012).

Den historische Ursprung bilden Anzeigen auf Basis von **Kathodenstrahlröhren**, vereinfacht auch Röhrenbildschirm genannt (Schenk & Rigoll 2010). Diese Bildschirme funktionieren nach dem Prinzip der Kathodenstrahlröhre, auch Braunsche Röhre bzw. auf englisch Cathode Ray Tube (CRT) genannt (Abbildung 3.2).

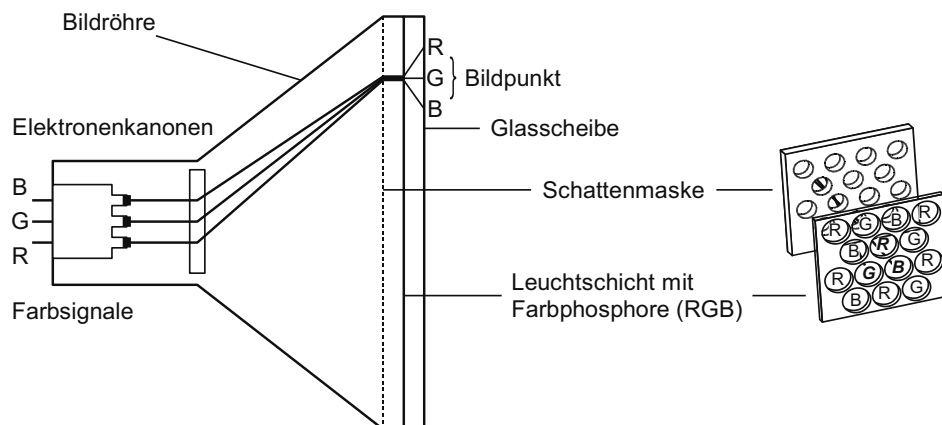


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau und Funktionsprinzip einer Kathodenstrahlröhre nach Schenk & Rigoll (2010)

Das Bild einer Kathodenstrahlröhre wird durch einen elektrostatisch abgelenkten Elektronenstrahl erzeugt, der zeilenweise über die Innenseite des Röhrenkolbens geführt wird und dort die unterschiedlich farblich beschichteten Bereiche zum Leuchten bringt (Stapelkamp 2007). Bilder auf Kathodenstrahlröhrenbildschirmen sind deshalb immer selbstleuchtend und müssen nicht durch das Umgebungslicht oder eine zusätzliche Hintergrundbeleuchtung ausgeleuchtet werden (Heinecke 2012). Die schwarzen Bereiche des darzustellenden Bildes werden vom Elektronenstrahl ausgespart.

Da bei elektronischen Anzeigen auf Basis von Kathodenstrahlröhren nur helle Bereiche durch den Elektronenstrahl beleuchtet werden und der Elektronenstrahl selbst für ausreichende Helligkeit bei den meisten Lichtbedingungen sorgt, bieten diese Anzeigen die Möglichkeit zu guten Kontrasten (Heinecke 2012). Die räumliche Auflösung ist bei Kathodenstrahlröhren nicht durch eine vorgegebene Idealauflösung bestimmt und die Bildwiederholfrequenz profitiert von der schnellen Reaktionszeit dieser Anzeigentechnologie. Allerdings besteht durch die prinzipbedingte zeilenweise Abtastung von Bildern laut Stapelkamp (2007) die Gefahr eines flimmernden Bildes. Bei der Farbwiedergabe ist der bereits angesprochene gute Schwarzwert zu nennen sowie die Gefahr, dass durch ungenau justierte Kompensationsmaßnahmen zur Deckung der drei Elektronenstrahlen leicht Farbsäume entstehen können (Schlick et al. 2009). Zudem ist die Farbwiedergabe auch bei dunklen Bildpartien fast vollständig unabhängig vom Betrachtungswinkel. Besonders zu erwähnen sind bei elektronischen Anzeigen auf Basis von Kathodenstrahlröhren die Gefahr des Einbrennens zeitlich lang dargestellter Bilder (Heinecke 2012) sowie die mögliche Beeinflussung der Farbwiedergabe durch externe Magnetfelder (Heinecke 2012), wie zum Beispiel durch Motoren, Lautsprecher oder Oberleitungen. Durch den notwendigen Verlauf des Elektronenstrahls sind solche Anzeigen mit steigender Bildschirmdiagonale sehr tief und benötigen viel Bauraum (Dix et al. 2004).

Im Gegensatz zu den voluminösen gewölbten Röhrenmonitoren mit variabler optischer Auflösung sind heute fast ausschließlich flache ebene Anzeigen vorzufinden. Die am weitesten verbreitete Variante basiert auf **Flüssigkristallen**, die jeden Bildpunkt mit einem einzelnen elektrooptischen Element erzeugen. Bei diesen sogenannten Liquid Crystal Displays (LCD) befindet sich ein Material mit Flüssigkristallen zwischen zwei Glasplatten (Schlick et al. 2009). Flüssigkristalle sind Materialien, die einen Zustand zwischen kristallinen Feststoffen und isotropen Flüssigkeiten einnehmen und deren Molekülabmessungen durch ein Seitenverhältnis von eins zu fünf und größer gekennzeichnet ist (Wu & Yang 2006). Zusätzlich weisen sie einen Dipolcharakter auf, durch den sie sich entsprechend eines elektrischen Feldes ausrichten und durch eine Modulation des Feldes gezielt bewegen lassen (Wu & Yang 2006, Schlick et al. 2009). Durch das hohe Seitenverhältnis der Moleküle ändert sich mit der Ausrichtung der Flüssigkristalle die Lichtdurchlässigkeit der Schicht zwischen den Glasplatten (Wu & Yang 2006, Schlick et al. 2009). Da die Flüssigkristalle selbst kein Licht abstrahlen,

ist eine zusätzliche Beleuchtung von hinten durch eine flächige Lichtquelle (Dahm 2006, Schlick et al. 2009) auf Basis von Leuchtdioden (LED) oder Leuchtröhren (CCFL) erforderlich (Boyd 2012). Um die Ausrichtung einzelner Flüssigkristalle zu steuern, ist die Flüssigkristallschicht entsprechend der Kristalle in eine feste Anzahl Pixel unterteilt, die für die Darstellung der Farben rot, grün und blau jeweils aus mindestens drei Subpixeln mit entsprechenden Farbfiltern bestehen (Schlick et al. 2009). Die Zahl der Pixel ist damit bei jeder Anzeige auf Basis dieser Technologie fest vorgegeben (Heinecke 2012). In Abhängigkeit des eingesetzten technischen Verfahrens zur Ansteuerung der einzelnen Pixel findet eine weitere Unterteilung von Flüssigkristallanzeigen statt. So findet man auch die Bezeichnungen TN-Display (twisted nematic), TFT (thin-film transistors), IPS-Panel (in-plane switching) oder MVA-Anzeige (multidomain vertical alignment) (Schlick et al. 2009). Bei aktuellen Flüssigkristallanzeigen verfügt jeder Subpixel über einen eigenen Transistor zur Beeinflussung des elektrischen Feldes (Heinecke 2012) und damit zur Steuerung der Durchlässigkeit für das Licht der Hintergrundbeleuchtung. Bei der Darstellung bewegter Bilder werden die Subpixel der sich ändernden Bildpunkte einzeln an- oder ausgeschaltet und so ein quasistatisches Bild erzeugt (Stapelkamp 2007).

Trotz stetiger Weiterentwicklung von Flüssigkristallanzeigen im Hinblick auf Leuchtdichte und Kontrast sind diese Anzeigen bei sehr hellem Licht häufig kaum ablesbar (Heinecke 2012). Der Kontrast wird durch die eingeschränkte Schwarzdarstellung begrenzt (Schlick et al. 2009). Die Zahl der Pixel ist mit der Strukturierung der Flüssigkristalle bei jeder Anzeige auf Basis dieser Technologie fest vorgegeben (Heinecke 2012). Die Darstellung eines Bildes in einer anderen als der technologisch bedingten räumlichen Auflösung ist nur schlecht möglich (Dahm 2006). Im Vergleich zu Anzeigen auf Basis einer Kathodenstrahlröhre sind Flüssigkristallanzeigen sehr langsam (Blankenbach 2012b). Durch geeignete technische Maßnahmen, z. B. gezieltes Übersteuern des elektrischen Feldes, erreichen aktuelle Flüssigkristallanzeigen Bildwiederholfrequenzen, die eine schlierenfreie Darstellung sehr schneller Bildsequenzen ermöglicht. Bei der Farbdarstellung sind bei dieser Anzeigentechnologie Defizite bei der Schwarzdarstellung zu verzeichnen, da es technisch unmöglich ist, durch die Flüssigkristalle das gesamte Licht der Hintergrundbeleuchtung zu blockieren (Schlick et al. 2009). Der Betrachtungswinkel hat bei Flüssigkristallanzeigen einen starken Einfluss auf die Wiedergabetreue von Leuchtdichte und Farbdarstellung (Dahm 2006, Schlick et al. 2009, Blankenbach 2012b). Technologiebedingt treten bei dieser Art von Anzeigen durch Defekte bei den benötigten Transistoren häufig fehlerhafte Pixel auf, die unabhängig vom dargestellten Bild permanent hell oder dunkel bleiben und so ablenkend wirken (Schlick et al. 2009). Flüssigkristallanzeigen sind anfällig für Druck und mechanische Belastung (Dahm 2006), da die Ausrichtung der Flüssigkristalle an den mechanisch belasteten Stellen nicht mehr durch das elektrische Feld gesteuert werden kann. Ebenso erwähnenswert ist die temperaturabhängige Reaktionszeit der

Flüssigkristalle auf die Änderung des elektrischen Feldes (Blankenbach 2012b), so dass bei niedrigen Temperaturen die Bildwiederholfrequenz verringert werden muss, um Schlieren bei der Darstellung zu vermeiden bzw. überhaupt ein lesbares Bild darzustellen.

Unter der Bezeichnung **E-Paper** (Electronic Paper) oder **E-Ink** (Electronic Ink) werden elektronische Anzeigen zusammengefasst, denen ähnliche Eigenschaften wie bedrucktem Papier zugeschrieben werden (Schlick et al. 2009). Es handelt sich um reflektive Anzeigen, die keine integrierte Lichtquelle benötigen (Heikenfeld et al. 2011, Heinecke 2012) und das Bild mit Hilfe des Umgebungslichts erzeugen, indem sie es gezielt absorbieren und reflektieren. Um dies zu erreichen, besitzt eine solche Anzeige für jeden Pixel eine Mikrokapsel, die mit einer klaren Flüssigkeit gefüllt ist (Schlick et al. 2009). In der Flüssigkeit befinden sich positiv geladene weiße Partikel und negativ geladene schwarze Partikel (Schlick et al. 2009, Heikenfeld et al. 2011, Heinecke 2012). Die Mikrokapseln sind zwischen einer transparenten Außenelektrode und einer rückseitigen Elektrode eingebettet (Schlick et al. 2009), die beide auch biegsam sein können (Heinecke 2012). Wird über diese Elektroden ein elektrisches Feld erzeugt bewegen sich die Partikel innerhalb ihrer jeweiligen Kapsel entsprechend ihrer elektrischen Ladung zur Displayoberfläche und zur abgewandten Seite, wodurch ein heller oder dunkler Bildpunkt entsteht (Schlick et al. 2009, Amundson 2012). Die durch das elektrische Feld verursachte Wanderung der geladenen Partikel von oder zum Betrachter wird als vertikale Elektrophorese bezeichnet (Heikenfeld et al. 2011, Amundson 2012). Durch die Modulation der Pulsamplitude und -dauer des elektrischen Feldes lassen sich Zwischenstufen zwischen schwarz und weiß (Graustufen) erzeugen (Heikenfeld et al. 2011). Dabei kommt erschwerend hinzu, dass die unterschiedliche Schalthistorie der einzelnen Mikrokapseln zu einer abweichenden Verteilung der Partikel in der Flüssigkeit führen kann, so dass die Pixel uneinheitlich gefärbt sind (Heikenfeld et al. 2011). Ein Weg dies zu umgehen, ist das gleichzeitige Ansteuern aller Pixel zwischen zwei Bildern, um einen einheitlichen Ausgangszustand vor der Darstellung des neuen Bildes herzustellen (Heikenfeld et al. 2011). Wird das elektrische Feld abgeschaltet, verbleiben die Partikel in den Mikrokapseln über einen langen Zeitraum in ihrem jeweiligen Ordnungszustand. Das zuletzt dargestellte Bild bleibt also auch nach dem Abschalten der Betriebsspannung erhalten. Die hier beschriebene E-Paper-Technologie wird aufgrund des Funktionsprinzips auch konventionelle vertikale Elektrophorese genannt und ist in zahllosen kommerziellen Produkten zu finden (Heikenfeld et al. 2011). Darüber hinaus existieren weitere Möglichkeiten zur technologischen Realisierung von E-Paper- bzw. E-Ink-Displays (Heikenfeld et al. 2011, S. 137). So ist zum Beispiel die horizontale Elektrophorese bezüglich der Farbdarstellung vielversprechend, da dazu Mikrokapseln mit unterschiedlich eingefärbten Partikeln entweder in mehreren Schichten übereinander (subtraktive Farbmischung, CMY) oder in Form von Subpixeln nebeneinander

(additive Farbmischung, RGB) angeordnet werden können (Heikenfeld et al. 2011, Lenssen 2012). Das Fehlen kommerzieller Produkte mit dieser Technologie wurde bereits von Amundson (2012) bemängelt. Bei Abgabe dieser Arbeit wurden zwar erneut farbige E-Ink-Displays angekündigt (Business Wire 2016), aber die Verfügbarkeit entsprechender Anzeigen war weiterhin nicht gegeben.

Durch die optischen Verluste bei der Reflektion des einfallenden Umgebungslichts (Heikenfeld et al. 2011) sind E-Paper- bzw. E-Ink-Displays nicht so kontrastreich wie bedrucktes Papier (Heinecke 2012). Bei hellem Umgebungslicht (z. B. Sonneneinstrahlung) bleiben diese Anzeigen weiterhin sehr gut ablesbar (Heikenfeld et al. 2011, Heinecke 2012). Die räumliche Auflösung ist bei dieser Art von Anzeigen durch die Mikrokapseln und die dazugehörigen Elektroden festgelegt. Es sind Pixeldichten von 200 Pixeln pro Zoll und höher technisch realisierbar (Heikenfeld et al. 2011). Gängige Geräte verfügen über Anzeigen mit mindestens 160 Pixeln pro Zoll und erreichen damit in etwa die Qualität einer gedruckten Zeitung (Heinecke 2012). Die Bildwiederholfrequenz von E-Paper- bzw. E-Ink-Displays ist begrenzt. Ein Wechsel von Schwarz auf Weiß dauert eine viertel Sekunde; die Darstellung eines Graustufenbildes kann bis zu eine Sekunde in Anspruch nehmen (Heikenfeld et al. 2011). Dabei wird die notwendige gleichzeitige Ansteuerung aller Pixel zwischen zwei Bildern als störendes Flimmern wahrgenommen (Heikenfeld et al. 2011). Kommerzielle E-Paper- bzw. E-Ink-Displays erreichen 16 Graustufen, wobei bereits Prototypen mit 256 Graustufen und Farbdarstellung existieren (Schlick et al. 2009, Heikenfeld et al. 2011). Kontrast und Farbwiedergabe sind bei dieser Art von Anzeigen unabhängig vom Betrachtungswinkel. Die Besonderheiten dieses Anzeigentyps liegen in der Bild Darstellung im stromlosen Zustand, was in einem sehr niedrigen Energieverbrauch resultiert. Der Aufbau erlaubt sehr dünne und gebogene Anzeigen. Die geringe Änderungsgeschwindigkeit lässt nur statische Ausgaben sinnvoll zu (Heinecke 2012). Der darstellbare Farbraum ist bisher auf wenige Graustufen beschränkt und reduziert die Anwendungsmöglichkeiten dieser Anzeigentechnologie. Obwohl diese Art von Anzeigen das Umgebungslicht zur Bilddarstellung gezielt reflektiert oder absorbiert, können je nach Oberflächenbeschaffenheit störende Reflektionen auftreten (Heinecke 2012). Einige neuere Geräte mit E-Paper- bzw. E-Ink-Displays verfügen zusätzlich über eine Beleuchtung, deren Licht seitlich in die Schicht mit den Mikrokapseln eingekoppelt wird, um ein Ablesen der Anzeige auch bei Dunkelheit zu gewährleisten (z. B. beim Kindle Paperwhite von Amazon 2014).

Während Leuchtdioden (LED) bei einigen Anzeigen auf Basis von Flüssigkristallen in Form der Hintergrundbeleuchtung eingesetzt werden (Schlick et al. 2009), lassen sich auch gesamte Anzeigen, z. B. große Bildwände, aus Leuchtdioden aufbauen (Heinecke 2012). Für jedes Pixel kommen drei konventionelle Leuchtdioden in den Farben rot, grün und blau zum Einsatz (Heinecke 2012). Leuchtdioden emittieren im pn-Übergang des Siliziumkristalls Licht durch die Rekombination von Elektronen mit



positiv geladenen Stellen (Schlick et al. 2009). Dieser im Gegensatz zur Glühwendel einer Glühlampe kalt ablaufende Vorgang der Lichterzeugung mittels elektrischer Felder oder elektrischer Spannung wird Elektrolumineszenz genannt (Schlick et al. 2009) und lässt sich auch mit organischen Materialien reproduzieren (Ma 2012), wobei man von organischen Licht-emittierenden Dioden, kurz OLED spricht (Heinecke 2012). Bei Anzeigen auf Basis von OLED besteht jeder Pixel ebenfalls aus mehreren farbigen Subpixeln (Dahm 2006), die ähnlich wie bei den Flüssigkristallanzeigen durch eine aktive Matrix (Transistormatrix) angesteuert werden (Heinecke 2012). Diese Anzeigen werden daher auch Active Matrix OLED-Display bzw. AMOLED-Anzeigen genannt (Heinecke 2012). Da diese Art von Anzeigen selbstleuchtend sind, benötigen sie keine Hintergrundbeleuchtung (Dahm 2006).

OLED-Displays weisen eine hohe Leuchtdichte (Heinecke 2012) und ein sehr hohes Kontrastverhältnis auf (Heinecke 2012, Ma 2012), wodurch sie auch bei Sonnenlicht ablesbar sind (Heinecke 2012). Die jeweilige räumliche Auflösung einer solchen Anzeige wird funktionsprinzipbedingt im Herstellungsprozess festgelegt. Die benötigten Zeiten für eine Bildänderung sind sehr kurz (Heinecke 2012), was eine sehr hohe Bildwiederholfrequenz ermöglicht (Heinecke 2012, Ma 2012). Die Farbwiedergabe wird von Ma (2012) als lebendig umschrieben. OLED-Displays ermöglichen über einen großen Betrachtungswinkel (Dahm 2006, Ma 2012), sind sehr dünn (Dahm 2006, Ma 2012, Heinecke 2012) und lassen sich so fertigen, dass die Anzeigen flexibel (Dahm 2006, Ma 2012) und transparent (Ma 2012) sind. Ebenfalls erwähnenswert für den Einsatz bei Mobilgeräten ist der niedrige Energiebedarf (Dahm 2006, Ma 2012). Als negativ bleibt anzumerken, dass sich die Farbwiedergabetreue mit zunehmendem Alter der OLED-Anzeige verschlechtert, da diese Art von Anzeigen schnell an Leuchtkraft verlieren (Heinecke 2012) und dieser Vorgang zusätzlich je nach Farbe (Rot, Blau, Grün) variiert (Dahm 2006).

Ebenso wie die zuvor genannten Technologien zur Bilderzeugung kommen **Projektionssysteme** bei Touchscreens zum Einsatz. Häufig findet man diese als Videoprojektoren oder auch Beamer bezeichneten Geräte (Heinecke 2012) bei großflächigen Touchsystemen, wie interaktiven Wänden (Han 2006, Heinecke 2012) oder Tabletops (Chang et al. 2010), da mit dieser Technologie die bisher größten Bilder erzeugt werden können (Heinecke 2012). Sie charakterisieren sich durch eine visuelle Ausgabe auf einer passiven Fläche (Heinecke 2012). Die einfachste Bauart von Bildprojektoren funktioniert wie ein Diaprojektor, nur dass anstelle des Dias eine Scheibe mit Flüssigkristallen vorhanden ist (Dix et al. 2004, Dahm 2006). Die Bilderzeugung funktioniert analog zu den Flüssigkristallanzeigen Dahm (2006), nur dass statt der dort üblichen Hintergrundbeleuchtung das erzeugte Licht einer deutlich stärkeren Lichtquelle durch die Flüssigkristallanzeige und ein System von optischen Linsen auf eine Leinwand geworfen wird (Dix et al. 2004). Bei komplexeren Beamern auf Basis von Flüssigkristallanzeigen wird der Lichtstrahl über zwei halbdurchlässige

Spiegel dreigeteilt und durch je ein einzelnes LCD für die Farben rot, grün und blau geleitet (Seiko Epson 2014). Die dabei erzeugten Bilder werden anschließend über ein Prisma zusammengeführt und ebenfalls über ein Linsensystem fokussiert und auf die Leinwand projiziert (Seiko Epson 2014). Aufbau und Funktionsprinzip eines Projektionssystems auf Basis von drei Flüssigkristallanzeigen sind in Abbildung 3.3 zu sehen.

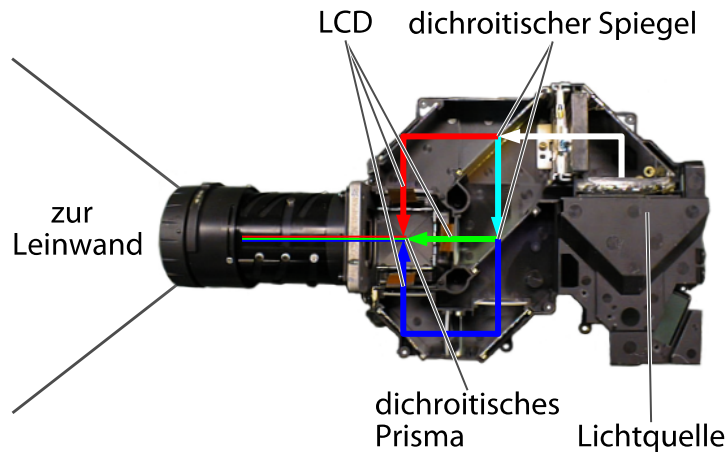


Abbildung 3.3: Aufbau und Funktionsprinzip eines Projektionssystems auf Basis von drei Flüssigkristallanzeigen nach Seiko Epson (2014)

Eine weitere Möglichkeit, ein elektronisches Bild auf eine Leinwand zu projizieren, bietet die sogenannte DLP-Technologie (Digital Light Processing, Dahm 2006). Zur Projektion eines Bildes wird das Licht einer Lichtquelle auf eine Matrix aus beweglichen Mikrospiegeln gelenkt, die auch als Digital Micromirror Device (DMD) bezeichnet wird (Texas Instruments 2014). Jeder Mikrospiegel kann einzeln angesteuert und auf diese Weise um eine Achse rotiert werden (Texas Instruments 2014). Eine Rotation in eine Richtung führt dazu, dass das Licht der Lichtquelle in Richtung des Linsensystems und damit zur Leinwand reflektiert wird (Dahm 2006, Texas Instruments 2014). Bei der entgegengesetzten Rotation wird das Licht auf eine schwarze Wand innerhalb des Projektors reflektiert und gelangt so nicht zur Leinwand (Dahm 2006, Texas Instruments 2014). Auf diese Weise erzeugt jeder Mikrospiegel der Spiegelmatrix entweder einen dunklen oder einen hellen Bildpunkt (Dahm 2006, Texas Instruments 2014). Zur Darstellung farbiger Bilder befindet sich ein schnell rotierendes Farbrad mit drei oder vier Segmenten für die Farben Rot, Grün, Blau und Weiß zwischen der Lichtquelle und der Spiegelmatrix, die entsprechend der Rotationsfrequenz des Farbrades angesteuert wird (Dahm 2006). Auf diese Weise wird nacheinander ein komplettes Bild in der jeweiligen Farbe des Farbradsegments erzeugt, was durch die hohe Frequenz der farbigen Einzelbilder als ein farbiges Gesamtbild wahrgenommen wird.

Die Leinwand eines Projektionssystems kann aus reflektierendem oder lichtdurchlässigem Material bestehen (Heinecke 2012). Im letzten Fall wird das Bild von hinten projiziert und man spricht daher von einem Rückprojektionssystem (Dix et al. 2004, Heinecke 2012).

Die Leuchtdichte von Projektionssystemen ist nicht so groß wie bei einem selbstleuchtenden Monitor (Dahm 2006), so dass bei der Projektion auf eine reflektierende Leinwand meist die Verdunkelung des Raumes oder ein Sonnenschutz erforderlich ist (Heinecke 2012). Der erreichbare Kontrast ist nicht nur durch die Leuchtdichte beschränkt, sondern zudem stark vom Umgebungslicht abhängig, denn der dunkelste darstellbare Schwarzwert entspricht dem Wert der Projektionsfläche mit ausgeschaltetem Projektor (Lumita 2007). Dies führt dazu, dass selbst ein herkömmlicher Projektor in einem Klassenzimmer bei moderater Beleuchtung lediglich ein wahrnehmbares Kontrastverhältnis von 10:1 oder schlechter erreicht (Lumita 2007). Im Widerspruch dazu stehen die Herstellerangaben zum Kontrastverhältnis, die zwar mehrere Zehnerpotenzen höher liegen, aber durch eine Messung direkt im Lichtstrahl zwischen Projektor und Leinwand bei absoluter Dunkelheit entstehen (Lumita 2007). Ein wenig besser schneiden Rückprojektionssysteme ab, die an die Bildeigenschaften von LCD-Bildschirmen heranreichen können (Heinecke 2012). Bei der räumlichen Auflösung von Projektionssystemen ist die Pixelanzahl durch das Funktionsprinzip (LCD oder DLP) fest vorgegeben, aber die Pixeldichte auf der Leinwand lässt sich durch Änderung des Projektionsabstandes und der mittels Linsensystem beeinflussbaren Bildvergrößerung stark variieren. Die Bildwiederholfrequenz bei LCD-Projektoren ist entsprechend der zugrundeliegenden Technologien für Flüssigkristallanzeigen ausreichend schnell für die schlierenfreie Darstellung schneller bewegter Bilder. Bei DLP-Projektoren kommt es bei der Darstellung bewegter Bilder zu regenbogenfarbigen Farbsäumen an kontraststarken Bildinhalten. Dieses Artefakt wird auch Regenbogeneffekt genannt und betrifft einen gewissen Anteil der Menschen besonders, da diese empfindlich darauf reagieren. So berichten Bull & Bull (2005) von Überanstrengung der Augen und Kopfschmerzen in einigen Fällen beim Einsatz solcher Projektoren in Klassenzimmern. Die Wiedergabetreue von Farben wird bei Projektionssystemen durch die Limitierung bei der Leuchtdichte und der Umgebungslichtabhängigkeit des Kontrastes eingeschränkt. Der Betrachtungswinkel hat keinen Einfluss auf Leuchtdichte, Kontrast oder Farbdarstellung, sofern keine zusätzlichen einschränkenden Maßnahmen bei der Projektionsfläche vorgenommen wurden. Als interaktionsbeeinflussende Faktoren dieser Bilderzeugungstechnologie ist der Fliegengittereffekt, der Geräuschpegel und die Verdeckung der Leinwand zu nennen. Der Fliegengittereffekt entsteht durch die starke Vergrößerung der Pixel eines LCD-Projektors. Dabei werden die ursprünglich unsichtbaren Strukturen der Flüssigkristallmatrix sichtbar und führen auf der Leinwand in homogenen Farbbereichen zu einer bei näherer Betrachtung sichtbaren Struktur. Der Geräuschpegel von

Projektionssystemen wird durch die notwendige Lüfterbasierte Kühlung verursacht (Dahm 2006). Dies schränkt sowohl den Anwendungsbereich ein und muss bei der Gestaltung von interaktiven Systemen mit auditiver Rückmeldung berücksichtigt werden.

## 3.2 Berührungserfassung

Ein zentraler technischer Bestandteil eines Touchscreens ist das System zur Erfassung von Berührungen. Dabei handelt sich um spezielle Hardware, welche die physikalischen Effekte, die durch ein berührendes Objekt ausgelöst werden, nah an der Display- oder Abbildungsoberfläche kontinuierlich detektiert und elektronisch auswertbar macht. Neben den technischen Parametern ergeben sich durch die unterschiedlichen physikalischen Ansätze zur Berührungserfassung einerseits technologiespezifische Interaktionsmöglichkeiten aber teilweise auch Einschränkungen. Bei der Analyse berücksichtigt wurden resistive, kapazitive, akustische, optische und In-Cell-Touchscreens ebenso wie Touchscreens auf Basis der digitalen Bildverarbeitung. Nicht enthalten sind obsolete Technologien, z. B. auf Basis von Drahtgittern (vgl. Johnson 1967), und Systeme auf Basis von Induktion, da diese Systeme nur reagieren, wenn die Berührung mit einem speziellen Stift erfolgt. Da die Interaktion mit dem Finger allein bei induktiven Systemen nicht möglich ist, fallen diese Systeme nicht unter die Definition eines Touchscreens nach Abschnitt 2.4.

Die Analyse der technologieabhängigen Interaktionsmöglichkeiten der Berührungserfassung von Touchscreens wurde in Auszügen bereits in Domhardt & Schmidt (2012a) veröffentlicht.

### 3.2.1 Herleitung der Analysekriterien

Da der spezifische Aufbau und das konkrete Funktionsprinzip die Interaktionsmöglichkeiten beeinflusst, wurden die verschiedenen Technologien anhand konkreter interaktionsbeeinflussender Faktoren analysiert. Diese Faktoren wurden bereits von Greenstein (1997) formuliert und im Rahmen des Beitrags um aktuelle Erkenntnisse aus Laufs et al. (2010), Jarausch (2010), Schöning et al. (2008) und Holzinger (2003) ergänzt. Dies ermöglichte eine systematische Gegenüberstellung der einzelnen Technologien. Die interaktionsbeeinflussenden Faktoren werden im Folgenden im Detail erklärt.

Die **optische Darstellungsqualität** eines elektronischen Bildes wird durch zusätzliche Schichten, die bei den meisten Touchscreentechnologien zur Berührungserfassung vor dem Display notwendig sind, negativ beeinflusst. Jede zusätzliche Schicht erzeugt

eine neue Grenzsschicht zwischen Auge und dargestellter Information, an der Brechung und Reflektionen des Lichts auftreten können. Diese optischen Effekte an den zusätzlichen Schichten sind eine Ursache für die schlechte Ablesbarkeit von Touchscreens im Sonnenlicht. Zudem sorgt die Stärke der Schichten und deren notwendige Befestigung für einen Abstand zwischen berührungsempfindlicher Oberfläche und dem dargestellten Bild, was durch die unterschiedliche Ausrichtung von optischer Achse zwischen Auge und Touchscreen sowie Interaktionsachse zwischen Finger und Touchscreen zu einem **Parallaxenfehler** führt (Baber 1997, Greenstein 1997). Das Entstehungsprinzip ist schematisch in Abbildung 3.4 dargestellt.

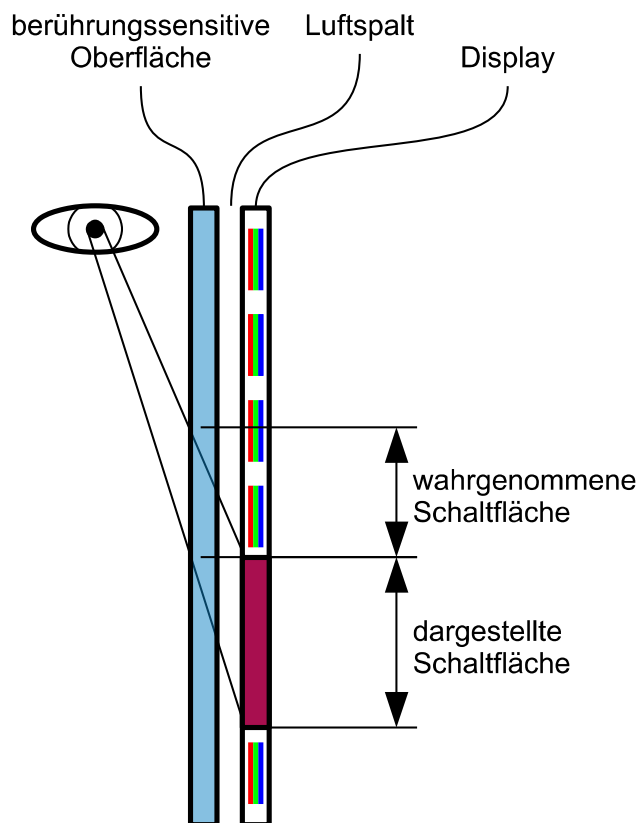


Abbildung 3.4: Entstehungsprinzip des Parallaxenfehlers

Ein vorhandener Parallaxenfehler lässt sich bei den meisten Touchscreentechnologien durch eine geeignete **Kalibrierung** mindern. Bei der Kalibrierung werden die erfassten Berührungen softwareseitig den korrekten Positionen des dargestellten Bildes zugeordnet und damit die direkte Interaktion ermöglicht. Dieser manuell vorzunehmende Abgleich sowie die daraus resultierende Verzerrung der Berührungserfassung sind in Abbildung 3.5 dargestellt. Die regelmäßige Kalibrierung ist notwendig, um die Genauigkeit der Berührungserfassung bei Schwankungen der Umgebungstemperatur und Alterung des berührungserfassenden Materials aufrecht zu erhalten.

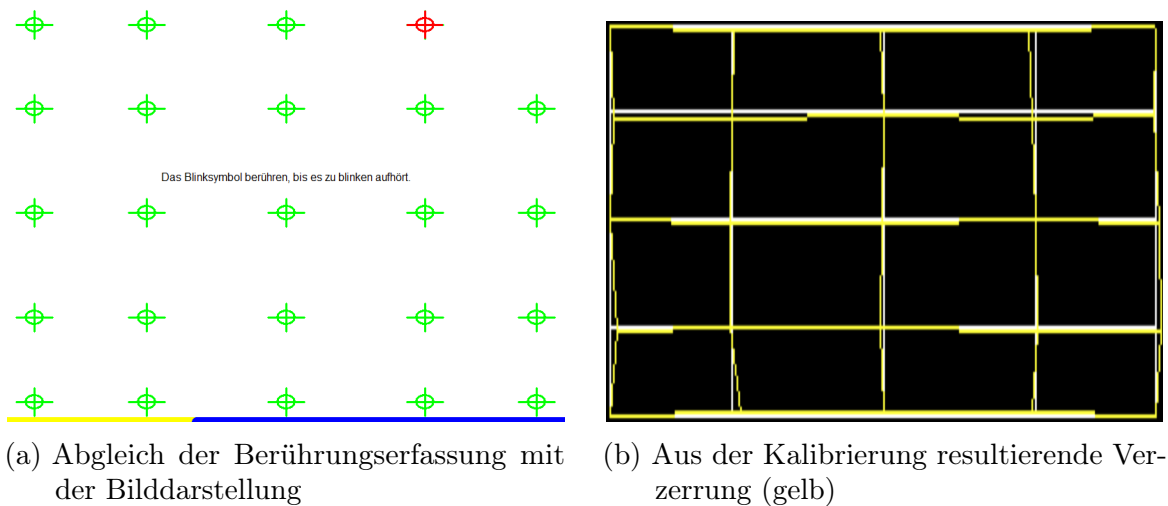


Abbildung 3.5: Kalibrierung eines Touchscreens mit der Software von Elo Touch Solutions (2013)

Im Freiheitsgrad des **Eingabemittels** unterscheiden sich die Technologien. Nicht jeder Touchscreen erfasst Berührungen von beliebigen Eingabemedien; so ist zum Beispiel nicht immer eine Eingabe mit Handschuh, Fingernagel, Kreditkarte oder Stift möglich (Schlegel 2013b). Abhilfe schaffen entweder entsprechende Touchscreen-technologien oder spezielle Handschuhe (Abbildung 3.6), wobei auch herkömmliche Handschuhe modifiziert werden können (Nanotips 2014).



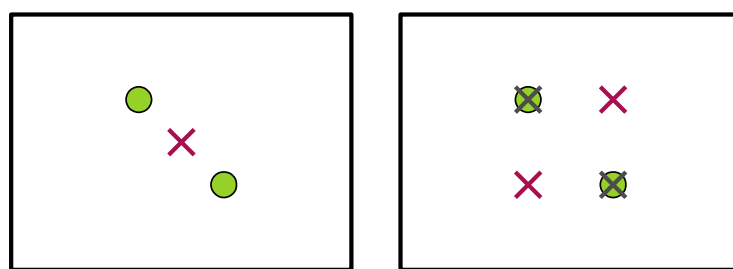
Abbildung 3.6: Touchscreeninteraktion mit speziellen leitfähigen Handschuhen (CC BY-SA 3.0 Snajarali)

Ein weiterer Unterschied liegt in der **Anzahl erfassbarer Berührungen**. Neben der beidhändigen oder Mehr-Finger-Interaktion eines Nutzers mittels Gesten (z. B. Zoomen und Drehen) ermöglichen Multitouchscreens die gleichzeitige Interaktion mehrerer Nutzer in Form einer touchscreen-vermittelten Kooperation, zum Beispiel wie in Ha et al. (2006) oder Abbildung 3.7 an einem Tabletop.



Abbildung 3.7: Simultane Touchscreeninteraktion mehrerer Nutzer mittels Multi-touch (CC BY-SA 2.0 themonnie)

Bei der Erfassung mehrerer Berührungen besteht bei einigen Technologien die Gefahr des sogenannten **Ghostings**. Dabei ergeben sich aus mehreren realen Berührungen funktionsprinzipbedingt durch Überlagerung und Verdeckung Koordinaten für Geisterberührungen an einer anderen Stelle des Touchscreens (Abbildung 3.8). Diese Geisterberührungen können Fehleingaben verursachen.



(a) Ghosting beim single-touch-fähigen Touchscreen

(b) Ghosting beim multi-touch-fähigen Touchscreen

Abbildung 3.8: Ghosting – Fingerberührungen (grün) werden vom Touchscreen fehlerhaft interpretiert (rot)



Auch im Bezug auf die Interaktionsformen gibt es technologiespezifische Unterschiede. Während das Zeigen und Tippen mit allen Technologien gut funktioniert, sind bei kontinuierlichen Bewegungen, wie bei **Drag-and-drop** (Abbildung 3.9) oder Gesten, technologische Unterschiede erkennbar, welche die notwendige unterbrechungsfreie Berührungserfassung beeinflussen.



Abbildung 3.9: Touchscreeninteraktion mittels Drag-and-drop (Henry 2010)

Die Berührung mit Fingern und der Einsatz in schmutzigen Umgebungen bzw. im Freien sind Ursachen für die **Verschmutzung** des Touchscreens (Abbildung 3.10), wodurch die Berührungserkennung je nach verwendeter Touchscreentechnologie unterschiedlich stark beeinflusst wird. Neben Einschränkungen der Genauigkeit ist auch der vollständige Ausfall der Berührungserfassung möglich.



Abbildung 3.10: Durch Fingerabdrücke verschmutzter Touchscreen (CC BY-SA 3.0 Sage Ross)



### 3.2.2 Analyse der technischen Realisierungen

Greenstein (1997) unterscheidet lediglich zwei Arten von Berührungserfassungen: kontaktbasierte Systeme mit einer zusätzlichen Schicht über der Anzeige oder unterbrechungsbasierte Systeme, bei denen Signale über der Anzeige zur Interaktion unterbrochen werden. Aktuell existieren weitere technologische Möglichkeiten zur Berührungserfassung, die z. B. im Fall von kapazitiven Touchscreens ohne kontakt- oder unterbrechungsbasierte Signale funktionieren. Die hier vorgestellten technologischen Möglichkeiten zur Berührungserfassung spiegeln den aktuellen Stand der Technik zum Zeitpunkt der Ausarbeitung wieder.

**Resistive Touchscreens** verfügen über eine drucksensible transparente Schicht, die vor dem gesamten Display angebracht ist (Greenstein 1997). Diese Schicht besteht aus zwei leitfähigen Lagen, die durch viele kleine Abstandshalter, sogenannte Spacer Dots, voneinander getrennt werden und jeweils unter Spannung stehen. Berührt ein Finger oder jeder andere Gegenstand mit dem notwendigen Druck die äußere nachgiebige Lage, verformt sich diese elastisch und es wird eine elektrische Verbindung hergestellt, die das vorhandene Spannungsgefälle in den beiden leitfähigen Schichten ändert. Auf Basis dieser Änderung generiert der Touchcontroller die Berührungskordinaten (Schenk & Rigoll 2010). Der beschriebene Aufbau ist in Abbildung 3.11 dargestellt.

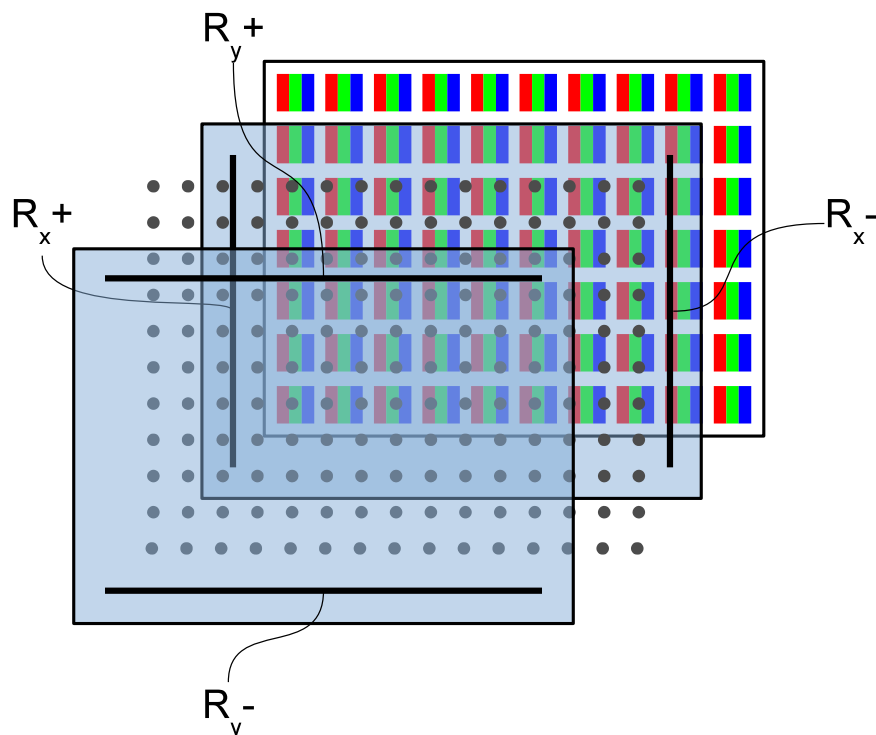


Abbildung 3.11: Schematischer Aufbau eines resistiven Touchscreens

Für die Eingabe mittels resistivem Touchscreen muss ein gewisser Druck auf die Oberfläche ausgeübt werden. Dies ist bei Interaktionen durch einfache Berührung mit dem Finger – auch mit Handschuhen – und nahezu beliebigen anderen Gegenständen, wie z. B. einem Zahnstocher, möglich. Interaktionen, die auf einer kontinuierlichen Bewegungserfassung basieren, z. B. das Navigieren in Menüstrukturen, Gesten oder das Betätigen eines Schiebereglers, sind nur schwer mit einem resistiven Touchscreen durchzuführen, da der notwendige Betätigungsdruck während der gesamten Interaktionsdauer nicht unterschritten werden darf (Jarausch 2010). Zudem können resistive Touchscreens prinzipbedingt nur eine einzelne Berührung erfassen. Bei mehreren adäquaten Berührungen wird vom Touchcontroller der Strecken- bzw. der Flächenschwerpunkt als Berührungskoordinate ausgegeben. Durch den zur Interaktion notwendigen Druck werden normale Verschmutzungen, wie z. B. Fingerrückstände, nicht als Berührung erfasst und stören auch die weitere Berührungserfassung nicht. Aus diesem Grund werden bevorzugt resistive Touchscreens in schmutzigen Umgebungen eingesetzt, z. B. als Kassensysteme, sogenannte Points of Sale, bei Fast-Food-Ketten oder bei Diagnosegeräten in Autowerkstätten. Da die berührungserfassende Technik bei resistiven Touchscreens als Schicht über dem Display liegt und zudem noch aus mehreren Lagen besteht, wird die optische Qualität der elektronischen Anzeige negativ beeinflusst. Resistive Touchscreens sind deshalb nur sehr bedingt sonnenlichttauglich.

Bei einem **kapazitiven Touchscreen** kann man zwischen zwei Funktionsprinzipien unterscheiden: Surface Capacitive und Projected Capacitive Touchscreens. Surface Capacitive Touchscreens weisen eine äußere leitende Glasschicht und je eine Elektrode an den vier Ecken des Displays auf. Durch das Anlegen einer Spannung an die Elektroden wird auf der leitenden Glasschicht ein einheitliches elektrisches Feld erzeugt. Berührt ein ausreichend leitendes Objekt die Oberfläche, wird ein Teil der Ladung des elektrischen Feldes abgeführt. Anhand der Verteilung dieser Ladungsänderung auf die Elektroden wird die Position der Berührung ermittelt (Phares & Fihn 2012). Abbildung 3.12a auf S. 78 umfasst den Aufbau von Surface Capacitive Touchscreens.

Bei Projected Capacitive Touchscreens befinden sich vor dem gesamten Display zwei Glasschichten, getrennt durch ein leitfähiges Gitter. Dieses Gitter dient als Elektrode und wird mit einer Wechselspannung beaufschlagt. Kommt es zu einer Berührung mit einem leitfähigen Material, baut sich zwischen dem leitfähigen Gitter und dem Eingabemittel eine Kapazität auf, wodurch sich die Position der Berührung ermitteln lässt (Jarausch 2010, Laufs et al. 2010). Der Aufbau ist in Abbildung 3.12b auf S. 78 dargestellt. Unter der Bezeichnung On-Cell Charge Sensing (Abbildung 3.12c auf S. 78) existiert eine Variante der Projected Capacitive Touchscreens, bei der das leitfähige Gitter direkt auf dem Glasfiltersubstrat des Displays aufgebracht ist, statt eine zusätzliche Glasschicht zu benötigen (Walker & Fihn 2010).

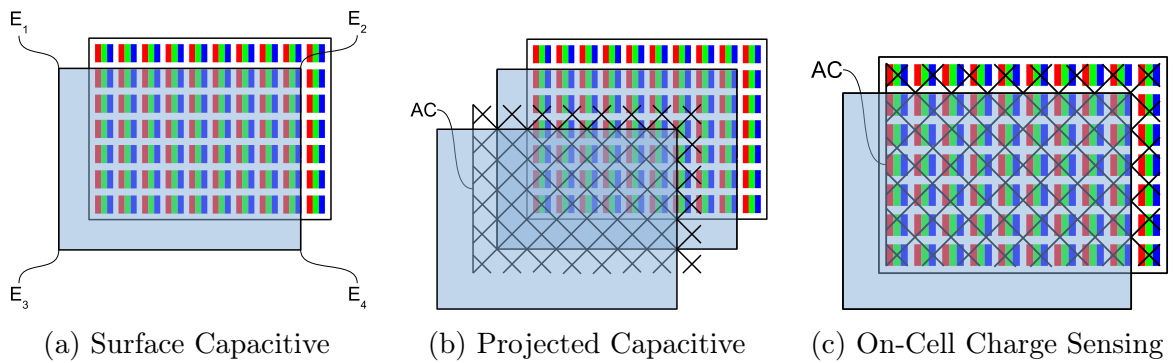


Abbildung 3.12: Schematischer Aufbau kapazitiver Touchscreens

Neben den möglichen kompakten Bauformen bieten Surface Capacitive Touchscreens eine sehr gute optische Transparenz (Holzinger 2003, Schöning et al. 2008) und sind dadurch auch im Sonnenlicht gut ablesbar. Es werden lediglich Berührungen von leitenden Eingabemitteln erfasst (Holzinger 2003, Schöning et al. 2008), so dass die Benutzung von kapazitiven Touchscreens mit Handschuhen nicht ohne Weiteres möglich ist. Durch die Glasschichten, die bei Projected Capacitive Touchscreens bis zu 20 Millimeter dick sein dürfen, weisen kapazitive Touchscreens eine hohe Beständigkeit gegenüber mechanischen Einflüssen und Verschmutzungen auf. Surface Capacitive Touchscreens verfügen im Gegensatz zu Projected Capacitive über eine sehr genaue Berührungserfassung. Durch die On-Cell-Technologie entfällt der Abstand zwischen Display und berührungssensitiver Schicht.

Bei Touchscreens mit einer akustischen Berührungserfassung mittels Oberflächenwellen, sogenannten **Surface Acoustic Wave-Touchscreens (SAW)**, befinden sich an den Rändern eines Glassubstrats Ultraschallwellensignalgeber und auf der jeweils gegenüberliegenden Seite piezoelektrische Empfängersensoren (Phares & Fihn 2012). In Abbildung 3.13 ist der Aufbau schematisch dargestellt.

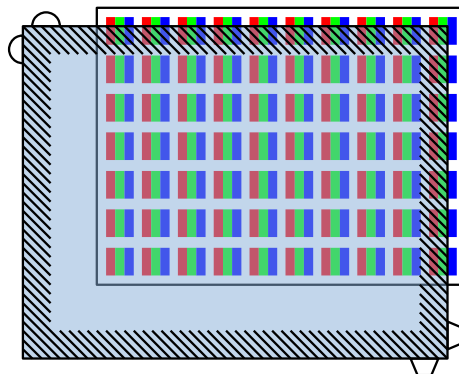


Abbildung 3.13: Schematischer Aufbau eines SAW-Touchscreens

Die künstlich erzeugten Ultraschallwellen werden bei einem SAW-Touchscreen von der Oberfläche des Substrats reflektiert und können auf der gegenüberliegenden Seite empfangen werden. Bei Berührung der Oberfläche mit einem Finger oder einem anderen weichen Medium wird ein Teil der akustischen Energie absorbiert und die Amplitude der Ultraschallwellen verkleinert. Durch einen Abgleich der gemessenen Amplitude und der Sollamplitude wird die Berührungsposition ermittelt (Schöning et al. 2008, Holzinger 2003).

Da bei SAW-Touchscreens nur eine einfache Glasplatte das Display abdeckt, weisen diese Touchscreens eine sehr gute optische Darstellungsqualität auf. Zudem sind sie schmutzunempfindlich und bei entsprechendem Glas auch vandalismusgeschützt. Für eine Eingabe ist ein Finger, ggf. auch mit einem weichen Handschuh, oder andere schallabsorbierende Gegenstände als Eingabemittel notwendig. Bei einer Anwendung im Freien oder in Feuchträumen ist baulich darauf zu achten, dass die SAW-Oberfläche trocken bleibt, da auch Wassertropfen die Schallwellen absorbieren. Die meisten SAW-Systeme können zumindest zwei Berührungspunkte gleichzeitig erfassen (Schöning et al. 2008).

Die akustische Impulserkennung, auch **Acoustic Pulse Recognition (APR)** ähnelt im Aufbau der Oberflächenwellentechnologie (Phares & Fihn 2012). Anstatt der verwendeten Sender und Empfänger kommen bei dieser Technologie lediglich vier an den Kanten der Glasscheibe angebrachte Empfänger zum Einsatz. Abbildung 3.14 zeigt den schematischen Aufbau eines solchen Systems. Durch Berührung der Glasscheibe wird ein akustisches Signal erzeugt, das von den Empfängern aufgenommen und digitalisiert wird. Anschließend wird das aufgenommene Signal vom Touchcontroller mit dem hinterlegten spezifischen Klangprofil des Touchscreens verglichen. Das Klangprofil sorgt ebenfalls dafür, dass Fremd- und Umgebungsgeräusche ignoriert werden, da sie nicht mit diesem übereinstimmen (Walker 2006).

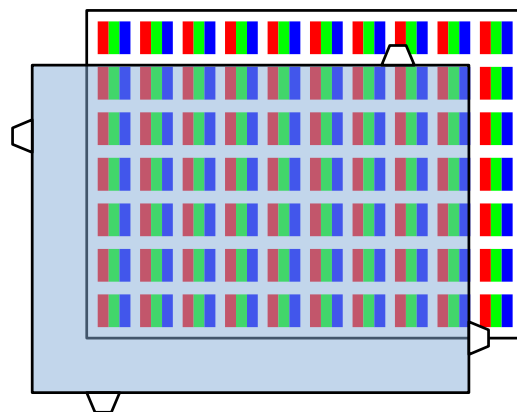


Abbildung 3.14: Schematischer Aufbau eines APR-Touchscreens

APR-Touchscreens benötigen vor dem Display lediglich eine Glasschicht, welche die optische Darstellungsqualität kaum beeinflusst. Die Glasoberfläche macht den Touchscreen resistent gegen Kratzer, Wasser und andere Verunreinigungen. Die Eingabe ist neben dem Finger und dem Fingernagel auch mit nahezu allen anderen härteren Gegenständen möglich. Neben dem einfachen Antippen eignen sich APR-Touchscreens auch für Eingaben, die das Ziehen des Fingers erfordern.

Eine weitere Möglichkeit zur Erfassung von Positionskoordinaten vor einer Displayfläche stellt eine optische Berührungserfassung mittels **Infrarotgitter** dar. Das Infrarotgitter, auch Lichtvorhang genannt, setzt sich aus einer hohen Anzahl Lichtschranken zusammen, die das Display in horizontaler und vertikaler Richtung überspannen (Phares & Fihn 2012). Die dazu notwendigen Infrarotleuchtdioden und Fotosensoren sind in einem wenige Millimeter dicken Rahmen untergebracht, der am Displayrand angebracht ist (Abbildung 3.15). Nähert sich ein Gegenstand oder ein Finger der Anzeige, werden mindestens zwei dieser Lichtschranken unterbrochen und so die Positionskoordinaten der Unterbrechung ermittelt (Phares & Fihn 2012). Diese Art von Touchscreens befindet sich schon seit den 70er Jahren in Anwendung, siehe z. B. Smith & Sherwood (1976).

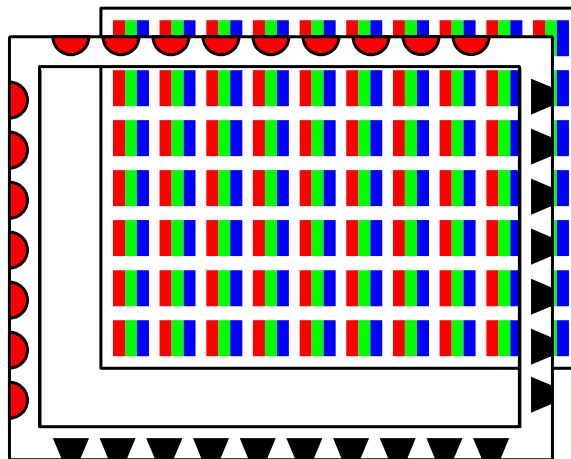


Abbildung 3.15: Schematischer Aufbau eines Touchscreens mit Infrarotgitter

Da die Technik zur Berührungserfassung bei Touchscreens mit einem Infrarotgitter außerhalb des Displaybereichs angebracht ist, wird die optische Darstellung nicht beeinträchtigt. Da normale Displays fast ausschließlich über eine weiche Kunststoffoberfläche verfügen, ist für die Touchscreeninteraktion eine weitere schützende Schicht hoher optischer Güte notwendig. Die Abmessungen der verwendeten Leuchtdioden und Photosensoren begrenzen die räumliche Auflösung bei der Berührungserfassung und geben die Baugröße für den Rahmen vor. Dieser muss so gestaltet sein, dass die Fotosensoren ausreichend vor dem Infrarotanteil der Umgebungsbeleuchtung

abgeschirmt sind. Dies bedingt eine minimal mögliche Baugröße von einigen Millimetern, die dafür sorgt, dass die Position eines Fingers nicht erst beim Berühren der Displayoberfläche erfasst wird, sondern schon kurz davor. Diese Art der Positionserfassung ermöglicht die Interaktion mit mehr als einem Finger (Laufs et al. 2010).

Die Berührungserfassung mittels **digitaler Bildverarbeitung** basiert ebenfalls auf einer Beleuchtung im Infrarotbereich, allerdings erfolgt die Detektion im Gegensatz zum Infrarotgitter nicht über Fotosensoren sondern über eine beleuchtete Mattscheibe, die von hinten mit einer Kamera abgefilmt wird. Bei Berührung der Mattscheibe entsteht an der Stelle der Berührung eine helle Fläche, deren Position mittels digitaler Bildverarbeitung aus dem erfassten Kamerabild ermittelt wird (Phares & Fihn 2012). Das Verfahren setzt auf eine Rückprojektion zur Bilderzeugung, statt auf ein herkömmliches Display. Um den Bauraum zu minimieren, werden die Strahlengänge von Projektor und Kamera über einen oder mehrere Spiegel umgelenkt. Dennoch sind diese Touchscreens bauartbedingt sehr groß, so dass sie als Tisch oder Wand konzipiert werden.

Bei der Art der Infrarotbeleuchtung kann man vier Typen unterscheiden. In der ersten Variante wird die Mattscheibe von einem oder mehreren Infrarotlampen in der Nähe des Projektors von hinten möglichst gleichmäßig diffus beleuchtet (Abbildung 3.16a auf S. 82). Diese Technologie wird daher auch als Diffused Illumination (DI) bezeichnet (Chang et al. 2010). Eine andere Möglichkeit der Infrarotbeleuchtung stellt die Frustrated Total Internal Reflection (FTIR) dar (Han 2005). Die Infrarotlichtquelle besteht aus mehreren Infrarotleuchtdioden, die seitlich in die Mattscheibe integriert sind und so strahlen, dass es an der oberen und unteren Grenzfläche der Mattscheibe zur Totalreflektion kommt (Abbildung 3.16b auf S. 82). Erst bei Berührung wird das Licht an der Berührungsfläche so gebrochen, dass es in Richtung der Kamera reflektiert wird (Chang et al. 2010). Eine dritte Beleuchtungsart nutzt Infrarotlaser statt der Leuchtdioden und wird deshalb als Laser Light Plane (LLP) bezeichnet (Laufs et al. 2010). Durch den Laser wird bei LLP-Touchscreens eine Fläche knapp über der Mattscheibe aufgespannt (Abbildung 3.16c auf S. 82), die bei einer Berührung durchbrochen wird. Dabei wird das Licht des Lasers in Richtung der Kamera reflektiert. Die Technologie der Diffused Surface Illumination (DSI) nutzt einen ähnlichen Aufbau wie die FTIR-Touchscreens. Es kommt lediglich eine Mattscheibe aus Kunststoff zum Einsatz, die kleinste Partikel enthält, um das seitlich eingestrahlte Infrarotlicht so zu brechen, dass ähnlich zu DI-Touchscreens eine gleichmäßig beleuchtete Fläche entsteht (Abbildung 3.16d auf S. 82, Phares & Fihn 2012). Das Ergebnis aller vier Beleuchtungsvarianten ist eine Veränderung der Lichtverteilung an der Stelle einer Berührung, deren Position und Größe mittels digitaler Bildverarbeitung ermittelbar sind.

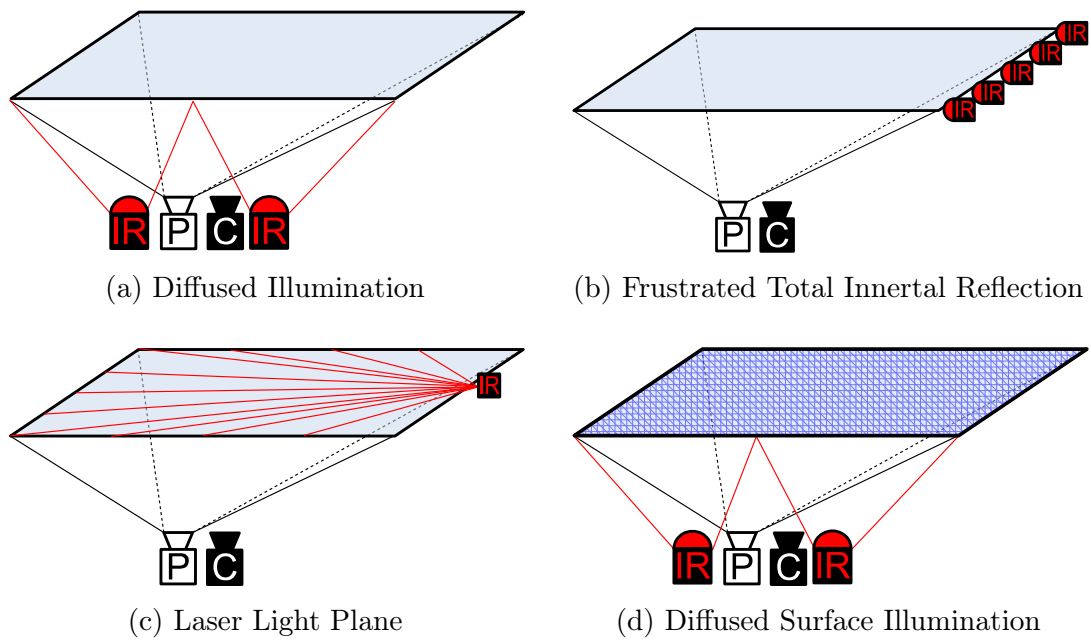
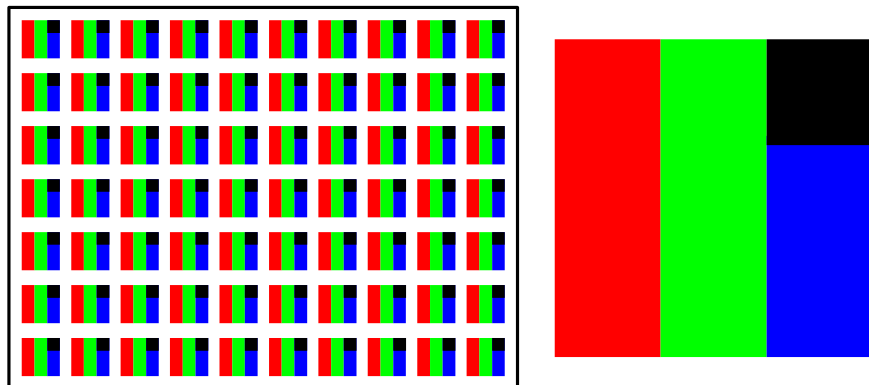


Abbildung 3.16: Schematischer Aufbau von Touchscreens auf Basis der digitalen Bildverarbeitung

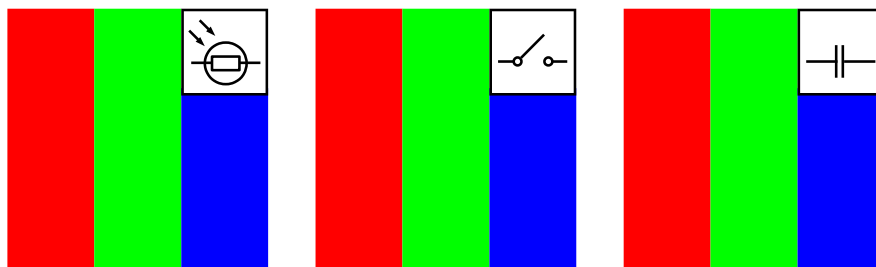
Die zeitliche Auflösung der Berührungserfassung ist abhängig von der Framerate, die mittels digitaler Bildverarbeitung zu bewältigen ist (Laufs et al. 2010). Der gesamte Aufbau ist im Vergleich zu den anderen Technologien zur Berührungserfassung sehr aufwändig. Neben der notwendigen Kalibrierung muss darauf geachtet werden, dass Kamera und Projektor korrekt ausgerichtet und alle optischen Elemente ausreichend staubfrei sind, da Verschmutzungen sonst als zusätzlicher Berührungen erkannt werden (Phares & Fihn 2012). Der Raum unter einem solchen tischartigen Touchscreen wird von der Technik zur Bildprojektion und Berührungserfassung benötigt (Laufs et al. 2010), so dass man nicht bequem am Tisch sitzen kann. Sinnvoll sind daher eher Geräte im Format eines Stehtisches oder einer Wand. Die Größe und die Fähigkeit dieser Art von Touchscreens, mehrere Berührungen erfassen zu können, ermöglicht es mit mehr als einer Person mit dem Touchscreen oder durch den Touchscreen und eine Anwendungssoftware, wie zum Beispiel ein Spiel, untereinander zu interagieren (Boetzer et al. 2008, Laufs et al. 2010).

Bei einer sehr jungen Technologie werden die Touchsensorelemente direkt in die Pixel des Displaysubstrats integriert (Phares & Fihn 2012). Das Sensorelement bildet zusammen mit den Subpixeln für die Farben rot, grün und blau sowie ggf. einem zusätzlichen weißen Subpixel einen Pixel des Displays (Abbildung 3.17a). Diese Art von Touchscreens wird daher auch **In-Cell-Touchscreens** genannt. In Abhängigkeit der verwendeten Touchsensorelemente lassen sich drei Varianten unterscheiden:

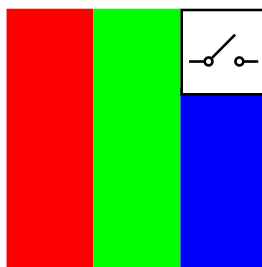
Light Sensing, Voltage Sensing und Charge Sensing (Walker & Fihn 2010, Phares & Fihn 2012). Beim Light Sensing ist der Touchsensor ein Photosensor, der auf das vom Eingabemedium reflektierte Displaylight reagiert. Damit auch bei schwarzem Bildschirm eine Berührung detektiert werden kann, wird eine Displayhintergrundbeleuchtung mit erhöhtem Infrarotanteil und darauf abgestimmte Photosensoren verwendet (Abbildung 3.17b, Walker & Fihn 2010, Phares & Fihn 2012). Das Voltage-Sensing-Verfahren nutzt einen Mikroschalter, der in einem Pixel integriert ist und durch die Berührung mit dem Eingabemedium geschlossen wird (Abbildung 3.17c, Walker & Fihn 2010, Phares & Fihn 2012). Für das Charge-Sensing-Verfahren werden in einen Pixel ein Abstandshalter und eine Sendeelektrode unterhalb des Farbfilterglases integriert (Abbildung 3.17d, Walker & Fihn 2010, Phares & Fihn 2012). Auf dem Display-Substrat wird eine Empfangselektrode angebracht. Durch eine mit Druck ausgeführte Berührung verringert sich durch elastische Dehnung der Abstand zwischen Empfangs- und Sendeelektrode und verändert dadurch auch das dort bestehende elektrische Feld. Aus dieser Veränderung des elektrischen Feldes wird die Position der Berührung ermittelt. Da die Ausübung von leichtem Druck zur Eingabe notwendig ist, spricht man bei dieser Art der Berührungserfassung auch vom Pressed-Capacitive-Verfahren (Walker & Fihn 2010).



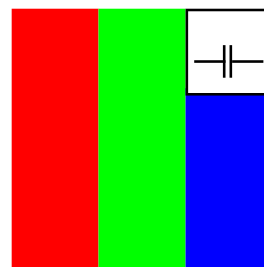
(a) Prinzip der Integration der Berührungserfassung in die Pixel des Bildschirmsubstrates



(b) Light Sensing



(c) Voltage Sensing



(d) Charge Sensing

Abbildung 3.17: Schematischer Aufbau von In-Cell-Touchscreens



Bei In-Cell-Touchscreens besteht prinzipiell die Möglichkeit, die Berührungsposition pixelgenau zu ermitteln (Phares & Fihn 2012). Allerdings werden aktuell nicht einzelne Pixel eines In-Cell-Touchscreens mit Sensorelementen ausgestattet, sondern Pixelgruppen (Walker & Fihn 2010), was zu einer geringeren räumlichen Auflösung der Berührungserfassung führt. Da die berührungsempfindlichen Sensorelemente fest in das Display integriert sind, ist keine Kalibrierung des Touchscreens nötig. In-Cell-Touchscreens nach dem Voltage-Sensing-Verfahren benötigen zur Eingabe einen gewissen Druck um die Mikroschalter zu schließen. Zudem kann vor dem Display keine zusätzlich schützende Glasschicht aufgebracht werden, wodurch diese Touchscreens eine geringe Robustheit und leichte Zerstörbarkeit aufweisen.

## 3.3 Rückmeldungen

Rückmeldungen sind dynamische kontextsensitive Hinweise über Auswirkungen und Folgen einer Interaktion (DIN EN ISO 9241-16). Es handelt sich also bei Rückmeldungen um wahrnehmbare Systemreaktionen auf Benutzereingaben oder Systemereignisse (DIN EN ISO 9241-13). Bereits Shneiderman (1983) führte unmittelbare Rückmeldung als grundlegendes Prinzip direkter Manipulation mittels grafischer Benutzungsschnittstellen auf. Diese Rückmeldungen müssen bei Touchscreensystemen künstlich erzeugt werden. Zur Rückmeldung einer Touchscreeneingabe oder des Systemzustandes können vom Touchscreensystem mehrere Modalitäten angesprochen werden (Geldard 1960, Hill & Grieb 1988, Ferris & Sarter 2008, Kauer et al. 2009). Aktuell verfügbare Touchscreensysteme nutzen fast ausschließlich eine Kombination aus visueller und auditiver Eingaberückmeldung. Visuelle Rückmeldungen sind eine notwendige Voraussetzung für Touchscreensysteme, da die Touchscreeninteraktion auf einer grafischen Darstellung des Systems basiert. Beispiele für visuelle Rückmeldungen sind die sofortige Anzeige von eingegebenen Zeichen auf dem Bildschirm oder die Anzeige einer Meldung, die mitteilt, dass eine Eingabe erkannt wurde bzw. vom System auch ausgeführt wird (DIN EN ISO 9241-13). Komplexe visuelle Rückmeldungen können allerdings dazu führen, dass die Fehlerrate bei Touchscreeneingaben ansteigt, weshalb Lin & Wua (2013) zur Vorsicht bei der Nutzung mahnen.

Die Realisierung visueller Rückmeldungen ist von den technischen Möglichkeiten der Bilderzeugung und der Softwareimplementierung abhängig. Da die Analyse der technologieabhängigen Interaktionsmöglichkeiten und -einschränkungen der Bilderzeugung bereits durch die Ausführungen in Abschnitt 3.1 abgedeckt wurden und auf die technischen Möglichkeiten der jeweiligen Softwareimplementierung später in Abschnitt 3.4 gesondert eingegangen wird, wurden visuelle Rückmeldungen an dieser Stelle nicht zusätzlich berücksichtigt. Zur technischen Realisierung künstlicher auditiver Rückmeldungen wurde nach dem Stand der Arbeit ausschließlich

die elektromechanische Schallwandlung eingesetzt, bei der elektrische Signale in mechanische Schwingungen umgewandelt werden (Peres et al. 2008). Diese Schwingungen werden über eine Membran auf die Luft übertragen, wodurch Schallwellen entstehen, die der Mensch wahrnehmen kann (vgl. Unterabschnitt 2.5.1). Durch die fehlende Diversifikation der technischen Realisierungsmöglichkeiten auditiver Rückmeldungen erübrigte sich die ursprünglich angedachte Analyse für diese Rückmeldungsmodalität. Der olfaktorische oder gustatorische Sinneskanal wird bisher lediglich für Studien abseits der Touchscreeninteraktion mit Hilfe von prototypischen Laboraufbauten genutzt, z. B. bei der gustatorischen Anzeige von Narumi et al. (2011). Da entsprechend ausgerüstete Touchscreens zum Stand der Arbeit nicht absehbar waren, wurden Technologien zur Erzeugung gustatorischer oder olfaktorischer Rückmeldungen ausgeklammert. Systeme mit haptischer Rückmeldung sind aktuell am Ende des Laborstadiums oder kurz vor der Markteinführung. Zudem bestehen für die Realisierung haptischer Rückmeldung mehrere technische Möglichkeiten (z. B. Jones & Sarter 2008, Banter 2010), die die Interaktion unterschiedlich beeinflussen. Aus den genannten Gründen wurde die Analyse künstlich erzeugter Rückmeldungen ausschließlich auf haptische Rückmeldungen fokussiert.

### 3.3.1 Herleitung der Analysekriterien

Für die Gestaltung von Rückmeldungen für interaktive Systeme sind allgemeine Kriterien zu berücksichtigen, die sich an der Leistungsfähigkeit der menschlichen Wahrnehmung orientieren (Heinecke 2004). Zu diesen zählen die Grundsätze der Informationsdarstellung nach DIN EN ISO 9241-12, da diese mit Ausnahme des Grundsatzes der Leserlichkeit so formuliert sind, dass sie nicht nur für visuelle Rückmeldungen sondern auch bei der Nutzung anderer Wahrnehmungsmodalitäten anwendbar sind (Heinecke 2004). Die allgemeinen Grundsätze wurden bereits in Unterabschnitt 2.6.3 erläutert.

Um dem Grundsatz der Klarheit gerecht zu werden, muss eine haptische Rückmeldung eine geringe Latenz sowie eine angemessene zeitliche Auflösung aufweisen. Die **Latenz** umfasst den zeitlichen Abstand zwischen Eingabe und Rückmeldung (Sherman & Craig 2002) und wird bei künstlichen Rückmeldungen durch die Verarbeitungszeit der Eingabe und die Trägheit des Systems verursacht. Durch geeignete Maßnahmen ist diese Latenz so gering zu halten, dass die Rückmeldung der jeweiligen Eingabe noch zugeordnet werden kann. Dies ist gemäß MIL-STD-1472G bei  $\Delta t \leq 100$  ms der Fall. Erschwerend ist bei der Touchscreeninteraktion die Dauer der Berührung zeitlich begrenzt, so dass nur eine begrenzte Zeitspanne für eine haptische Rückmeldung zur Verfügung steht. Findet eine Touchscreeneingabe mittels Antippen statt, dauert die Berührung der Fingerkuppe auf dem Touchscreen im

Mittel  $t = 169$  ms, mindestens jedoch  $t_{min} = 80$  ms (Seeger et al. 2015). Daher sollte die technische Realisierung der künstlichen Rückmeldung eine Latenz von deutlich weniger als  $t_{min} = 80$  ms ermöglichen, so dass auch bei minimaler Berührungsdauer noch ausreichend Zeit für eine haptische Rückmeldung bleibt. Die **zeitliche Auflösung** einer haptischen Rückmeldung orientiert sich an der Leistungsfähigkeit der menschlichen Wahrnehmung für diese Modalität (Sherman & Craig 2002). Gemäß den in Unterabschnitt 2.5.1 dargelegten Grundlagen zur Leistungsfähigkeit der haptischen Wahrnehmung werden taktile Reize bis zu einer Frequenz von  $f_{tak} \leq 1000$  Hz wahrgenommen wobei der optimale Frequenzbereich bei  $200 \text{ Hz} < f_{opt} < 300 \text{ Hz}$  liegt. Die kinästhetische Wahrnehmung ist im Bereich  $10 \text{ Hz} < f_{kin} < 30 \text{ Hz}$  möglich. O'Malley & Gupta (2008) empfehlen zum Sicherstellen des Benutzerkomforts diese Frequenzen bei einer künstlichen haptischen Rückmeldung nicht zu überschreiten.

Um eine Unterscheidbarkeit haptischer Rückmeldungen zu gewährleisten, sind die Auflösung der Intensität, die Pause zwischen zwei Reizen und die räumliche Auflösung entscheidend. Die **Auflösung der Intensität** der haptischen Rückmeldung orientiert sich an der Differenzschwelle (vgl. Unterabschnitt 2.5.1) der haptischen Wahrnehmung (O'Malley & Gupta 2008). Diese Intensitätsauflösung beträgt bei der Erzeugung von Kräften 5 %, bei der Darstellung von Massen 10 % und für eine Viskosität 34 % oder weniger (O'Malley & Gupta 2008). Um zwei getrennte taktile Reize über die Hautrezeptoren wahrnehmen zu können, muss zwischen diesen eine Pause von mindestens 5,5 ms Dauer liegen (Hale & Stanney 2004). Die **räumliche Auflösung** des technischen Systems zur Erzeugung der haptischen Rückmeldung sollte nach Sherman & Craig (2002) besser sein als die simultane Raumschwelle des Menschen. Diese liegt im Bereich der Fingerspitzen bei 2,3 mm (vgl. Unterabschnitt 2.5.1). Die Darstellbarkeit von harten Oberflächen ist durch die mögliche räumliche Auflösung der haptischen Rückmeldung begrenzt (DIN EN ISO 9241-910). So sind mit niedriger räumlicher Auflösung lediglich weiche Oberflächen darstellbar (DIN EN ISO 9241-910).

Die Kompaktheit spielt gerade bei haptischen Rückmeldungen eine große Rolle, da die simultane Wahrnehmung haptischer Reize nur eingeschränkt möglich ist. So können gleichzeitige oder schnell nacheinander folgende Stimuli zu Überlagerungen (DIN EN ISO 9241-910) und auf diese Weise zum Verblässen der kodierten Information führen (Loomis 1981). Es empfiehlt sich daher, zu jedem Zeitpunkt jeweils nur eine Systeminformation mit einer haptischen Rückmeldung zu kodieren.

Um bei haptischen Rückmeldungen den Grundsatz der Konsistenz zu erfüllen, ist eine systemweit einheitliche, aufgabenangemessene und erwartungskonforme Informationskodierung notwendig. Die bereits beschriebenen Grundsätze der Klarheit und Unterscheidbarkeit bilden dafür die grundlegenden Voraussetzungen.

Eine Erkennbarkeit von haptischen Rückmeldungen kann über die **Intensität** erreicht werden, indem bereits die Mindestkraft oder das Mindestdrehmoment der jeweiligen technischen Realisierung einer haptischen Rückmeldung (vgl. DIN EN ISO 9241-910) die Absolutschwelle der menschlichen Wahrnehmung (vgl. Unterabschnitt 2.5.1) übersteigt. Hale & Stanney (2004) empfehlen zur Überschreitung der individuellen Reizschwelle einen Druck von  $0,06 \leq p_{\min} \leq 0,2 \text{ N cm}^{-2}$ . Während dies die untere Grenze der Intensität einer haptischen Rückmeldung darstellt, ist auch die obere Intensitätsgrenze in Form von Spitzenkraft bzw. Spitzendrehmoment der technischen Realisierung quantifizierbar (DIN EN ISO 9241-910).

Die **Verständlichkeit** einer haptischen Rückmeldung kann gefördert werden, wenn haptische Muster verwendet werden, die dem Benutzer bereits bekannt sind (DIN EN ISO 9241-920). Die auf diese Weise unterstützte Erwartungskonformität fördert die intuitive Interaktion (vgl. Unterabschnitt 2.5.2).

Einige Eigenschaften haptischer Rückmeldungen lassen sich nicht den allgemeinen Gestaltungsgrundsätzen zuordnen, sondern ergänzen diese. Aus diesen Eigenschaften ergeben sich folgende spezifische Beurteilungskriterien für haptische Rückmeldungen: Wahrnehmungsmodalität, Anzahl der Ausgabekanäle und Steifigkeit.

Ein erstes spezifisches Kriterium haptischer Rückmeldungen ist die genutzte **Wahrnehmungsmodalität**. Dabei kann zwischen kinästhetischen oder taktilen Stimuli unterschieden werden (vgl. Unterabschnitt 2.5.1, Sherman & Craig 2002).

Für Touchscreens besonders relevant ist die mögliche **Anzahl der Ausgabekanäle** der haptischen Rückmeldung (Sherman & Craig 2002). Die Ursache hierfür liegt in der Fähigkeit moderner Touchscreens zur gleichzeitigen Erfassung multipler Berührungen (vgl. Abschnitt 3.2). Neben mehreren Fingern einer Hand existieren moderne Touchscreensysteme, welche die Interaktion mit beiden Händen oder mit mehreren Händen unterschiedlicher Benutzer ermöglichen (vgl. Unterabschnitt 3.2.1).

Ein wichtiger Aspekt der Natürlichkeit kraftrückmeldender Systeme ist die **Steifigkeit** des Systems (Sherman & Craig 2002, DIN EN ISO 9241-910), die nach Tan et al. (1994) im Mittel  $K = 242 \text{ N cm}^{-1}$  betragen muss, damit das System bei Krafteinwirkung durch den Nutzer als steif empfunden wird. Diese Steifigkeit hängt nach Sherman & Craig (2002) entscheidend vom Kraftfluss („Grounding“) des technischen Systems ab. Systeme, bei denen sich die Kraft und Gegenkraft innerhalb des Systems gegenseitig aufheben, bezeichnet Sherman & Craig (2002) als „Self-grounded“ wohingegen Systeme, die einwirkende Kräfte durch eine mechanische Aufhängung auf die Umgebung ableiten, als „World-grounded“ bezeichnet werden.

Zusätzlich zu dem bisher genannten Beurteilungskriterien ergeben sich aus den mechanischen Grundlagen zur technischen Realisierung haptischer Rückmeldungen

weitere Artefakte, welche die Interaktion beeinflussen können und somit als Beurteilungskriterium herangezogen wurden. So sind haptische Rückmeldungen, die auf mechanischen Schwingungen basieren, aus mehreren Gründen als kritisch anzusehen (Kern 2009). Durch das Prinzip der Erzeugung kann es zu Überlagerungen und damit zur Verstärkung oder Auslöschung der Schwingung kommen. Zudem wird die Schwingung bei der Berührung durch die individuellen Dämpfungseigenschaften des menschlichen Körpers beeinflusst, so dass nicht mehr davon ausgegangen werden kann, dass die Empfindung tatsächlich der technisch erzeugten Schwingung entspricht. Fällt die Resonanzfrequenz des Systems durch eine ungünstige Dimensionierung mit der Frequenz der mechanischen Schwingung zusammen, entsteht eine resultierende Frequenz, die wie bei der Dämpfung nicht der erzeugten Schwingung entspricht.

Der Freiheitsgrad eines haptischen Systems (Sherman & Craig 2002, DIN EN ISO 9241-910) eignet sich nicht als Analyse Kriterium für Touchscreensysteme, da für die Interaktion generell die zwanglose freie Bewegung der interagierenden Hand erwünscht ist. Mit der Fingerkuppe sind neben den Translationen in den drei Raumachsen (Freiheitsgrad +3) auch die Rotationen um diese drei Raumachsen möglich (Freiheitsgrad +3). Erst bei der Berührung wird der Freiheitsgrad des Fingers durch den physischen Widerstand des Touchscreensystems und der Reibung auf der Touchscreenoberfläche eingeschränkt.

Die von Challis & Edwards (2001) für blinde Benutzer formulierte Einschränkung, dass lediglich statische Informationen haptisch kodiert werden können, trifft für sehende Menschen bei der Interaktion mit einem Touchscreen nicht zu, da die haptische Rückmeldung durch zusätzliche visuelle Reize unterstützt werden kann.

#### 3.3.2 Analyse der technischen Realisierungen

Für die künstliche Erzeugung einer haptischen Rückmeldung zur Signalisierung einer erfolgten Touchscreeneingabe werden mehrere Ansätze verfolgt. Die einfachste Möglichkeit zur Erzeugung von mechanischen Reizen ist die Nutzung **elektromechanischer Aktuatoren** (DIN EN ISO 9241-910) – so genannter Tactors, wie zum Beispiel Vibrationsmotoren, piezoelektrische Biegeaktoren, Schwing- und Magnetspulen oder elektroaktive Polymeraktoren (Immersion 2012, Kern 2009, Banter 2010, DIN EN ISO 9241-910, Choi & Kuchenbecker 2012). Diese elektromechanischen Aktuatoren befinden sich in der Nähe der Displayoberfläche (Nichols 2007, Melkus 2011) und erzeugen Oberflächenbewegungen in normaler oder seitlicher Richtung (Bau et al. 2010). Charakteristisch für diese Art von Aktuatoren ist die Eigenschaft, dass sich zwei Teile relativ zueinander bewegen (Choi & Kuchenbecker 2012). Elektromagnete und Piezoaktuatoren werden zwischen dem Touchscreen und einer starren Lagerung befestigt, so dass sie in der Lage sind, die Oberfläche des Touchscreens

relativ zu dieser Lagerung zu bewegen (Banter 2010, Choi & Kuchenbecker 2012). Vibrationsmotoren (Abbildung 3.18) werden so am Touchscreen angebracht, dass eine exzentrisch gelagerte Masse frei rotieren kann und so entstehende Radialkräfte auf den Touchscreen übertragen werden (Banter 2010, Choi & Kuchenbecker 2012). Die steife mechanische Kopplung der elektromechanischen Aktuatoren ist notwendig, um eine Kraft auf den menschlichen Körper ausüben zu können (O'Malley & Gupta 2008), bedingt aber, dass der wahrnehmbare taktile Effekt indirekt proportional zur Masse des Touchscreens (Choi & Kuchenbecker 2012).

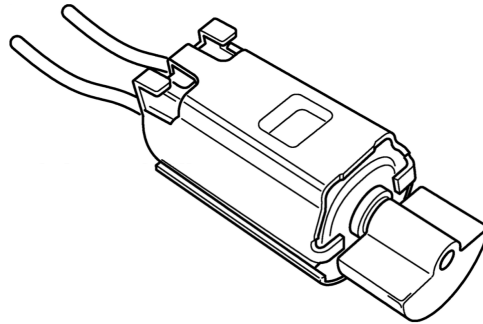


Abbildung 3.18: Vibrationsmotor als Aktuator elektromechanisch erzeugter Rückmeldungen (DIN EN ISO 9241-910, S. 44)

Die elektromechanisch erzeugten Stimuli entsprechen einem adäquaten Reiz (vgl. Abschnitt 2.5) und lassen sich in den Dimensionen Ort, Intensität, Dauer und Frequenz sowie deren zeitlichen Variationen differenzieren, so dass ein ausreichend hoher Freiheitsgrad für eine eigene komplexe Vibrationssprache vorhanden ist (Geldard 1960, Jones & Sarter 2008). Die Nutzung elektromechanischer Aktuatoren ist eine geeignete Möglichkeit, das fehlende taktile Feedback von Touchscreens so weit zu kompensieren, dass Dateneingaben mit Softkeyboards ähnlich effektiv und effizient erfolgen können wie bei der Dateneingabe mit normalen physischen Tastaturen (Hoggan et al. 2008). Der Effekt kann weiter gesteigert werden, wenn Systeme eingesetzt werden, bei denen nur einzelne Regionen der Oberfläche taktile Rückmeldungen geben, statt einem einzelnen Vibrationsmotor, der das gesamte Gerät vibrieren lässt (Hoggan et al. 2008). Dies ist auf Basis von elektromechanischen Aktoren nicht realisierbar. Zusätzlich besteht bei dieser Art der taktilen Rückmeldung das Problem, dass die mechanisch eingekoppelte Energie durch die Flexibilität des Materials in ungleichmäßigen Amplituden der Oberflächenbewegungen an verschiedenen Stellen der berührungsempfindlichen Oberfläche resultiert und die Dämpfungseigenschaften des Gesamtsystems für ein frequenzabhängiges Antwortverhalten in Abhängigkeit der Erregungsfrequenz sorgen (Bau et al. 2010). Der Berührungspunkt auf dem Touchscreen, die Kontaktfläche und die Stärke der Berührung durch den Menschen haben somit einen Einfluss auf den Stimuli (Choi & Kuchenbecker 2012).

Kommerzielle Anbieter für Touchscreensysteme mit elektromechanischer Rückmeldung sind z. B. Sigmatek (2010), Immersion (2012) und RAFI (2013). Der Touchscreen von Sigmatek ist laut Melkus (2011) nicht starr sondern über mehrere Elektromagnete mit dem Gehäuse verbunden. Das System von Immersion umfasst einen 8,4-Zoll großen resistiven Touchscreen mit einem zusätzlichen Controller und proprietären elektromechanischen Aktoren, die das haptische Feedback erzeugen. Dieses System wurde von Pitts et al. (2012b) für Versuche im Fahrzeugcockpit eingesetzt. Das System von RAFI (2013) unterstützt Multitouch-Interaktion und wird entsprechend der Anforderungen des jeweiligen Industriekunden angefertigt. Daher konnten an dieser Stelle keine weiteren Systemeigenschaften, wie z. B. Displaygröße, ermittelt werden.

Die Latenz elektromechanischer Aktuatoren ist ebenso wie die zeitliche Auflösung von den gekoppelten Massen abhängig (Kern 2009, Choi & Kuchenbecker 2012). Die zeitliche Auflösung der Systeme ist so hoch, dass das gesamte Leistungsspektrum der taktilen Wahrnehmung abgedeckt werden kann. Bei der Einhaltung der notwendigen Pausen zwischen zwei unterschiedlichen Rückmeldungen muss berücksichtigt werden, dass die Aktuatoren im Falle von Vibrationsmotoren durch ihre Trägheit nach dem Abschalten noch kurz nachlaufen können. Während Aktuatoren auf Basis von Elektromagneten oder dem piezoelektrischen Effekt meist nur zwei Zustände einnehmen können, sind Vibrationsmotoren über ein breites Spektrum stufenlos regelbar (Kern 2009, Choi & Kuchenbecker 2012). Über den gesamten Regelbereich ist die Amplitude der Vibrationsmotoren direkt proportional zur Frequenz (Choi & Kuchenbecker 2012): hohe Amplituden sind somit nur über hohe Frequenzen realisierbar; wird eine niedrige Frequenz benötigt, resultiert daraus eine niedrige Amplitude. Daher kann den elektromechanischen Aktuatoren lediglich eine eingeschränkte Auflösung der Intensität bescheinigt werden. Durch die starre mechanische Kopplung wird der gesamte Touchscreen in Bewegung versetzt, so dass es sich auf der an jeder Stelle der Oberfläche um den selben Stimuli handelt. Damit wird lediglich ein Ausgabekanal genutzt, auch wenn der Stimuli an mehreren gleichzeitig interagierenden Fingern wahrnehmbar ist. Eine räumliche Auflösung ist somit bei elektromechanischen Aktuatoren nicht realisierbar. Die notwendige mechanische Kopplung sorgt für eine hohe Steifigkeit. Eine Besonderheit dieser Art der Erzeugung haptischer Rückmeldungen ist die Geräuschentwicklung. So ist die Aktivität von Vibrationsmotoren in Form eines Brummens deutlich auditiv wahrnehmbar; selbst beim einmaligen Aktivieren eines Elektromagneten wird ein Klacken erzeugt.

Die Erzeugung einer taktilen Rückmeldung funktioniert auch auf Basis des Effekts der **elektrotaktilen Stimulation** (DIN EN ISO 9241-910). Zur Erzeugung des Effekts müssen am Touchscreen keine Teile bewegt werden. Die taktile Empfindungen entsteht allein durch die gezielte Steuerung der elektrostatischen Reibung zwischen Oberfläche und bewegtem Finger (Bau et al. 2010). Im Gegensatz zur

Reizerzeugung über elektromechanische Aktoren ist die Empfindung bei Systemen auf Basis der Elektrovibration über die gesamte Oberfläche homogen und aufgrund der fehlenden mechanisch bewegten Teile zudem geräuschlos (Bau et al. 2010). Der Effekt basiert auf einem elektrischen Feld, das in einer transparenten Schicht, ähnlich der eines kapazitiven Systems zur Berührungserfassung, erzeugt wird und durch dessen Variation das Empfinden der Reibung zwischen bewegtem Finger und der berührten Oberfläche gesteuert werden kann (Bau et al. 2010). Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 3.19 dargestellt. Systeme auf Basis der Elektrovibration sind bisher nicht in Form von Endgeräten verfügbar. Bau et al. (2010) verwendeten einen selbst erstellten Prototyp, an dem zuletzt auf Seite der Ansteuerung geforscht wurde (Kim et al. 2013).

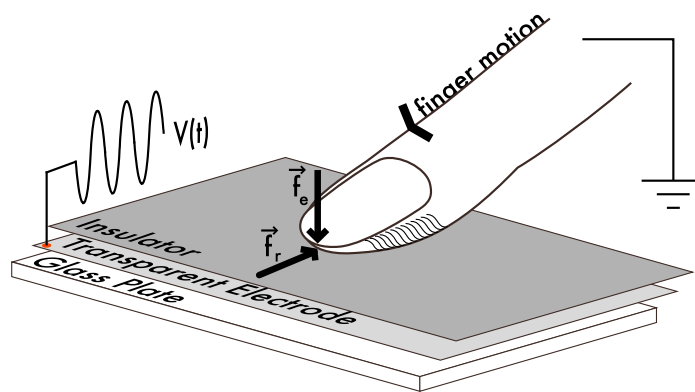


Abbildung 3.19: Funktionsprinzip der elektrotaktilen Rückmeldung (Bau et al. 2010, S. 285)

Da eine Bewegung des Fingers zur Empfindung des Effektes notwendig ist, entspricht die Elektrovibration eigentlich nicht einer taktilen Rückmeldung im Sinne der Begriffsdefinition (vgl. Unterabschnitt 2.5.1), obwohl die Wahrnehmung des elektrischen und damit nichtadäquaten Reizes ausschließlich über die mechanischen Hautsinne erfolgt. Die Zahl der Ausgabekanäle kann bei dieser Art der haptischen Rückmeldung so variabel gestaltet werden, dass das System sowohl einen als auch mehrere Finger gleichzeitig mit unterschiedlichen taktilen Reizen beaufschlagen kann. Da der elektrotaktile Reiz sehr schnell angepasst werden kann, ist die zeitliche Auflösung sehr gut. Die notwendige Pause zwischen zwei unterschiedlichen Reizen ist mit dem System ohne Weiteres realisierbar. Die Intensität des taktilen Reizes ist jedoch stark eingeschränkt. Die räumliche Auflösung ist bei Systemen dieser Art sehr hoch und die benötigte Steifigkeit entspricht dem eines Touchscreens ohne haptische Rückmeldung. Als Besonderheit weisen Systeme auf Basis der elektrotaktilen Stimulation eine starke Abhängigkeit vom Hautleitwert und damit von der Transpiration des Benutzers und letztendlich der Umgebungsluftfeuchte und -temperatur auf.



Einen **hydraulischen Ansatz** zur Erzeugung einer haptischen Rückmeldung wählte Karlin (2013). Auf einem Substrat mit Mikrokanälen ist eine elastische Schicht angebracht, die sich nach oben wölbt, wenn in die Mikrokanäle ein Fluid gepumpt wird (Abbildung 3.20, Tactus Technology 2015). Dieser Vorgang ist reversibel und nach weniger als 1 s abgeschlossen (Tactus Technology 2015). Das Substrat mit elastischer Schicht und Fluid ist transparent und so vor dem Touchscreen angebracht, dass die Wölbungen passend zur Darstellung der Anzeige an den Stellen mit den Schaltflächen entstehen (Tactus Technology 2015). Nach dem letzten Stand funktioniert das Erzeugen der Wölbungen nicht für einzelne Schaltflächen, sondern nur gleichzeitig z. B. für alle Tasten einer virtuellen Tastatur. Als kommerzielles Produkt war die Technologie kurzzeitig in Form einer Schutzhülle für das Apple iPad verfügbar (Tactus Technologies 2015). Die Flüssigkeit wurde bei diesem Produkt durch die manuelle Betätigung eines Schiebers auf der Rückseite der Schutzhülle unter die elastische Schicht und wieder heraus gepumpt (Tactus Technologies 2015).

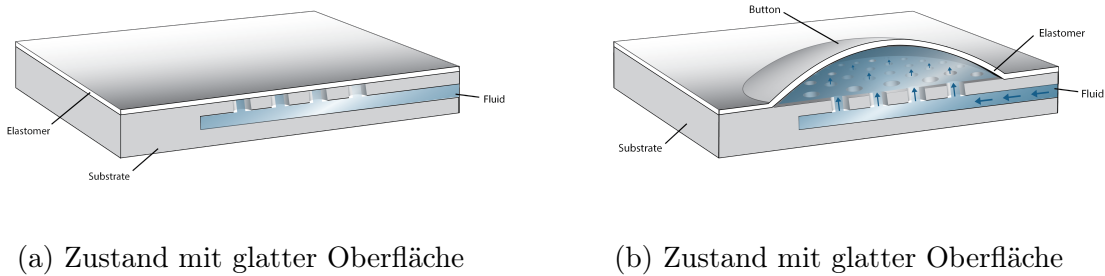


Abbildung 3.20: Zustände der hydraulikbasierten haptischen Rückmeldung (Tactus Technology 2015)

Von der hydraulischen Rückmeldung wird die taktile Wahrnehmungsmodalität angesprochen. Es gibt nur einen einzigen Ausgabekanal. Die Latenz ist mit ca. 1 s ab dem Zeitpunkt des manuellen Einschaltens sehr hoch. Durch die Umsetzung als manuell zuschaltbare Option ist die zeitliche Auflösung des Systems als solche nicht vorhanden. Auch eine kurze Unterbrechung des Reizes ist nicht möglich. Die Intensität des hydraulisch erzeugten Reizes liegt deutlich über der Reizschwelle der taktilen Wahrnehmung, wobei die Auflösung der Intensität durch die binäre Ausprägung des Zustandes stark eingeschränkt ist. Bei der Gestaltung des Systems wurde die Zweipunktschwelle im Bereich der Fingerkuppen berücksichtigt. Die Anordnung der taktil wahrnehmbaren Wölbungen ist fest vorgegeben, so dass die räumliche Auflösung als schlecht zu beurteilen ist. Die Steifigkeit einer entsprechend ausgestatteten Anzeige unterscheidet sich nicht von einem herkömmlichen Touchscreensystem. Zudem ist das System nicht anfällig für Schwingungen. Als Besonderheiten sind bei diesem System die Verschlechterung der optischen Eigenschaften durch die zusätzlich benötigten

Schichten vor der Anzeige und die Verschleißanfälligkeit der elastischen Schicht zu nennen, wobei ein Defekt in Kombination mit dem enthaltenen Fluid systemkritisch werden dürfte. Die Berührungserfassung eines Touchscreen stellt ebenfalls eine kritische Komponente dar, da sie oft die einzige Eingabemöglichkeit interaktiver Touchscreensysteme darstellt. Dennoch haben sich Defekte des Touchscreens in der Praxis zwar als störend, aber nicht als systemkritisch erwiesen. So wurden z. B. beschädigte Systeme mit Einschränkungen noch mehrere Monate weiter genutzt (Schaub et al. 2014).

Eine weitere Möglichkeit, um gezielt Kräfte einer virtuellen Oberfläche auf einen Finger auszuüben, bietet das **magnetische System** von Weiss et al. (2011). Das System besteht aus einer Spulenmatrix hinter dem gesamten Display und benötigt einen Permanentmagnet am Finger des Nutzers. Durch die gezielte Ansteuerung einzelner Spulen können abgegrenzte Bereiche der Oberfläche mittels Anziehung oder Abstoßung des Permanentmagneten bis zu einer Entfernung von 40 mm haptisch wahrnehmbar gemacht werden. Eine Berührung ist nicht erforderlich. Die Spulenmatrix des Systems und die Befestigung des Permanentmagneten am Finger sind in Abbildung 3.21 dargestellt. Wird in schneller Folge zwischen Anziehung und Abstoßung alternierend gewechselt, entsteht der Wahrnehmungseindruck einer Vibration. Das System kann über das Magnetfeld des Fingermagnets Annäherungen des Fingers ohne weitere Technik zur Berührungserfassung erkennen und räumlich zuordnen. Laut Weiss et al. (2011) wird das System nur mit einem Finger genutzt, wobei mehrere Finger möglich sind. Da diese Finger aber jeweils einen Magneten an der Fingerkuppe erfordern, kommt es zur Anziehung und Abstoßung zwischen den Magneten an den Fingern (Weiss et al. 2011). Systeme auf Basis des Magnetismus sind bisher nicht in Form von Endgeräten verfügbar. Weiss et al. (2011) verwendeten für ihre Forschung einen selbst erstellten Prototyp.



Abbildung 3.21: Spulenmatrix und Permanentmagnet der magnetischen Rückmeldung (Weiss et al. 2011, S. 615)

Das magnetische Rückmeldungssystem führt zu einer taktilen Wahrnehmung. Das System ist aktuell nur mit einem Ausgabekanal also einem einzelnen Finger sinnvoll nutzbar, da Magneten an mehreren Fingern durch die gegenseitige Anziehung oft aneinander hängen bleiben. Durch den prinzipbedingt schnellen Aufbau und Änderung der Magnetfelder kann dem System eine sehr geringe Latenz bescheinigt werden. Eine Pause zwischen zwei einzelnen Rückmeldungen ist problemlos möglich. Die Intensität der Anzeige ist durch einen Wahrnehmungseindruck bis in 40 mm Entfernung als sehr gut zu bezeichnen. Da auch eine Intensitätsänderung schnell und stufenlos möglich ist, verfügen diese Systeme über eine sehr gute Intensitätsauflösung. Die räumliche Auflösung der Rückmeldung ist durch die Abmessung der verbauten Spulen und der erzeugten Magnetfelder begrenzt. Durch das Gewicht der benötigten Technik sind magnetismusbasierte Rückmeldungssysteme in stationären Touchscreens zu finden. Die aus der Rückmeldung resultierenden Kräfte werden also über eine Halterung an die Umgebung abgeleitet. Obwohl das System die Möglichkeit für eine Vibrationsempfindung bietet, ist es durch die direkte Erregung der Fingerkuppe nicht anfällig für Schwingungsartefakte. Die direkte Erregung der Fingerkuppe ist zugleich der größte Nachteil dieses Systems, denn dazu muss je ein Permanentmagnet sicher an der Fingerkuppe des Nutzers angebracht werden.

## 3.4 Softwareimplementierungen

Auf der Ebene der grafischen Benutzungsschnittstelle lassen sich Unterschiede zwischen Touchscreens und der herkömmlichen Computerinteraktion mittels Maus und Tastatur feststellen, die nicht nur die Abmessungen und Anordnungen der Schaltflächen betreffen. So kann bei der grafischen Benutzungsschnittstelle von Touchscreens auf die Darstellung eines Mauscursors je nach Nutzungskontext verzichtet werden (VDI/VDE 3850-3). Durch die berührungsbedingte Eingabe bei Touchscreens funktioniert die von der Maus bekannte Interaktionsform *Hover* bzw. *Mouseover* nicht, die bewirkt, dass beim einfachen Zeigen auf ein interaktives Element der Tooltipp zur Schaltfläche oder die Menüoptionen geöffnet werden, ohne das interaktive Element anzuklicken (VDI/VDE 3850-3). Zusätzlich ist die Darstellung eines Mauscursors bei multitouchfähigen Systemen nicht möglich, da diese mehr als eine einzelne Berührungsposition erfassen können (Wigdor & Wixon 2011); eine geeignete Rückmeldung für eine erfasste Berührung ist dennoch notwendig. Aus diesen Gründen bedarf es zur Generierung einer grafischen Benutzerschnittstelle für die Interaktion mittels Touchscreen mehr als nur hinreichend große Schaltflächen. Einige Softwareplattformen, auch Betriebssysteme (engl. Operating System oder OS) genannt, unterstützen die Interaktion mittels Touchscreens durch die Integration der benötigten Softwarekomponenten (Ruff & Laufs 2013).

Softwareseitig sind für eine Mensch-Maschine-Schnittstelle mit berührungsempfindlicher Anzeige eine grafische Darstellung der interaktiven Oberfläche sowie eine Detektion von Berührungen erforderlich (DIN EN ISO 9241-410, VDI/VDE 3850-3). Die Berührungen werden vom Touchscreen erfasst und an das Betriebssystem weitergeleitet (Laufs et al. 2010, DIN EN ISO 9241-410). Das Betriebssystem ist auch für die Generierung der grafischen Darstellung verantwortlich, so dass mit den dargestellten Abbildungsinhalten eine Interaktion möglich ist (Laufs et al. 2010). Die Interaktion ist nur möglich, wenn die optische Auflösung des Displays mit der physikalischen Auflösung der Berührungserfassung mittels Kalibrierung abgeglichen (vgl. Abbildung 3.5) oder hardwaretechnisch verbunden (vgl. In-Cell-Touchscreens, Unterabschnitt 3.2.2) ist. Es können zusätzlich Softwarebestandteile zur Generierung von Rückmeldungen auf erfolgreiche Eingaben enthalten sein. Diese Rückmeldungen können in Abhängigkeit von der jeweiligen Hardware visuell, auditiv oder taktil (vgl. Abschnitt 3.3) erfolgen.

### 3.4.1 Herleitung der Analysekriterien

Zur Herleitung interaktionsbeeinflussender Analysekriterien von unterschiedlichen Softwareimplementierungen wurde das Basismodell für Touchscreensysteme (vgl. Abbildung 2.8) herangezogen und die Komponenten auf Seite des technischen Systems als Grundlage verwendet. Zu den technischen Komponenten eines Mensch-Maschine-Systems gehören gemäß dieses Modells Anzeigen, Bedienelemente, Assistenzfunktionen, Benutzermodell und Softwareplattform. Die Softwareplattform beinhaltet das Dialogsystem.

Unter den **Anzeigen** sind alle technischen Einrichtung zur Informationsdarstellung zu verstehen (DIN EN 894-2). Neben der grafischen Darstellung umfassen die Definition von Anzeigen auch technischen Einrichtung zur Stimulation der auditiven und taktilen Sinnesmodalität (DIN EN 894-2). Diese multimodale Kombination kann bei Touchscreensystemen vollständig genutzt werden (vgl. Abschnitt 3.3). Bei modernen Betriebssystemen sind multimodale Rückmeldungen Bestandteil.

Die **Bedienelemente** von Touchscreensystemen lassen sich in sichtbare und unsichtbare Eingabemöglichkeiten unterscheiden (VDI/VDE 3850-3). Sichtbare Bedienelemente sind in Form von grafischen Elementen ausgebildet, die auf eine Berührung und ggf. Bewegung meist eines einzelnen Fingers reagieren (VDI/VDE 3850-3). Beispiele hierfür sind dargestellte Schaltflächen oder Schieberegler. Eine vollständige Übersicht findet sich in Rudolf (2006). Eine Besonderheit von Touchscreens besteht darin, dass die berührungssensitive Fläche eines Bedienelements größer sein kann als die grafisch dargestellte Schaltfläche (VDI/VDE 3850-3). Zudem kann die Größe der berührungsempfindlichen Fläche vom Betriebssystem dynamisch an den jeweiligen

Kontext angepasst werden (Saffer 2008). Diese Funktion wird beispielsweise bei Bildschirmstastaturen als Assistenzfunktion verwendet (Saffer 2008). Dabei werden die berührungssensitiven Bereiche unwahrscheinlicher Buchstaben auf der Tastatur verkleinert während gleichzeitig der dadurch entstehende Platz für eine Vergrößerung der berührungssensitiven Bereiche wahrscheinlicher Buchstaben genutzt wird. Die Wahrscheinlichkeiten für jeden einzelnen Buchstaben werden anhand sprachspezifischer Wörterbücher und der bisherigen Eingabehistorie ermittelt. Die Anpassung findet bei jeder einzelnen Buchstabeneingabe erneut statt und hilft so, Tippfehler zu reduzieren. Die grafisch dargestellten Schaltflächen behalten bei jeder Eingabe ihre dargestellte Größe bei. Die empfohlene Größe einer Schaltfläche orientiert sich an der Fingerfläche des Benutzers, wobei die Kantenlänge bzw. der Durchmesser mindestens 15 mm beträgt und zwei Benachbarte Schaltflächen einen Abstand von 3 mm einhalten sollten (VDI/VDE 3850-3). In VDI/VDE 3850-3 wird bei den angeführten Werten für die minimalen Abmessungen von Touchscreenschaltflächen auf MIL-STD-1472G verwiesen. Allerdings handelt es sich bei MIL-STD-1472G um einen Design Guide des US-Amerikanischen Verteidigungsministeriums, der auf die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle von militärischer Ausstattung ausgerichtet ist. Eine Übertragbarkeit dieser Werte, die eine Interaktion selbst bei Vibrationen und mit Handschuhen ermöglichen soll, ist bei einem zivilen Anwendungsfall nur in sofern gegeben, dass die Schaltflächen vermutlich größer als notwendig ausfallen. Diese Tendenz dürfte gerade bei mobilen Touchscreengeräten, wie z. B. Smartphones, durch die begrenzte Displaygröße kontraproduktiv sein, denn eine Tastenreihe auf einer virtuellen Tastatur würde in einer Gerätebreite von mindestens 177 mm resultieren (vgl. Gleichung 3.3). Gerade Smartphones werden durchaus in Fahrzeugen (ggf. Vibration) und im Winter (ggf. Handschuhe) eingesetzt.

$$10 \text{ Tasten} \cdot 15 \text{ mm} + 9 \text{ Tastenzwischenräume} \cdot 3 \text{ mm} = 177 \text{ mm} \quad (3.3)$$

Unsichtbare Eingabemöglichkeiten umfassen Interaktionsmöglichkeiten, die nicht in Form von Schaltflächen oder anderen Möglichkeiten kodiert sind, so dass sie vom Benutzer auf den ersten Blick nicht als solche erkennbar sind. Unsichtbare Eingabemöglichkeiten in Touchscreensystemen umfassen sämtliche Mehrfingergersten (VDI/VDE 3850-3), wie z. B. Zoomen mittels 2-Finger-Spreiz- und Blättern mittels 2-Finger-Ziehgeste (siehe Abbildung 3.22). Sie sind nicht in Form von Schaltflächen oder anderen Möglichkeiten der Informationsdarstellung kodiert und basieren auf bereits erlernten Interaktionsmustern (vgl. Unterabschnitt 2.5.2), die von den Nutzern kontextabhängig eingesetzt werden können. Sämtliche Möglichkeiten der Interaktion vom Antippen eines sichtbaren Bedienelements bis zur Manipulation von Objekten mittels Gesten lassen sich im Analysekriterium **Interaktionsformen**

zusammenfassen. Zu diesem Punkt gehört ebenfalls softwaretechnische Konfiguration des Touchscreens für Erst- oder Letztkontaktberührung (vgl. Abschnitt 2.4).

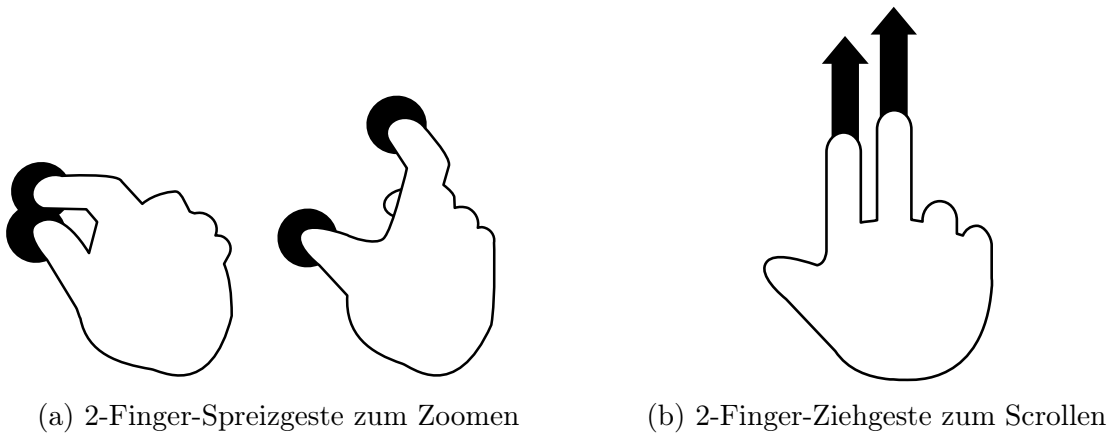


Abbildung 3.22: Beispiele für implizite Formen der Touchscreeninteraktion (Gesten) nach Villamor et al. (2010)

Zusätzlich zu der bereits genannten **Assistenzfunktion** können in die Software von Touchscreensystemen weitere Funktionen integriert sein, die eine Interaktion vereinfachen. So bringen einige Softwareimplementierungen eine systemübergreifende Rechtschreibprüfung samt Autokorrektur sowie eine Autovervollständigung unvollständig getippter Wörter mit. Eine Form von kognitiver Assistenz ist die Animation visueller Übergänge der grafischen Benutzungsschnittstelle (Bederson & Boltman 1999, Tversky et al. 2002, Heer & Robertson 2007, Moreno 2007). Bei einem animierten visuellen Übergang findet der Wechsel zwischen zwei Ansichten durch eine nachvollziehbare kontinuierliche Animation anstelle eines abrupten Wechsels statt (Hudson & Stasko 1993). Sowohl beim Übergang zwischen zwei Ansichten als auch beim Scrollen werden die virtuell bewegten Objekte softwaretechnisch mit physikalischen Eigenschaften wie z. B. Masse und Geschwindigkeit versehen, wodurch sie eine virtuelle Trägheit und virtuelle Reibung erhalten (Reetz et al. 2006). Durch die virtuelle Trägheit lassen sich Objekte mit dem Fingern anstoßen und bewegen sich auch nach Abheben der Finger vorerst weiter. Die Dauer der Bewegung ist durch virtuelle Reibung begrenzt, die dafür sorgt, dass sich die Bewegung der Animation scheinbar natürlich verlangsamt. Wird beim Scrollen das Ende einer Seite erreicht, wird dies als Anstoßen wiederum auf Basis physikalisch korrekten Verhaltens animiert.

Das im System hinterlegte **Benutzermodell** umfasst die Einstellungen, die der Benutzer dem interaktiven System in Form einer Eingabe übermittelt (explizites Benutzermodell) oder die das interaktive System aus der Interaktionshistorie eines Benutzers abgeleitet hat (Allen 1997). Das Benutzermodell bildet die Grundlage

für die Personalisierung des interaktiven Systems und ist nicht zu verwechseln mit dem mentalen Modell des Benutzers, das die Erwartungen des Benutzers an das Verhalten des interaktiven Systems enthält (Allen 1997). Für die Analyse der Softwareimplementierung eines Touchscreensystems sind die Teile des Benutzermodells relevant, die die Interaktion betreffen. Dazu zählen Systemanpassungen in Bezug auf Touchscreeneingabe und Ausgaben. Auch die individuelle Kalibrierung eines Touchscreens (vgl. Unterabschnitt 3.2.1) zählt zum Benutzermodell.

Das in der Softwareplattform enthaltene **Dialogsystem** (Begriff vgl. Abschnitt 2.1) umfasst alle Elemente, die zur Realisierung mehrerer Iterationen von Benutzereingaben und Systemausgaben notwendig sind. Die Systemausgaben umfassen alle Formen von Rückmeldungen, die anhand der Grundsätze der Dialoggestaltung (vgl. Unterabschnitt 2.6.3) umgesetzt und beurteilt werden können. Die einzelnen Ansichten eines Dialogsystems können gleichrangig auf einer Ebene oder hierarchisch über mehrere Ebenen angeordnet werden, wobei bei entsprechend umfangreichen Softwaresystemen eine Vermischung der beiden Anordnungsprinzipien vorzufinden ist.

Für die Analyse wurden die ermittelten Kriterien wie folgt zusammengefasst:

- Rückmeldungen (Anzeigen)
- sichtbare Bedienelemente
- Assistenzfunktionen
- Interaktionsformen
- Benutzermodell
- Dialogsystem (Softwareplattform)

#### 3.4.2 Analyse der technischen Realisierungen

Durch die starke Verbreitung von Smartphones waren zum Stand der Arbeit mehrere Softwareimplementierungen mit integrierter Touchscreenunterstützung bekannt. Für eine Analyse muss daher eine geeignete Auswahl getroffen werden. Diese Auswahl orientierte sich an der jeweiligen Marktabdeckung der Systeme für mobile und stationäre Touchscreensysteme. Die zwei am stärksten verbreiteten Softwareplattformen auf mobilen Geräten (Google Android, Apple iOS) erreichten im zweiten Quartal 2015 eine Marktabdeckung von zusammen 96,7 % (IDC Research 2015). Für stationäre interaktive Systeme ist bisher in Microsoft Windows eine Unterstützung für Touchscreens integriert. Um eine Vergleichbarkeit zu herzustellen, wurden sämtliche Erkenntnisse aus den offiziellen Design Guides entnommen. Der Design Guide für Microsoft Windows (Microsoft 2015c) enthält Empfehlungen für sogenannte

„UWP-Apps“. Dabei handelt es sich um spezielle Anwendungen, die so programmiert wurden, dass sie auf der universellen Windows-Plattform (UWP) und somit auf allen Windows-10-Geräten wie PCs, Tablets oder Smartphones laufen (Microsoft 2015d). Die Empfehlungen dieses Design Guides sind damit nicht allein auf die Desktop-Variante von Microsoft Windows sondern auch für die mobile Version Microsoft Windows 10 Mobile anwendbar. Zusätzlich existiert ein spezieller Design Guide für die touchscreenspezifischen Besonderheiten der Desktop-Version von Microsoft Windows (Microsoft 2015b). Die durchgeführte Analyse umfasste demnach folgende Softwareplattformen:

- Apple iOS in Version 9 (Apple 2015a),
- Google Android in Version 6 (Google 2015),
- Microsoft Windows in Version 10 (Microsoft 2015b, Microsoft 2015c).

**Apple iOS** bestätigt als Betriebssystem für mobile Systeme jede Touchscreeneingabe mit einer erkennbaren Rückmeldung. So leuchtet beispielsweise ein Listenelement kurz auf, wenn es berührt wird oder ein Indikator für eine Verzögerung erscheint. Apple unterscheidet zwischen synchroner und asynchroner Verzögerung: während der Benutzer bei synchronen Verzögerungen auf das Ende des Prozesses warten muss, kann er bei asynchronen Verzögerungen weiterarbeiten (Abbildung 3.23).

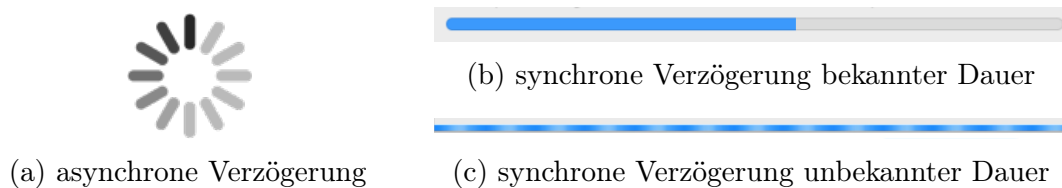


Abbildung 3.23: Rückmeldungen zu Verzögerungen von Apple iOS (Apple 2015a)

Die Softwareplattform kann Benachrichtigungen anzeigen, die je nach Nutzereinstellung mit oder ohne Ton und Vibration auch auf dem gesperrten Gerät erscheinen und direkte Interaktionsmöglichkeiten bieten (Abbildung 3.24 auf S. 99).

Für sichtbare Bedienelemente wird von Apple iOS eine minimale Größe für interaktive Elemente von  $44 \text{ px} \times 44 \text{ px}$  empfohlen. Diese Vorgaben entsprechen allerdings nur für die ersten drei Apple-Smartphone-Generationen der Pixelanzahl auf der Anzeige. Für die anschließenden Gerätegenerationen wurde in der Entwicklungsumgebung ein Skalierungsfaktor hinterlegt, der die Angaben innerhalb der Entwicklungsumgebung auf die tatsächliche Anzeigenauflösung anpasst. Beim iPhone 6S+ beträgt dieser Skalierungsfaktor  $60/23$  (PixelCut 2015). Das iPhone 6S+ weist eine Pixeldichte von  $\varrho = 15,8 \text{ px mm}^{-1}$  auf (Apple 2015b), was bei den Vorgaben und dem gerätespezifischen Skalierungsfaktor in einer Fläche von  $7,3 \text{ mm} \times 7,3 \text{ mm}$  resultiert. Bei



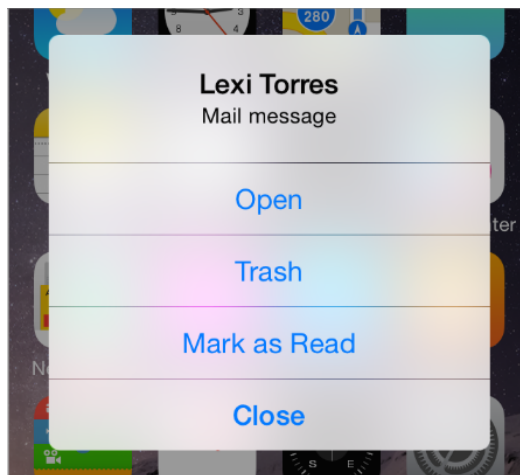





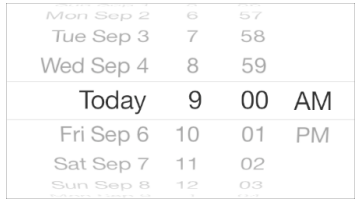
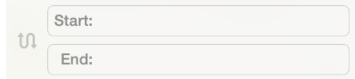

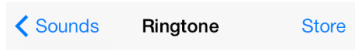
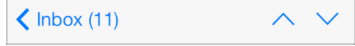



Abbildung 3.24: Benachrichtigung von Apple iOS (Apple 2015a)

der virtuellen Tastatur wird diese Vorgabe nicht eingehalten, da eine Buchstabenreihe nach dieser Vorgabe breiter als die Anzeigenbreite wäre. Um dieses Defizit zu kompensieren, kommen bei Apple iOS mehrere Assistenzsysteme zum Einsatz. Neben der visuellen Rückmeldung jeder Berührung und erfolgten Eingabe werden begonnene Wörter über Wortvorschläge vervollständigt, Tippfehler automatisch korrigiert und die Tastengrößen dynamisch angepasst (Canonical 2015). Die visuelle Erscheinung der unterschiedlichen Bedienelemente wurde mit einer kurzen Beschreibung in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Die Bezeichnungen wurden aus dem Design Guide übernommen und im Englischen belassen, da teilweise keine passende deutsche Übersetzung gefunden werden konnte. Auffällig ist das Fehlen einer Checkbox und von Drop-Down-Menüs. Die Checkbox wird bei iOS mit dem Switch substituiert und Drop-Down-Menüs wandelt iOS im Hintergrund in Picker um, so dass die Einfachauswahl darüber möglich ist. Nahezu alle Änderungen der grafischen Benutzungsschnittstelle sind animiert.

Sämtliche Interaktionsformen (Tabelle 3.3 auf S. 102) sind bei Apple iOS mittels Letztkontaktberührung (vgl. Abschnitt 2.4) realisiert. Standardmäßig werden vom Betriebssystem Ein- und Zweifingergesten genutzt. Neben dem direkten Antippen oder Nachziehen mit einem Finger und komplexen Mehrfingergesten sind mit einem aktuellen Smartphone des Herstellers durch die Auswertung des Fingerdrucks auf der Anzeige ebenfalls Interaktionen möglich. Die bisher der Mausinteraktion vorbehaltene Hover-Funktion, bei der z. B. Tooltips erscheinen, wenn der Mauszeiger auf eine Funktionsschaltfläche einer Anwendung zeigt, sowie Kontextmenüs für häufig genutzte Funktionen werden von Apple iOS unterstützt. Auf älteren Gerätegenerationen werden Funktionen wie Kontextmenüs weiter über die Dauer einer Berührung realisiert.

Tabelle 3.2: Visuelle Bedienelemente von Apple iOS (Apple 2015a)

Bezeichnung	Beschreibung	Element
Button	einfache Schaltfläche zum Antippen	
Switch	Wechsel zwischen zwei gegensätzlichen Optionen	
Segmented Control	Schalter für Optionen oder Ansicht	
Stepper	erhöht oder verringert eine Einstellung um einen konstanten Wert	
Slider	stufenlose Einstellung eines Wertes innerhalb eines vorgegebenen Intervalls	
Picker	Einfachauswahl aus komplexen Möglichkeiten	
Textfield	Feld zur Eingabe von Freitext	
Table View Elements	Zustand oder Manipulation eines Tabellenelements	
Navigation Bar	Navigation in Informationshierarchie	
Toolbar	kontextsensitive Werkzeugleiste	
Tab Bar	Wechsel von Subtask, Ansicht, Modus	

Das Benutzermodell von iOS ermöglicht die Beeinflussung der Rückmeldung (Ton an oder aus, Vibration an oder aus, Darstellung in Graustufen oder invertierten Farben) sowie die Sprachausgabe jeder Touchscreeneingabe. Das Dialogsystem basiert auf einer Baumhierarchie, die sich ausgehend vom Hauptbildschirm über viele Ebenen verzweigt. Querverbindungen zwischen den Ästen sind nur selten vorhanden. Die Navigation durch die Hierarchie erfolgt über das Antippen der jeweils nächsten Untermenüoption. Um sich in der Hierarchie eine Stufe rückwärts zu bewegen, befindet sich am oberen linken Bildrand ein entsprechender Button (s. Navigation Bar in Tabelle 3.2). Neben dem Touchscreen existiert ein Hardkey, bei dessen Druck das System auf den Hauptbildschirm zurückgesetzt wird. Ein doppeltes Drücken dieser Taste ermöglicht das Springen zu anderen bereits geöffneten Anwendungen.

Tabelle 3.3: Interaktionsformen von Apple iOS (Apple 2015a)

Geste	Beschreibung	Aktion
Tippen	kurze gezielte Berührung mit einem Finger	Element auswählen oder manipulieren
doppelt Tippen	kurze gezielte Berührungen mit einem Finger	Zoomen
Ziehen	Bewegung des Fingers während der Berührung	Scrollen, Blättern, Element bewegen oder Ansicht innerhalb einer Hierarchiestufe wechseln
Wischen	schnelles Ziehen	Nutzen der Trägheit zum Scrollen oder Ansicht innerhalb einer Hierarchiestufe wechseln
Auseinanderziehen	zwei Finger (meist Daumen und Zeigefinger) während der Berührung auseinander bewegen	Heranzoomen
Zusammenziehen	zwei Finger (meist Daumen und Zeigefinger) während der Berührung aufeinander zu bewegen	Herauszoomen
Rotieren	zwei Finger (meist Daumen und Zeigefinger) während der Berührung um den Mittelpunkt verdrehen	Ausrichtung ändern
Gedrückt halten	längere Berührung mit individuellem Finger ohne Bewegung	Kontextmenü anzeigen
Druck ausüben	während der Berührung Druck erhöhen	Kontextmenü anzeigen

Die Rückmeldungen von **Google Android** unterscheiden sich oft nur in der visuellen Gestaltung von Apple iOS. So existieren ebenso entsprechende Elemente für die Rückmeldung von Verzögerungen bekannter und unbekannter Dauer sowie für asynchrone Verzögerungen (Abbildung 3.25).

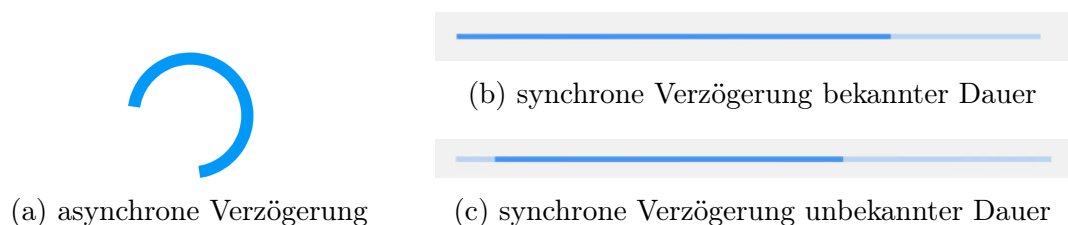


Abbildung 3.25: Rückmeldungen zu Verzögerungen von Google Android (Google 2015)

Die Benachrichtigungen von Google Android sind mit einer auditiven oder taktilen Rückmeldung kombinierbar und erlauben das Ausführen ausgewählter Funktionen, ohne die dazugehörige Anwendung öffnen zu müssen. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 3.26 dargestellt.

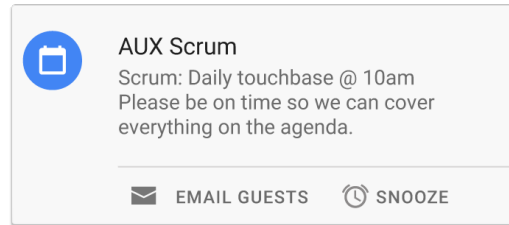
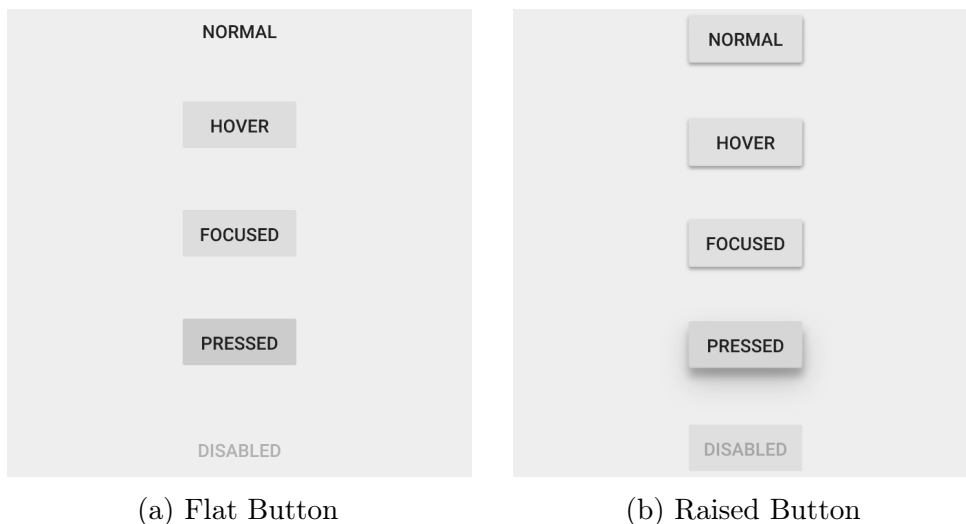


Abbildung 3.26: Benachrichtigung von Google Android (Google 2015)

Die möglichen Zustände einer Schaltfläche werden in Google Android nicht alle unterschiedlich visualisiert, wodurch mehrdeutige Rückmeldungen entstehen. Die Darstellung der einzelnen Schaltflächenzustände von Google Android sind in Abbildung 3.27 zu sehen.



(a) Flat Button

(b) Raised Button

Abbildung 3.27: Schaltflächenzustände von Google Android (Google 2015)

Bei den Abmessungen sichtbarer Schaltflächen setzt Google auf die Verwendung sogenannter Density-independent Pixels (dp) und einem gerätespezifischen Skalierungsfaktor. Dieser Skalierungsfaktor schwankt in mehreren Stufen zwischen 1 für Geräte mit einer Pixeldichte von  $\varrho = 6,3 \text{ px mm}^{-1}$  bis zu einem Wert von 4 für Geräte mit einer Pixeldichte von  $\varrho = 25,2 \text{ px mm}^{-1}$ . Als Mindesthöhe einer Schaltfläche sieht Google 36 dp für die sichtbare Fläche und 48 dp für die berührungsempfindliche Fläche einer Schaltfläche vor (Abbildung 3.28 auf S. 103).



Abbildung 3.28: Unterschied zwischen sichtbarer (hellblau, links) und berührungsempfindlicher Fläche (rosa, rechts) bei Google Android (Google 2015)

Entsprechend des Skalierungsfaktors beträgt die berührungsempfindliche Fläche einer Schaltfläche sowohl für Geräte mit niedriger als auch mit hoher Pixeldichte mindestens 7,2 mm. Die Mindestbreite einer Schaltfläche liegt durch die vorgegebene Untergrenze von 64 dp bei 10,2 mm und damit noch über der Empfehlung. Zusätzlich zu pixelbasierten Bedienelementen werden auch vektorbasierte Dateiformate für Schaltflächen unterstützt, so dass das Betriebssystem die benötigte Abmessung durch eine automatische Skalierung selbst vornehmen kann. Auch bei Google Android bildet die virtuelle Tastatur wieder die Ausnahme von diesen Vorgaben, wobei die Unterschreitung der Mindestgröße durch Assistenzsysteme wie Autokorrektur, Autovervollständigung und dynamisch angepasste Tastengrößen kompensiert wird. Veränderungen der grafischen Benutzungsschnittstelle laufen nahezu ausnahmslos als Animation ab. Die sichtbaren Interaktionselemente sind in einer Übersicht in Tabelle 3.4 zusammengetragen.

Die Interaktionselemente von Google Android unterscheiden sich teilweise im Namen und der grafischen Gestaltung von den funktionsgleichen Elementen in Apple iOS (z. B. „List Controls“ statt „Table View Elements“). Einige Elemente ähneln sich, weisen aber in der Funktionalität Unterschiede auf. So ermöglicht der „Toggle Button“ von Google Android eine Mehrfachauswahl, was beim „Segmented Control“ von Apple iOS nicht möglich ist. Andere Bedienelemente tragen die selbe Bezeichnung, weisen aber eine andere Funktionalität auf (z. B. „Stepper“). Zudem sind mit „Toggle Button“ und „Radio Button“ Elemente vorhanden, die man bei Apple iOS nicht findet.

Die mittels Google Android möglichen Interaktionsformen (Tabelle 3.5 auf S. 106) ähneln denen von Apple iOS. So werden Ein- und Zweifingergesten genutzt und die Eingabe findet mittels Letztkontaktberührung statt. Das doppelte Tippen dient neben dem Zoomen zusätzlich zur Textauswahl. Die Funktionalität der Erkennung des Drucks einer Touchscreenberührung ist vorgesehen, wird aber bisher mangels entsprechend ausgestatteter Geräte nicht genutzt. Im Design Guide finden sich keine Hinweise auf die Nutzung der Drucksensitivität als mögliche Interaktionsform.

Das Benutzermodell von Google Android erlaubt Anpassungen der grafischen Oberfläche und der Touchscreeninteraktion. So kann die Dauer des Gedrückthaltes frei konfiguriert werden. Für die bessere Lesbarkeit von Informationen und eine höhere

Tabelle 3.4: Visuelle Bedienelemente von Google Android (Google 2015)

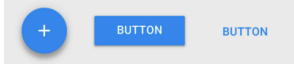




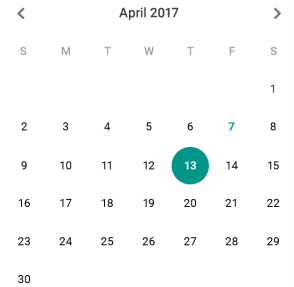



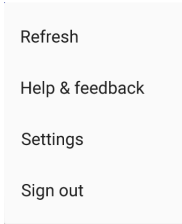


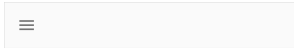

Bezeichnung	Beschreibung	Element
Button	einfache Schaltfläche zum Antippen	
Switch	Wechsel zwischen zwei gegensätzlichen Optionen	
Checkbox	Mehrfachauswahl	
Radio Button	Einfachauswahl	
Toggle Button	Einfach- oder Mehrfachauswahl thematisch zusammenhängender Optionen	
Picker	Einfachauswahl aus komplexen Möglichkeiten	
Slider	stufenlose Einstellung eines Wertes innerhalb eines vorgegebenen Intervalls	
Textfield	Feld zur Eingabe von Freitext	
List Controls	Zustand oder Manipulation eines Tabellenelements	
Menu	Optionen und Einstellungen einer Anwendung	
Tab	Wechsel von Subtask, Ansicht, Modus	
Stepper	schrittweise Dialogführung	
Toolbar	kontextsensitive Werkzeugleiste	
Bottom Sheet	Navigation zurück, Hauptansicht, geöffnete Anwendungen	

Tabelle 3.5: Interaktionsformen von Google Android (Google 2015)

Geste	Beschreibung	Aktion
Tippen	kurze gezielte Berührung mit einem Finger	Element auswählen oder manipulieren
doppelt Tippen	kurze gezielte Berührungen mit einem Finger	Zoomen oder Text auswählen
Ziehen	Bewegung des Fingers während der Berührung	Scrollen, Blättern, Element bewegen oder Ansicht innerhalb einer Hierarchiestufe wechseln
Wischen	schnelles Ziehen	Nutzen der Trägheit zum Scrollen oder Ansicht innerhalb einer Hierarchiestufe wechseln
Auseinanderziehen	zwei Finger (meist Daumen und Zeigefinger) während der Berührung auseinander bewegen	Heranzoomen
Zusammenziehen	zwei Finger (meist Daumen und Zeigefinger) während der Berührung aufeinander zu bewegen	Herauszoomen
Rotieren	zwei Finger (meist Daumen und Zeigefinger) während der Berührung um den Mittelpunkt verdrehen	Ausrichtung ändern
Gedrückt halten	längere Berührung mit individuellem Finger ohne Bewegung	Kontextmenü anzeigen

Treffgenauigkeit für Eingaben kann eine Vergrößerungsgeste eingestellt werden. Das Vorlesen von Menüpunkten und Anwendungsinhalten beherrscht Google Android ebenfalls. Das Dialogsystem von Google Android ist hierarchisch aufgebaut, wobei es ausgehend von der Hauptansicht eine weitere Ansicht mit allen installierten Anwendungen gibt. Dadurch gibt es eine redundante Zugangsmöglichkeit zu Anwendungen, die in beiden Ansichten vorhanden sind. Die Tiefe der Navigationshierarchie ist abhängig von der jeweiligen Anwendung. Um eine Menüebene zurück zu navigieren oder zur Hauptansicht zurückzuspringen, sind Touchscreenschaltflächen am unteren Bildrand vorhanden (vgl. „Bottom Sheet“ in Tabelle 3.4). Dort befindet sich auch eine Schaltfläche zum Anzeigen weiterer geöffneter Anwendungen.

Im Gegensatz zu Apple iOS bietet Google Android die Möglichkeit, die Software umfangreich anzupassen. Neben der Erweiterung vorhandener Funktionalitäten kann auch die gesamte grafische Benutzungsschnittstelle durch eine andere Implementierung ausgetauscht werden. Diese Anpassungsmöglichkeiten werden allerdings oft von den Geräteherstellern und Mobilfunkanbietern für eigene Anpassungen genutzt,

so dass die Mehrheit der Android-Geräte in vielen Punkten von den Vorgaben der Design Guides deutlich abweicht. Eine Vergleichbarkeit ist daher nur für Geräte gegeben, auf denen eine unveränderte Version von Google Android installiert ist.

Auch in **Microsoft Windows** folgt auf jede Interaktion eine unmittelbare Rückmeldung, z. B. leuchtet der Hintergrund eines berührten Objektes kurz auf. Dauert die Berührung an, wird dies durch einen Welleneffekt animiert. Für die Geschwindigkeit und Dauer einer Animation gibt es die Empfehlung, die Animation zu Beginn schnell und gegen Ende immer langsamer ablaufen zu lassen, um dem Benutzer ein Gefühl von Kontrolle zu vermitteln (Abbildung 3.29).

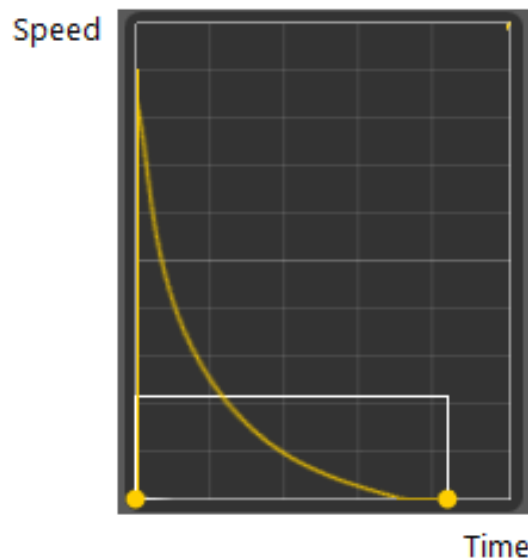
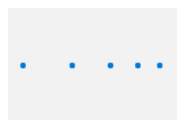


Abbildung 3.29: Geschwindigkeitsverlauf von Animationen in Microsoft Windows (Microsoft 2015b)

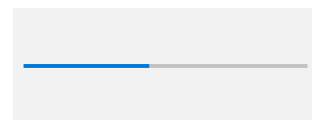
Generell sollte auf langsame Animationen verzichtet werden, da sich Prozesse durch die Visualisierung verzögert anfühlen können. Es wird empfohlen, auf schnelle Animationen zur Darstellung einer Verzögerung zurückzugreifen (Abbildung 3.30).



(a) asynchrone Verzögerung  
als Ring



(b) asynchrone Verzögerung  
als Balken



(c) synchrone Verzögerung  
bekannter Dauer

Abbildung 3.30: Rückmeldungen zu Verzögerungen von Microsoft Windows (Microsoft 2015b)



Auch Microsoft Windows verfügt über interaktive Benachrichtigungen, wobei diese zum Zeitpunkt der Analyse nicht in den Design Guides dokumentiert waren. Lediglich in einem Blog, der von Microsoft-Mitarbeitern betrieben wird, findet man die entsprechende Dokumentation (Microsoft 2015a) samt Abbildung (Abbildung 3.31).

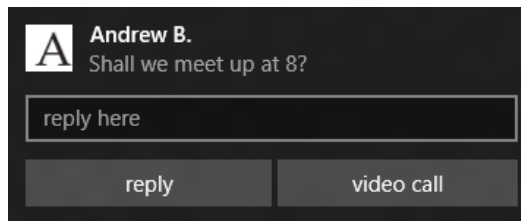


Abbildung 3.31: Benachrichtigung von Microsoft Windows (Microsoft 2015a)

Die von Microsoft vorgesehenen Schaltflächen sind zustandsabhängig visualisiert (Abbildung 3.32), wobei die Zustände eindeutig unterscheidbar sind.

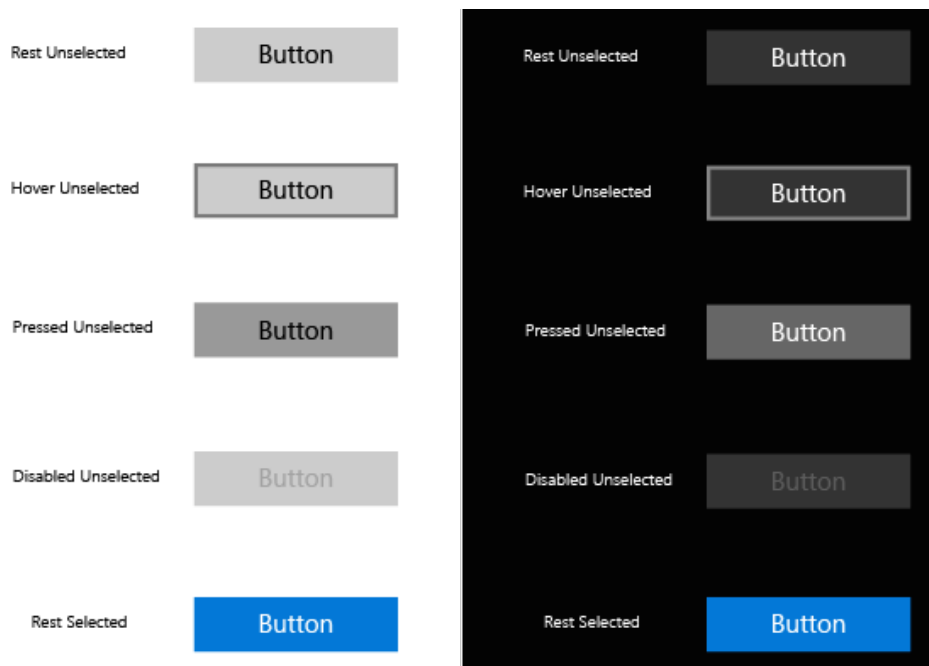


Abbildung 3.32: Schaltflächenzustände von Microsoft Windows (Microsoft 2015b)


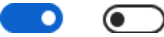

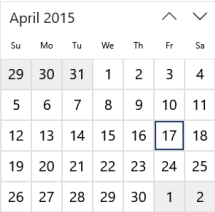


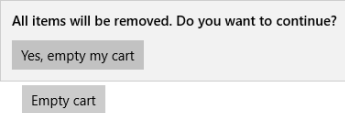
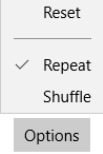
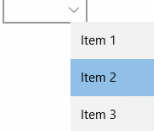
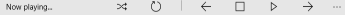
Obwohl Microsoft Windows 10 ein Betriebssystem für klassische Computer ist, wird in den Design Guides empfohlen, die Benutzungsschnittstelle primär auf die direkte Touchscreeninteraktion mit dem Finger auszulegen, sofern die Aufgaben kein häufiges Schreiben und pixelgenaue Manipulation erfordern. Daher wird vorgegeben, dass immer eine Alternative zur Hover-Funktion vorhanden sein soll. Durch diese Maßnahmen soll sowohl die direkte Manipulation mit klassischen Eingabegeräten

wie Tastatur und Maus als auch die direkte Eingabe mittels eines angeschlossenen Touchscreen-Monitors bzw. eines entsprechend ausgestatteten Notebooks sichergestellt werden. Die Abmessungen für sichtbare Bedienelemente werden seit Windows 10 in effektiven Pixeln (epx) in der Entwicklungsumgebung angegeben. Da eine UWP-Anwendung für Microsoft Windows sowohl auf klassischen Computern als auch auf Tablets und Smartphones laufen soll, werden die effektiven Pixel in Abhängigkeit der Geräteklasse auf die tatsächliche Größe skaliert. Im Gegensatz zu anderen Betriebssystemen sind die geräteklassenspezifischen Skalierungsfaktoren bei Microsoft nicht dokumentiert. Bei der Recherche nach Mindestgrößen für Bedienelemente findet man Angaben für ältere Windows-Versionen, die nicht auf effektiven Pixeln basieren (Microsoft 2012): So wird für die sichtbaren Bedienelemente von Microsoft Windows in der Version 8 eine touchsensitive Größe von mindestens  $48\text{ px} \times 48\text{ px}$  bzw.  $9\text{ mm} \times 9\text{ mm}$  empfohlen. Sollten kleinere Schaltflächen notwendig sein, sollte von Mitte zu Mitte von zwei benachbarten Bedienelementen ein Abstand von mindestens 9 mm eingehalten werden. Die sichtbare Fläche eines Bedienelementes kann bis zu 40 % kleiner sein als die Berührungsempfindliche. Zwischen zwei interaktiven Elementen sollte ein Abstand von mindestens 2 mm sein. Für die zum Zeitpunkt der Arbeit aktuelle Version Windows 10 bzw. Windows 10 Mobile konnten keine Mindestgrößen für sichtbare Bedienelemente ermittelt werden. Die Pixelangaben von Windows 8 können wegen dem Wechsel der Maßeinheit auf effektive Pixel, der hinzugekommenen Unterstützung weiterer Geräteklassen und den dafür fehlenden Skalierungsfaktoren nicht einfach übertragen werden.

Während bei Microsoft einige visuelle Bedienelemente, wie z. B. „Segmented Control“ oder „Table View Elements“ nicht zu den Standardelementen gehören, werden die verschiedenen Funktionalitäten der Leisten für Navigation, Werkzeuge und Tabs durch die sogenannte „Command Bar“ abgedeckt. Zusätzlich zu anderen Betriebssystemen mit integrierter Touchscreenunterstützung gibt es bei Microsoft die Interaktionselemente „Drop Down“ und ein „Fly Out“ sowie die Erweiterung des „Textfield“ zum „Auto Suggest Box“. Das Element „Fly Out“ stellt eine besondere Form der Benachrichtigung dar, in der kritische Systembenachrichtigung dem Benutzer präsentiert werden. Bei der „Auto Suggest Box“ handelt es sich um ein Feld zur Freitexteingabe, dass über eine automatische Vervollständigung bereits begonnener Eingaben verfügt. Eine Übersicht der visuellen Bedienelemente von Microsoft Windows findet sich in Tabelle 3.6 auf S. 110.

Neben der kognitiven Assistenz durch animierte visuelle Übergänge der grafischen Benutzungsschnittstelle weist Microsoft Windows weitere Assistenzfunktionen wie Autokorrektur und Autovervollständigung (Abbildung 3.33 auf S. 109) auf. Die Dokumentation lieferte keine Anhaltspunkte für eine dynamische Anpassung der berührungsempfindlichen Fläche von Bedienelementen.

Tabelle 3.6: Visuelle Bedienelemente von Microsoft Windows (Microsoft 2015b)

Bezeichnung	Beschreibung	Element
Button	einfache Schaltfläche zum Antippen	
Toggle Switch	Wechsel zwischen zwei gegensätzlichen Optionen	
Checkbox	Mehrfachauswahl	<input type="checkbox"/> CheckBox <input checked="" type="checkbox"/> CheckBox <input type="checkbox"/> CheckBox
Radio Button	Einfachauswahl	<input type="radio"/> RadioButton 1 <input checked="" type="radio"/> RadioButton 2
Toggle Button	Einfach- oder Mehrfachauswahl thematisch zusammenhängender Optionen	
Picker	Einfachauswahl aus komplexen Möglichkeiten	
Slider	stufenlose Einstellung eines Wertes innerhalb eines vorgegebenen Intervalls	
Auto Suggest Box	Feld zur Eingabe von Freitext mit Autovervollständigung	
Fly Out	Rückfrage bei kritischer Entscheidung	
Menu	Optionen und Einstellungen einer Anwendung	
Drop Down	Einfachauswahl	
Command Bar	kontextsensitive Aktionen	

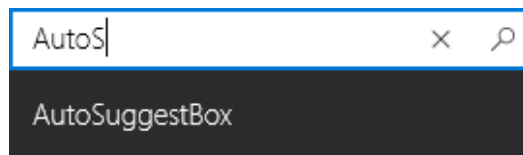


Abbildung 3.33: Assistenzfunktion zur Autovervollständigung von Microsoft Windows (Microsoft 2015b)

Die von Microsoft Windows unterstützten Interaktionsformen (Tabelle 3.7) sind nahezu identisch zu anderen Betriebssystemen. Einzig beim doppelten Tippen ist keine Aktion hinterlegt. Das Gedrückthalten führt zu einem kontextsensitiven Hilfemenü statt zu einem Menü mit kontextsensitiven Aktionen. In der Standardkonfiguration finden Eingaben mit einem und mit zwei Fingern statt und die Berührungen werden mittels Letztkontaktberührung als Eingabe erkannt.

Tabelle 3.7: Interaktionsformen von Microsoft Windows (Microsoft 2012)

Geste	Beschreibung	Aktion
Tippen	kurze gezielte Berührung mit einem Finger	Element auswählen oder manipulieren
Ziehen	Bewegung eines oder mehrerer Finger während der Berührung	Scrollen, Blättern, Element bewegen oder Ansicht innerhalb einer Hierarchiestufe wechseln
Wischen	schnelles Ziehen	Nutzen der Trägheit zum Scrollen oder Ansicht innerhalb einer Hierarchiestufe wechseln
Auseinanderziehen	zwei oder mehr Finger (meist Daumen und Zeigefinger) während der Berührung auseinander bewegen	Heranzoomen
Zusammenziehen	zwei oder mehr Finger (meist Daumen und Zeigefinger) während der Berührung aufeinander zu bewegen	Herauszoomen
Rotieren	zwei Finger (meist Daumen und Zeigefinger) während der Berührung um den Mittelpunkt verdrehen	Ausrichtung ändern
Gedrückt halten	längere Berührung mit individuellem Finger ohne Bewegung	Hilfe anzeigen

Das touchscreenspezifische Benutzermodell von Microsoft Windows ermöglicht aktuell die Konfiguration einer Sprachausgabe sowie als Einziges der verglichenen Betriebssysteme die explizite Kalibrierung des Touchscreens sowie die Umstellung von Letztkontaktberührung auf Erstkontaktberührung. Das Dialogsystem unterstützt

die gleichrangige oder hierarchische Anordnung verschiedener Anwendungsbestandteile. Beide Varianten kommen in den meisten Anwendungen und in Microsoft Windows selbst vermischt vor. Als Einzige der verglichenen Softwareplattformen ist Microsoft Windows ein klassisches WIMP-System (Windows, Icons, Menus, Pointer), bei dem die Eingabemöglichkeiten auf den Touchscreen erweitert und dabei der Pointer (Cursor) weggelassen wurde. Das Dialogsystem erlaubt daher Anwendungen, die nicht im Vollbildmodus laufen sowie das Stapeln mehrerer Fenster. Die Navigation in die Tiefe funktioniert durch das Antippen von Schaltflächen. Um zurück zu kommen, ist eine entsprechende Schaltfläche in der „Command Bar“ (vgl. Tabelle 3.6) vorgesehen. Diese Zurück-Schaltfläche ist aber vom jeweiligen Anwendungsentwickler selbst zu implementieren, so dass die Verfügbarkeit nicht in jeder Anwendung garantiert werden kann. Mit einer Einfinger-Wischgeste vom Bildschirmrand zur Mitte der Anzeige öffnet sich ein Kontextmenü, das weitere Interaktionen ermöglicht. Wird diese Geste vom rechten Bildschirmrand ausgeführt, öffnet sich das „Info Center“. Ein Wischen vom oberen Bildschirmrand führt im Vollbildmodus zur Titelleiste der Anwendung; das Wischen von links zu einer Übersicht aller geöffneten Anwendungen. Die Taskleiste von Microsoft Windows öffnet sich beim Wischen vom unteren Bildschirmrand. Dort befinden sich die Möglichkeiten zum Wechsel in die Hauptansicht oder zum Starten neuer Anwendungen.

Bei Microsoft Windows ist als Besonderheit erwähnenswert, dass das Betriebssystem aus historischen Gründen Softwarebestandteile älterer Windows-Versionen enthält, die bisher nicht für eine Touchscreennutzung optimiert wurden, z. B. Benachrichtigungen in der Taskleiste oder Systemdialoge und Fehlermeldungen. Weiterhin ist es möglich, Anwendungen für Microsoft Windows zu erstellen, die nicht den Empfehlungen für UWP-Apps entsprechen und sich somit nur schwer oder gar nicht mit dem Finger benutzen lassen. Allein bei der Version für Smartphones „Microsoft Windows 10 Mobile“ wird über den herstellereigenen Mechanismus zur Softwareverteilung (App-Store) dafür gesorgt, dass Benutzer nur Anwendungen beziehen können, die vollständig mittels Touchscreen benutzbar sind. Microsoft Windows lässt sich umfangreich mit Software von Drittanbietern erweitern. Im Gegensatz zu Google Android obliegt diese Erweiterung aber dem Benutzer des Betriebssystems, so dass dieser zusätzliche Softwarekomponenten selbst installieren kann, z. B. für die Unterstützung weiterer Interaktionsformen.

## 3.5 Zusammenfassung der Analyseergebnisse

Für die an der Touchscreeninteraktion beteiligten technischen Bestandteile konnten im Rahmen der durchgeführten Analysen interaktionsbeeinflussende Kriterien

recherchiert und darauf aufbauend technologiespezifische Möglichkeiten und Einschränkungen unterschiedlicher Technologien erarbeitet werden. Um im Gestaltungsprozess entsprechend des Nutzungskontextes (vgl. Abschnitt 2.6) gezielt geeignete Technologien auswählen zu können, wurden die Analyseergebnisse in Tabellenform zusammengefasst.

Die Analyse der Bilderzeugung ergab fünf Kriterien (vgl. Unterabschnitt 3.1.1) und fünf verschiedene technische Realisierungsmöglichkeiten (vgl. Unterabschnitt 3.1.2). Zusätzlich wurden zu jeder technischen Realisierung spezifische Besonderheiten identifiziert, die ebenfalls einen Einfluss auf die Interaktion haben. Zusammengefasst sind die Analyseergebnisse in Tabelle 3.8 auf S. 113 wiedergegeben.

Die Ergebnisse der Analyse zur Berührungserfassung umfassten 14 unterscheidbare Realisierungsmöglichkeiten (vgl. Unterabschnitt 3.2.2) und acht Analysekriterien sowie fünf technologiespezifische Besonderheiten (vgl. Unterabschnitt 3.2.1). Die verschiedenen Realisierungsmöglichkeiten konnten aufgrund technologischer Ähnlichkeiten, z. B. digitale Bildverarbeitung, zu sieben Gruppen zusammengefasst werden. Die konsolidierten Analyseergebnisse dieser Touchscreentechnologien finden sich in Tabelle 3.9 auf S. 115.

Im Rahmen der Analyse technischer Realisierungsmöglichkeiten haptischer Rückmeldungen für Touchscreens wurden vier unterschiedliche Technologien identifiziert (vgl. Unterabschnitt 3.3.2). Für die Analyse konnten die Grundsätze der Informationsdarstellung als Grundlage herangezogen und um spezifische Besonderheiten so ergänzt werden, dass daraus sechs Analysekriterien hervorgingen (vgl. Unterabschnitt 3.3.1). Zusätzlich wurden noch technologiespezifische Besonderheiten berücksichtigt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse zur Analyse der haptischen Rückmeldungen ist in Tabelle 3.10 auf S. 116 enthalten.

Für die Analyse verschiedener Softwareplattformen mit integrierter Unterstützung für die Touchscreeninteraktion (vgl. Abschnitt 3.4) wurden insgesamt sechs Kriterien identifiziert, welche die touchscreenbasierte Interaktion mit der jeweiligen Softwareplattform beeinflussen (vgl. Unterabschnitt 3.4.1). Um Besonderheiten einzelner Systeme zu berücksichtigen, wurde dieser Punkt als zusätzliches Kriterium ergänzt. Für die Analyse der verschiedenen softwaretechnischen Implementierungen wurde anhand der Marktabdeckung eine Auswahl aus den zahlreichen verfügbaren Systemen getroffen (vgl. Unterabschnitt 3.4.2). Die Ergebnisse der Analyse verschiedener Touchscreenbetriebssysteme sind in Tabelle 3.11 auf S. 117 zusammengefasst.

Tabelle 3.8: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Analyse technologieabhängiger Interaktionsmöglichkeiten verschiedener Bilderzeugungstechnologien

	CRT	LCD	E-Paper	LED	Projektion
<b>Leuchtdichte</b>	sehr gut	gut	– / sehr gut	sehr gut	mittel
<b>Kontrast</b>					
<b>räumliche Auflösung</b>	variabel	fest	fest	fest	fest
<b>Bildrate</b>	sehr hoch	mittel	sehr niedrig	hoch	mittel
<b>Farbwiedergabe</b>	sehr gut	gut	monochrom	sehr gut	eingeschränkt
<b>Betrachtungswinkel</b>	hoch	eingeschränkt	sehr hoch	hoch	sehr hoch
<b>Besonderheiten</b>	Bilder können einbrennen, empfindlich für Magnetfelder, nur stationäre Anwendungen	defekte Pixel mögl., druck- und temperaturempfindlich	Farbdarstellung aufwändig, Bilddarstellung im stromlosen Zustand, biegbare Anzeigen mögl.	Farben altern unterschiedlich (OLED), biegbare Anzeigen mögl.	Fliegengitter- oder Regenbogeneffekt mögl., Lüftergeräusche, Verdeckung bei Frontprojektion, nur stationäre Anwendungen

Tabelle 3.9: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Analyse technologieabhängiger Interaktionsmöglichkeiten verschiedener Touchscreentechnologien

	Resistiv	Kapazitiv	Surface Acoustic Wave	Acoustic Pulse Recognition	Infrarotgitter	Bildverarbeitung	In-Cell
optische Darstellungsqualität	mittel	gut	gut	gut	sehr gut	mittel	sehr gut
Parallaxenfehler	gering	mittel – stark	mittel	mittel	mittel	mittel	nie
Kalibrierung	regelmäßig	selten	selten	einmalig	selten	regelmäßig	nie
Eingabemittel	druckstabil	elektrisch leitend	schallabsorbierend	beliebig	IR-opak	IR-opak	LS: IR-opak, VS und CS: druckstabil
Anzahl erfassbarer Berührungen	eine	mehrere	mehrere	mehrere	mehrere	mehrere	mehrere
Ghosting	anfällig	robust	anfällig	robust	anfällig	robust	robust
Drag-and-drop	nein	ja	ja	ja	ja	ja	LS: ja, VS: bedingt, CS: nein
Beeinträchtigung durch Verschmutzung	gering	gering	mittel	gering	gering	hoch	gering
Besonderheiten	verschleißanfällig	Vandalismusschutz möglich	Vandalismusschutz möglich	beliebige Eingabe: mittel über Klangprofile	Eingabe wird vor Berührung erfasst	sehr große Touchscreens möglich	pixelgenaue Berührungserfassung möglich

LS: Light Sensing, VS: Voltage Sensing, CS: Charge Sensing



Tabelle 3.10: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Analyse technologieabhängiger Interaktionsmöglichkeiten verschiedener Rückmeldungstechnologien

	Elektromechanische Rückmeldung	Elektrotaktile Rückmeldung	Hydraulische Rückmeldung	Magnetische Rückmeldung
<b>Wahrnehmungsmodalität</b>	taktil	taktil, Eigenbewegung erf.	taktil	taktil
<b>Ausgabekanäle</b>	1	variabel	1	nur 1 sinnvoll
<b>Latenz</b>	gering	sehr gering	sehr hoch	sehr gering
<b>Zeitliche Auflösung</b>	gut	sehr gut	nicht möglich	sehr gut
<b>Intensität</b>	geringe Amplitude, Frequenz und Kraft hoch	sehr gering	hoch	sehr gut
<b>Intensitätsauflösung</b>	gering (Elektromagnet) bis hoch (Vibrationsmotor)	hoch, kontinuierlich	nicht möglich, Intensität binär	hoch, kontinuierlich
<b>Räumliche Auflösung</b>	nicht realisierbar	sehr hoch	nicht möglich, Anordnung fix	mittel
<b>Besonderheiten</b>	auditiv wahrnehmbar, Nachlauf mögl., ggf. Schwingungsartefakte	geräuschlos, abh. von Hautleitwert & Luftfeuchte	beeinflusst opt. Eigenschaften der Anzeige, verschleißanfällig, bei Defekt systemkritisch	Magnet an der Fingerkuppe notwendig, Berührung des Touchscreens nicht notwendig

Tabelle 3.11: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Analyse technologieabhängiger Interaktionsmöglichkeiten verschiedener Softwareplattformen

	Apple iOS	Google Android	Microsoft Windows
<b>Rückmeldungen</b>	Animationen, Benachrichtigungen, Klänge, Vibration	Animationen, Benachrichtigungen, Klänge, Vibration	Animationen inkl. Geschwindigkeitsempfehlungen, Benachrichtigungen, Klänge
<b>Bedienelemente</b>	mind. 7,3 mm, Drop Down & Check Box fehlen	mind. 7,2 mm, Unterschied zwischen sichtbarer und interaktiver Fläche	keine Mindestgröße, keine besonderen Elemente für Listen & Tabellen
<b>Assistenzfunktionen</b>	Autokorrektur, Autovervollständigung, dynamische berührungsempfindliche Schaltflächen	Autokorrektur, Autovervollständigung, dynamische berührungsempfindliche Schaltflächen	Autokorrektur, Autovervollständigung
<b>Interaktionsformen</b>	2-Finger-Gesten, Kontextmenü bei Gedrückthalten oder Fingerdruck	2-Finger-Gesten, Kontextmenü bei Gedrückthalten, doppelt Tippen zur Textauswahl	2-Finger-Gesten, doppeltes Tippen ohne Funktion, Hilfe bei Gedrückthalten
<b>Benutzermodell</b>	Sprachausgabe, Töne, Vibration, Kontrast	Sprachausgabe, Dauer für Gedrückthalten, Vergrößerungsgeste	Sprachausgabe, Kalibrierung, Erstkontaktberührung, erweiterbar
<b>Dialogsystem</b>	zurück über Schaltfläche in Navigation Bar, Hardkey für Hauptansicht, Doppelklick zum Anwendungswechsel	Softkeys für zurück, Hauptansicht & Anwendungswechsel	zurück ggf. über Schaltfläche in Command Bar, 4 Wischgesten für Anwendungswechsel, Fenster ohne Vollbild, Überlagerung von Fenstern
<b>Besonderheiten</b>	Erscheinungsbild auf allen Geräten gleich, keine Anpassung durch Mobilfunkbetreiber oder Benutzer	oft Softwareanpassungen durch Gerätehersteller & Mobilfunkanbieter, drucksensitive Interaktion mögl., aber ohne Gestaltungsempf. und bisher kein Gerät verfügbar	historische Softwarebestandteile ohne Touchoptimierung vorhanden, vom Benutzer mittels Software erweiterbar, UWP-Vorgaben auch für Windows 10 Mobile gültig

## 3.6 Schlussfolgerung

Im Rahmen dieses Kapitels konnten die Interaktionsmöglichkeiten und -einschränkungen der verschiedenen technologischen Realisierungsmöglichkeiten der einzelnen Bestandteile eines Touchscreensystems (Forschungsfrage 1) durch eine Literaturanalyse beantwortet werden. Die in tabellarischer Form zusammengefassten Ergebnisse zu Bilderzeugung, Berührungserfassung, künstlichen haptischen Rückmeldungen und Softwareplattformen (s. Abschnitt 3.5) ermöglichen bei der Gestaltung eines Touchscreensystems die gezielte Auswahl der geeigneten Technologien gemäß dem jeweils vorliegenden Nutzungskontext (s. Unterabschnitt 2.6.2).

## 4 Empirische Untersuchung der Touchscreeninteraktion

Im Rahmen der empirischen Studien, wurden Antworten auf die in Abschnitt 2.7 formulierten Forschungsfragen gesucht, die sich nicht über eine Recherche oder theoretische Analyse erarbeiten ließen. Konkret konnten für folgende Forschungsfragen empirische Studien konzipiert, durchgeführt und ausgewertet werden:

2. Wie gebrauchstauglich sind die grundlegenden touchscreenbasierten Interaktionsformen?
3. Wie zeitintensiv ist die Nutzung von Touchscreensystemen im Arbeitsumfeld?
4. Verändert sich die Interaktion durch die touchscreeninduzierte Ermüdung des Hand-Arm-Systems?
5. Können aus der touchscreeninduzierten Ermüdung des Hand-Arm-Systems Empfehlungen für die Dauer der Touchscreeninteraktion und der notwendigen Erholungspausen abgeleitet werden?
6. Lässt sich die Interaktion mit Touchscreensystemen durch haptische Rückmeldungen verbessern?

Diese Fragen sind im Basismodell für Touchscreensysteme (vgl. Abbildung 2.8 in Abschnitt 2.2) der Benutzungsschnittstelle und dabei konkret der Interaktion mittels Touchscreens zuzuordnen. Die Fähigkeiten des Subsystem Mensch – konkret die Leistung hinsichtlich Perzeption, Kognition und Biomechanik – sind dafür genauso erforderlich wie die technischen Bestandteil des Subsystems Maschine.

### 4.1 Gebrauchstauglichkeit touchscreenbasierter Interaktionsformen

Die theoretischen Grundlagen der Touchscreeninteraktion zeigten, dass eine Interaktion und damit letztendlich die Bewältigung einer Aufgabe durch unterschiedliche

Interaktionsformen erfolgen kann (vgl. Abschnitt 2.4). Bisher ungeklärt war die Gebrauchstauglichkeit der verschiedenen Interaktionsmöglichkeiten von Touchscreens (vgl. Unterabschnitt 2.4.3). In dieser Studie sollten daher verschiedene Interaktionsformen untersucht und verglichen werden, mit denen an einem Touchscreen interagiert werden kann.

### 4.1.1 Hintergrund

Durch die Nutzung von Berührungen sind abseits des Antippens weitere Interaktionsformen realisierbar (vgl. Abschnitt 3.4). Mit Hilfe der Norm DIN EN ISO 9241-400 lassen sich einige touchscreenrelevanten Interaktionsformen nach ihrer Elementaraufgabe aufschlüsseln. Für die Touchscreeninteraktion wurden die Elementaraufgaben zusätzlich um die Mehrfingergesten ergänzt, die keine virtuelle Schaltfläche zur Interaktion erfordern (Wu & Balakrishnan 2003, Bragdon et al. 2011):

**direktes Zeigen bzw. Tippen:** Treffen eines Zielobjektes, z. B. mit einem Finger

**Auswählen:** Wählen eines oder mehrerer Objekte

**Ziehen:** Bewegen eines oder mehrerer Objekte durch Führen entlang eines vorgegebenen Weges

**Nachziehen:** Folgen von Umrissen durch Bewegen des Eingabegerätes

**Wischen:** schnelles Ziehen, auch mit mehreren Fingern

**Auseinanderziehen:** zwei Finger (meist Daumen und Zeigefinger) während der Berührung auseinander bewegen

**Zusammenziehen:** zwei Finger (meist Daumen und Zeigefinger) während der Berührung aufeinander zu bewegen

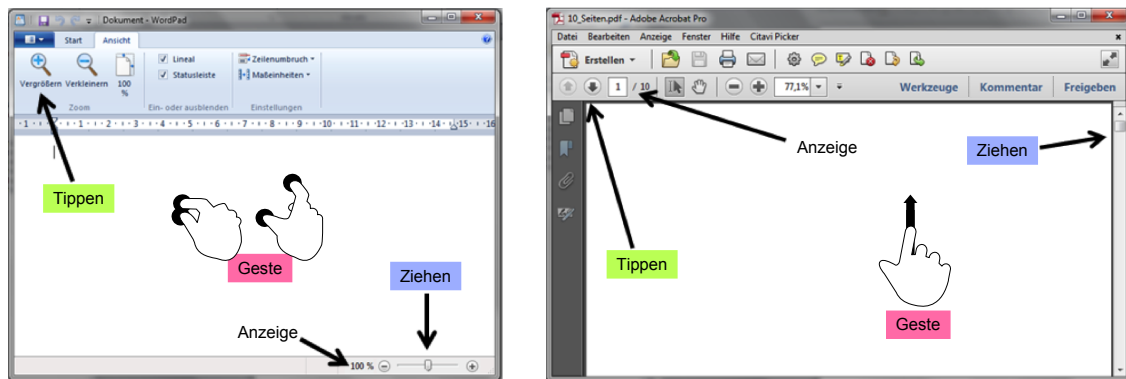
**Rotieren:** zwei Finger (meist Daumen und Zeigefinger) während der Berührung um ihren Mittelpunkt drehen

Die Auswahl der zu untersuchenden Interaktionsformen orientierte sich an den Ergebnisse der Analyse von Softwareplattformen mit integrierter Touchscreenunterstützung (vgl. Abschnitt 3.4). Für die Durchführung eines Nutzertests mussten Aufgaben gefunden werden, die die Aufgabenerfüllung mittels unterschiedlicher Interaktionsformen ermöglichen. Die unterschiedlichen Interaktionsformen sollten das Tippen, Ziehen und eine Geste umfassen und die Aufgaben sollten möglichst authentisch für die alltägliche Computernutzung sein, um die Einstiegshürde und Gewöhnungsphase für Probanden gering zu halten. Als Aufgaben wurde das Vergrößern bzw. Verkleinern der Darstellung eines Dokuments (Zoomen) und das Blättern durch ein

mehrseitiges Dokument ausgewählt. Durch eine Recherche unter gängigen Softwareanwendungen konnten zwei Anwendungen identifiziert werden, bei denen je eine der beiden Aufgaben Zoomen oder Blättern mit den drei vorgesehen Interaktionsformen Tippen, Ziehen und Geste gleichermaßen erledigt werden kann: Das Zoomen zu einer vorgegebenen Vergrößerungsstufe in Microsoft Word Pad (1) und das Blättern zu einer vorgegebenen Seite in Adobe Acrobat Pro (2).

Die Interaktion mit dem Programm Word Pad umfasste das Raus- und Heranzoomen. Dem Probanden wurde eine Vergrößerungsstufe vorgegeben, die er mittels mit einer der drei Interaktionsformen erreichen sollte. Die aktuelle Vergrößerungsstufe wird in Abbildung 4.1a auf S. 122 rechts unten als Prozentzahl angegeben. Bei der Interaktionsform Tippen wurden die lupenähnlichen Schaltflächen genutzt. Für eine Vergrößerung musste die Schaltfläche mit dem Plussymbol angetippt werden; für eine Verkleinerung die Schaltfläche mit dem Minussymbol. Dabei änderte sich die Vergrößerungsstufe in vorgegebenen Schritten. Für die Interaktionsform Ziehen wurde der Slider genutzt. Für eine Vergrößerung war der Slider nach rechts zu ziehen, für eine Verkleinerung nach links. Die Vergrößerungsstufe änderte sich dabei stufenlos; bei einer Vergrößerung von 100 % gab es eine Einrastfunktion, so dass eine Vergrößerungsstufe knapp über- oder unterhalb von 100 % nicht einzustellen war. Um den Slider an die empfohlene Größe für touchscreenbasierte Bedienelemente anzupassen (vgl. Unterabschnitt 3.4.1), wurde die Systemfunktion der Bildschirmlupe mit einer Vergrößerung von 175 % genutzt. Beim Zoomen mittels Geste führte das Auseinanderziehen von zwei Fingern zu einer Vergrößerung; das Zusammenführen zu einer Verkleinerung (vgl. Abschnitt 3.4).

Für die zweite Aufgabe wurde das Programm Adobe Acrobat Pro gewählt. Das für die Probanden zu erreichende Ziel war es, auf eine bestimmte Seite in einem Dokument zu gelangen. Anhand einer Angabe in der Funktionsleiste des Programms (Abbildung 4.1b auf S. 122) konnte der Proband erkennen, auf welcher Seite er sich aktuell befand. Um das Ziel mittels der Interaktionsform Tippen zu erreichen, sollte der Proband die Schaltflächen mit den darauf abgebildeten Pfeilen nutzen. Um eine Seite weiterzublätern, musste die Schaltfläche mit dem nach unten zeigenden Pfeil angeklickt werden; die Schaltfläche mit dem nach oben zeigenden Pfeil musste angeklickt werden, um zur zurückliegenden Seite zu gelangen. Bei der Interaktionsform Ziehen musste der Slider genutzt werden. Wurde der Slider nach oben gezogen, gelangte der Proband auf vorherige Seiten; wurde der Slider nach unten gezogen gelangte er auf die darauffolgende Seite. Für die Aufgabenbewältigung mit der Interaktionsform Geste wurde die Geste zum „Durchblättern von Objekten“ angewendet. Wie in Kapitel Interaktionsformen bereits erläutert, kam bei dieser Geste eine schnippartige Bewegung zum Einsatz. Um auf nachfolgende Seiten zu gelangen, wurde diese Geste nach oben ausgeführt. Die Ausführung der Gesten nach unten ermöglichte es, zu den vorherige Seiten zu blättern.



(a) Zoomen mittels drei Interaktionsformen in Microsoft Wordpad (b) Blättern mittels drei Interaktionsformen in Adobe Acrobat Pro

Abbildung 4.1: Aufgaben zur Untersuchung touchscreenbasierter Interaktionsformen

### 4.1.2 Vorgehen

Um die unterschiedlichen Interaktionsformen zu evaluieren, wurde ein laborbasierter Nutzertest mit Messwiederholungen und abhängiger Stichprobe (Within-Subjects Design, vgl. Keren 1993) konzipiert. Als abhängige Variablen wurden die Maße Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung (vgl. Abschnitt 2.6) der Gebrauchstauglichkeit nach DIN EN ISO 9241-11 gewählt. Die Operationalisierung ergab sich aus den Möglichkeiten bei der Aufgabenbearbeitung (vgl. Abbildung 4.1a und Abbildung 4.1b):

**Effektivität:** Anzahl nicht erfüllter Aufgaben, Anzahl an Aufgaben mit Unterstützung

**Effizienz:** Dauer zur Erfüllung der Aufgabe

**Zufriedenstellung:** System Usability Scale (SUS) nach Brooke (1996)

Die unabhängigen Variablen umfassen die Interaktionsform (Tippen, Ziehen oder Geste) und die Körperhaltung (sitzend oder stehend).

Die Erwartungen an die Studienergebnisse ergab folgende korrespondierenden Hypothesenpaare:

$H_{10}$  Die Interaktionsformen sind hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit gleich.

$H_{11}$  Die Interaktionsformen unterscheiden sich hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit.

*H*<sub>20</sub> Die Gebrauchstauglichkeit der Interaktionsformen ist bei jeder Körperhaltung gleich.

*H*<sub>21</sub> Die Gebrauchstauglichkeit der Interaktionsformen unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Körperhaltung.

Das Signifikanzniveau wurde mit den für nutzerbasierte Laboruntersuchungen üblichen  $\alpha = 0,05$  festgelegt (Bortz & Döring 2006, Eid et al. 2011). Entsprechend der Hypothesenanzahl ergibt sich eine Korrektur nach der Bonferroni-Methode (Dunn 1961) ein korrigiertes Signifikanzniveau von  $\alpha_{\text{kor}} = 0,025$ .

Bei der Anzahl nicht erfüllter Aufgaben und der Anzahl an Aufgaben, bei denen eine Hilfestellung notwendig war, handelt es sich um objektive Daten, die einfach abzählbar sind. Im Gegensatz dazu ist die Zufriedenstellung ein subjektives Maß, dass mit dem Standardfragebogen von Brooke (1996) operationalisiert wurde. Aus diesem Fragebogen resultiert eine Punktzahl, die wiederum eine Objektivierung und so den Vergleich der Zufriedenstellung zwischen den unterschiedlichen Interaktionsformen ermöglicht. Die Versuchsergebnisse umfassten zur Beschreibung der Stichprobe demografische Daten (Alter, Geschlecht) sowie Händigkeit nach Oldfield (1971) und Technikaffinität nach Karrer et al. (2009).

Zur Erfassung der Daten wurde eine Videobeobachtung und schriftliche Standardfragebögen verwendet. So wurden die ausgedruckten Fragebögen zur Händigkeit, die Technikaffinität und die Zufriedenstellung für die einzelnen Interaktionsformen von den Probanden handschriftlich ausgefüllt. Die Anzahl an nicht beendeten Aufgaben und Anzahl an Aufgaben mit benötigter Hilfestellung wurde anhand aufgezeichneter Videos ermittelt. Zur Aufzeichnung wurden eine USB-Kamera auf Stativ (The Imaging Source DFK 21AU04, The Imaging Source 2016), eine Webcam (Logitech QuickCam Pro 9000, Logitech 2016) sowie ein zusätzliches Klinkenmikrofon zusammen mit der Aufzeichnungssoftware (Noldus Media Recorder, Noldus 2016) eingesetzt, so dass sowohl die Interaktion als auch die Äußerungen von Proband und Versuchsleitung synchron erfasst wurden. Bei der Ermittlung der Dauer zur Aufgabenerledigung wurde zusätzlich eine Screenshot-Software (TechSmith Camtasia Studio, TechSmith 2016) eingesetzt, um den Bildschirminhalt des Touchscreens abzufilmen. Anhand dieser Videodaten konnte die Dauer der ersten Berührung bis zur erledigten Aufgabe erfasst werden.

Für der Interaktion im Sitzen wurde den Probanden ein Stuhl mit einer normalen Sitzhöhe von 45 cm und ein höhenverstellbarer Tisch bereitgestellt. Auf diese Weise wurde bei beiden Körperhaltungen eine optimale Anpassung an die unterschiedliche Körpergröße der einzelnen Probanden ermöglicht. Durch die individuelle Berücksichtigung von Blickwinkel und Reichraum konnten vergleichbare Bedingungen für



alle Probanden geschaffen werden. Der Touchscreen war Bestandteil eines Komplet-PCs (Asus ET2011EGT, Asus 2015) und Multitouch-fähig. Als Betriebssystem wurde Microsoft Windows in der Version 8.1 eingesetzt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.2 mit einem Probanden in stehender Körperhaltung zu sehen.

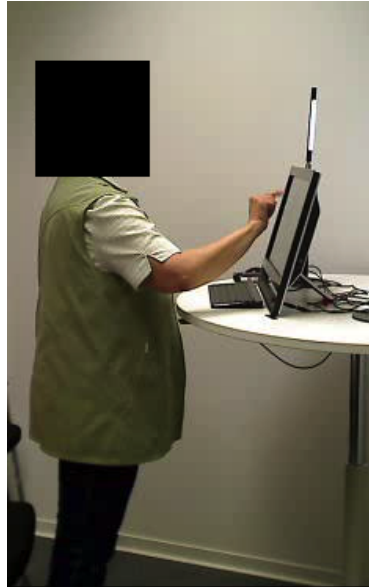


Abbildung 4.2: Versuchsaufbau zur Untersuchung touchscreenbasierter Interaktionsformen

Zur Analyse der Daten wurden die Videos ausgewertet und die Daten in einer Tabellenkalkulation konsolidiert. Die statistische Auswertung der Daten fand mit der Software RStudio Desktop in der Version 0.99.485 (RStudio 2015) statt.

An dem konzipierten Versuch durften alle potenziellen und tatsächlichen Benutzer herkömmlicher Touchscreens teilnehmen. Die Grundgesamtheit umfasste damit alle Menschen mit normaler oder korrigierter Sehfähigkeit sowie einem unbeeinträchtigten Hand-Arm-System für die Touchscreeneingabe. Das Anwerben von freiwilligen Probanden fand im persönlichen und erweiterten Umfeld des Fachgebiets Mensch-Maschine-Systemtechnik der Universität Kassel statt.

Zum Vergleich der verschiedenen Interaktionsformen sollten die Probanden die ihnen gestellten Aufgaben mit allen drei Interaktionsformen gleichermaßen erledigen. Der konzipierte Versuch ermöglichte für einen Probanden die Erledigung von zwei Aufgaben mit jeweils drei unterschiedlichen Interaktionsformen in je zwei Körperhaltungen und variabler Reihenfolge. Aus der daraus resultierenden Anzahl an möglichen Kombinationen wurde eine Auswahl für einen ausgeglichenen Versuchsplan (Tabelle 4.1) getroffen. Aus dem aufgestellten Versuchsplan resultierte die notwendige Probandenanzahl.

Tabelle 4.1: Ausgeglichener Versuchsplan zur empirischen Studie der Interaktionsformen

	Aufgabe											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Proband 1	sitzend						stehend					
	Zoomen			Blättern			Zoomen			Blättern		
	T	Z	G	T	Z	G	T	Z	G	T	Z	G
Proband 2	sitzend						stehend					
	Zoomen			Blättern			Zoomen			Blättern		
	T	G	Z	T	G	Z	T	G	Z	T	G	Z
Proband 3	sitzend						stehend					
	Zoomen			Blättern			Zoomen			Blättern		
	G	Z	T	G	Z	T	G	Z	T	G	Z	T
Proband 4	sitzend						stehend					
	Blättern			Zoomen			Blättern			Zoomen		
	G	T	Z	G	T	Z	G	T	Z	G	T	Z
Proband 5	sitzend						stehend					
	Blättern			Zoomen			Blättern			Zoomen		
	Z	G	T	Z	G	T	Z	G	T	Z	G	T
Proband 6	sitzend						stehend					
	Blättern			Zoomen			Blättern			Zoomen		
	Z	T	G	Z	T	G	Z	T	G	Z	T	G
Proband 7	stehend						sitzend					
	Zoomen			Blättern			Zoomen			Blättern		
	T	Z	G	T	Z	G	T	Z	G	T	Z	G
Proband 8	stehend						sitzend					
	Zoomen			Blättern			Zoomen			Blättern		
	T	G	Z	T	G	Z	T	G	Z	T	G	Z
Proband 9	stehend						sitzend					
	Zoomen			Blättern			Zoomen			Blättern		
	G	Z	T	G	Z	T	G	Z	T	G	Z	T
Proband 10	stehend						sitzend					
	Blättern			Zoomen			Blättern			Zoomen		
	G	T	Z	G	T	Z	G	T	Z	G	T	Z
Proband 11	stehend						sitzend					
	Blättern			Zoomen			Blättern			Zoomen		
	Z	G	T	Z	G	T	Z	G	T	Z	G	T
Proband 12	stehend						sitzend					
	Blättern			Zoomen			Blättern			Zoomen		
	Z	T	G	Z	T	G	Z	T	G	Z	T	G

T – Tippen, Z – Ziehen, G – Geste

Vor Beginn des eigentlichen Studie wurde mit einer zusätzlichen Testperson ein Probedurchlauf durchgeführt, um eventuelle Schwachstellen oder Fehler aufzudecken und um den Testleiter mit dem Ablauf vertraut zu machen. Durch diesen Pretest konnten missverständliche Formulierungen in den Versuchsanweisungen korrigiert, Abbruchkriterien und Eingriffspunkte überprüft sowie der Versuchsablauf finalisiert werden.

Zu Beginn eines Testes wurde der Proband begrüßt und ihm die Versuchsanleitung ausgehändigt. Nach dem Lesen der Anleitung und dem Ausfüllen der demografischen Daten sowie des Fragebogens zur Händigkeit wurde der Versuchsaufbau erklärt und dem Proband die Möglichkeit gegeben, Fragen zu stellen und die einzelnen Interaktionsformen auszuprobieren. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass der Proband die Aufgabenstellung verstanden hat. Zusätzlich wurde während der Testphase die Tischhöhe für die beiden Körperhaltungen sitzend und stehend individuell auf den jeweiligen Proband eingestellt, abgemessen und für die spätere Testdurchführung notiert.

Zur Datenaufzeichnung wurden die Kameras auf den Probanden eingestellt und, um den Bildschirm des Testgegenstandes ebenfalls mitzuschneiden, die Screencapture-Software gestartet. Anschließend startete der Nutzertest mit der Aufgabenbearbeitung gemäß Versuchsplan.

Die Aufgabe und die zu verwendende Interaktionsform wurden dem Proband gemäß der ihm zugewiesenen Nummer vom Versuchsleiter mündlich mitgeteilt, z. B.: „Zoomen Sie bitte mittels der Interaktionsform Tippen auf 180 Prozent!“. Auf diese Weise konnte sich der Proband komplett auf die zu erledigenden Aufgaben konzentrieren. Um zu überprüfen, ob der Proband auch die Aufgaben erfüllt, wurde sichergestellt, dass der Testleiter während des gesamten Tests die Möglichkeit hatte, den Touchscreen des Probanden einzusehen. Dies hatte zusätzlich den Vorteil, dass der Testleiter im Fall von Problemen eine Hilfestellung geben konnte. Um das Testergebnis jedoch nicht zu verfälschen, wurden die Fälle, in denen eine Hilfestellungen gegeben wurde, protokolliert, um diese in der Auswertung berücksichtigen zu können. Falls ein Proband die Aufgabe innerhalb von zwei Minuten nicht absolvieren konnte oder er der Meinung war, das Ziel nicht mehr erreichen zu können, wurde die Aufgabe als nicht erfüllt gewertet und zur nächsten Aufgabe gemäß Versuchsplan übergegangen. Nach Abschluss der Testaufgaben wurde der Proband gebeten, die Fragebögen zur System Usability Scale zu beantworten. Mit der Abgabe der ausgefüllten Fragebögen und der Verabschiedung war der Test für diesen Proband beendet.

### 4.1.3 Ergebnisse

An der Studie zur empirischen Untersuchung der Interaktionsformen nahmen fünf weibliche und sieben männliche Probanden teil. Mit 12 Probanden lag diese Studie in der oberen Hälfte der von Macefield (2009) zusammengetragenen Empfehlungen von 7 – 20 Probanden. Das mittlere Alter der Stichprobe betrug  $43,3 \pm 17,8$  Jahre (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung). Die detaillierte Altersverteilung ist im Diagramm in Abbildung 4.3 dargestellt.

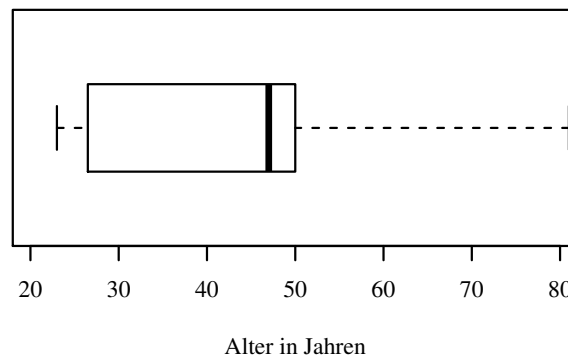


Abbildung 4.3: Altersverteilung der Stichprobe ( $n = 12$ )

Die erfragte Technikaffinität der Stichprobe nach Karrer et al. (2009) ist in Abbildung 4.4 auf S. 128 abgebildet. Auf den Subskalen der Technikaffinität konnten Werte zwischen 1 und 5 erreicht werden. Entsprechend der von Karrer et al. (2009) empfohlenen Auswertung wurde ein Item der Subskala „subjektive Kompetenz“ und alle Items der Subskala „negative Technikfolgen“ invertiert, so dass im Diagramm hohe Werte einer hohen Technikaffinität entsprechen. Da in den ersten drei Subskalen der Technikaffinität die einfache Mehrheit der Probanden oberhalb der Skalenmitte liegen, kann von einer technikaffinen Stichprobe ausgegangen werden. Lediglich die negativen Technikfolgen werden von den Probanden kritisch gesehen (drei Viertel der Probanden unterhalb der Skalenmitte). Die Auswertung des Edinburgh Inventory nach Oldfield (1971) ergab fünf Links- und sieben Rechtshänder.

Die Effektivität der Interaktionsformen wurde anhand der erfolgreich absolvierten Aufgaben bestimmt. Diese wurden zur Anzahl der mit der jeweiligen Interaktionsform begonnenen Aufgaben ins Verhältnis gesetzt. Die Ergebnisse zur Effektivität der Interaktionsformen sind in Tabelle 4.2 auf S. 128 zusammengefasst. Auffällig ist die hohe Effektivität der Interaktionsform Tippen, gefolgt von der Geste Blättern. Die Interaktionsform Ziehen und die Geste Zoomen erreichen eine geringere Effektivität. Ein Vergleich der Effektivität nach Körperhaltung ergab sowohl für die Interaktion im Stehen als auch im Sitzen eine Effektivität von 88,9 %.

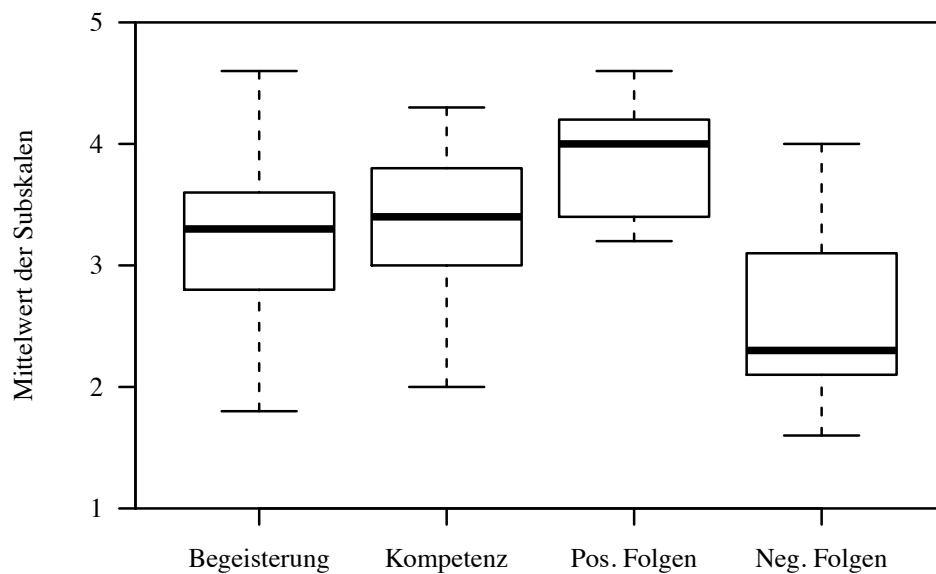


Abbildung 4.4: Technikaffinität der Stichprobe ( $n = 12$ )

Tabelle 4.2: Effektivität der Aufgabenbewältigung nach Interaktionsformen ( $n = 12$ )

Interaktionsform	Effektivität
Tippen	97,9 %
Ziehen	83,3 %
Geste Zoomen	79,2 %
Geste Blättern	91,7 %

Die Effizienz der Aufgabenerledigung nach Interaktionsformen ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Da die Daten keine Normalverteilung aufwiesen (Details s. Tabelle 4.3), wurde zur Hypothesenprüfung ein ungerichteter Wilcoxon-Vorzeichen-Rangsummentest angewendet. Beim Vergleich der Interaktionsformen innerhalb einer Aufgabe konnten bei der Aufgabe Zoomen signifikante Unterschiede sowohl zwischen der Geste Zoomen und der Interaktionsform Tippen ( $p = 0,000$ ;  $|Z| = 3,626$ ;  $N = 19$ ) als auch der Geste Zoomen und der Interaktionsform Ziehen ( $p = 0,002$ ;  $|Z| = 2,924$ ;  $N = 16$ ) nachgewiesen werden. Dabei waren die Interaktionen mittels Tippen und Ziehen im Median je 23s schneller als die Interaktion mittels Geste.

Die Aufgabe zum Blättern wurde mittels Tippen signifikant effizienter erledigt (Mediandifferenz  $-5,5$ s bzw.  $-50\%$ ) als mit der Interaktionsform Ziehen ( $p = 0,013$ ;  $|Z| = 2,438$ ;  $N = 20$ ). Eine statistische Analyse der Effizienz der einzelnen Interaktionsformen nach Körperhaltung (Abbildung 4.6 auf S. 130) ergab für keinen der insgesamt sechs möglichen Paarvergleiche einen signifikanten Unterschied.

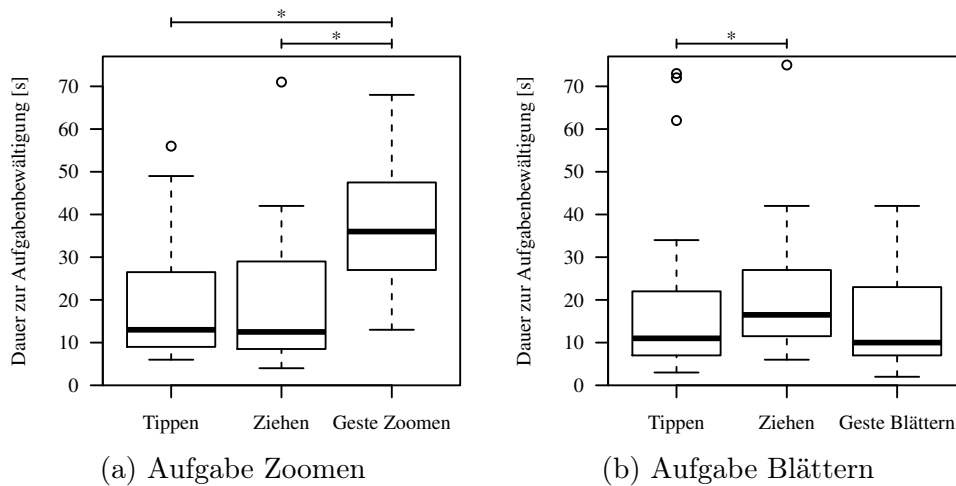


Abbildung 4.5: Effizienz der Aufgabenbewältigung nach Interaktionsformen ( $n = 12$ ,  $N = 24$ )

Tabelle 4.3: Ergebnisse zum Test auf Normalverteilung der Effizienz je Interaktionsform (Shapiro-Wilk-Test;  $\alpha = 0,05$ ;  $n = 12$ )

Aufgabe Zoomen			
	Tippen	Ziehen	Geste Zoomen
<b>p</b>	0,001	0,001	0,709*
<b>W</b>	0,816	0,802	0,967*
<b>W<sub>krit</sub></b>	0,957	0,950	0,948
Aufgabe Blättern			
	Tippen	Ziehen	Geste Blättern
<b>p</b>	0,000	0,000	0,009
<b>W</b>	0,683	0,780	0,874
<b>W<sub>krit</sub></b>	0,955	0,950	0,953

\* Normalverteilung

Bei der Zufriedenstellung der Probanden hinsichtlich der unterschiedlichen Interaktionsformen (Abbildung 4.7 auf S. 131) konnten für den System Usability Score nach Brooke (1996) Werte zwischen 0 (geringe Zufriedenstellung) und 100 (hohe Zufriedenstellung) erreicht werden. Die Ergebnisse der Zufriedenstellung zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen der Interaktionsform Tippen und den Interaktionsformen Ziehen und der Geste zum Zoomen (Tabellen 4.4 und 4.5 auf S. 131). So sind die Probanden mit dem Tippen im Mittel 40 % zufriedener als mit dem Ziehen und 22 % zufriedener als mit der Geste zum Zoomen. Zwischen der Interaktionsform Ziehen und der Geste zum Blättern deutet sich zumindest eine Tendenz bei der Zufriedenstellung an (Differenz: 25 %, nicht signifikant).

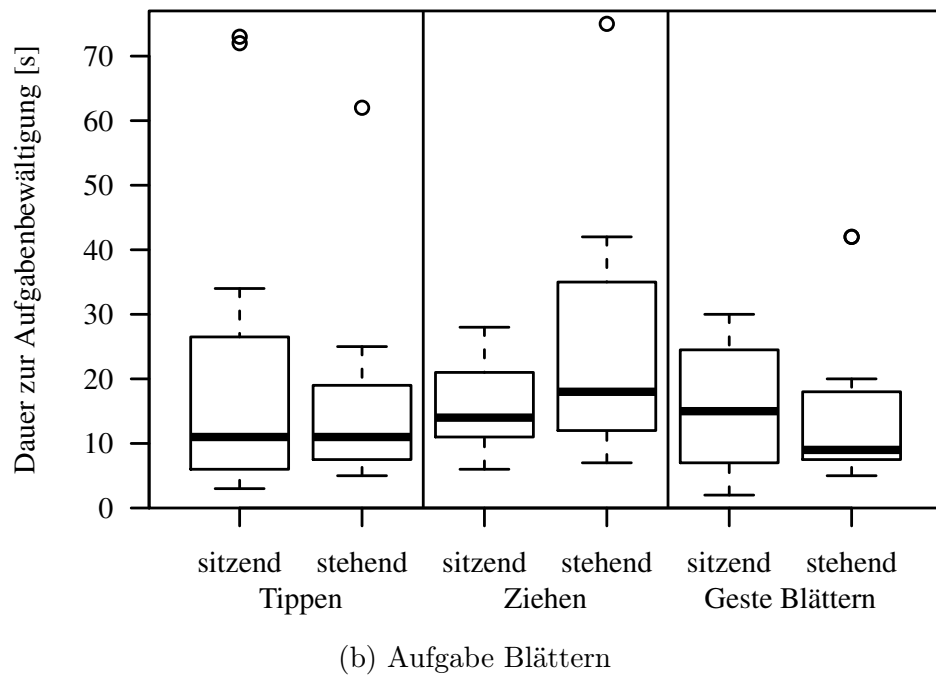
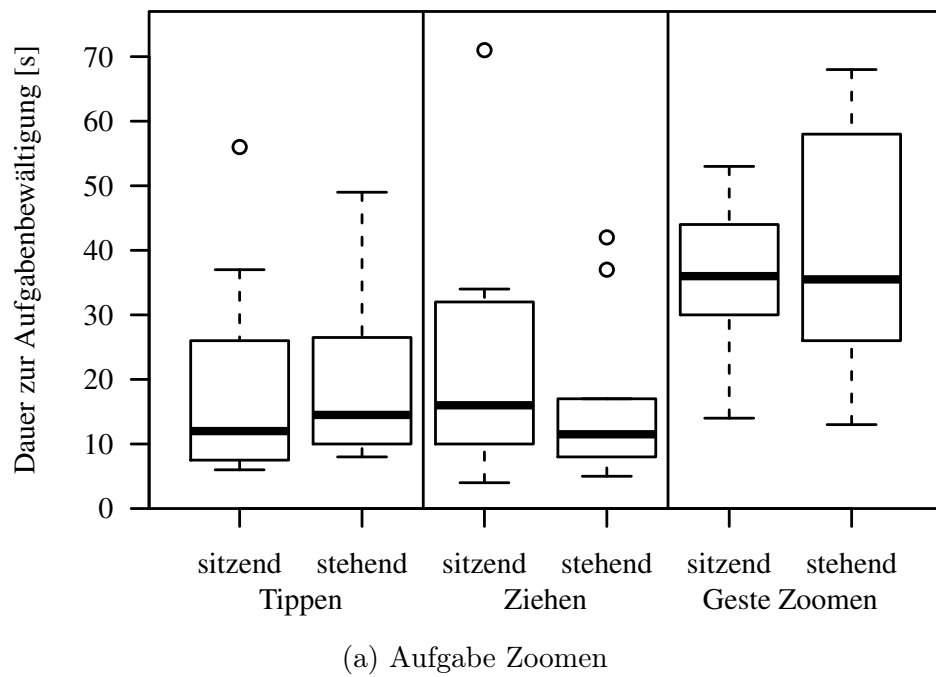


Abbildung 4.6: Effizienz der Aufgabenbewältigung nach Interaktionsformen und Körperhaltung ( $n = 12$ )

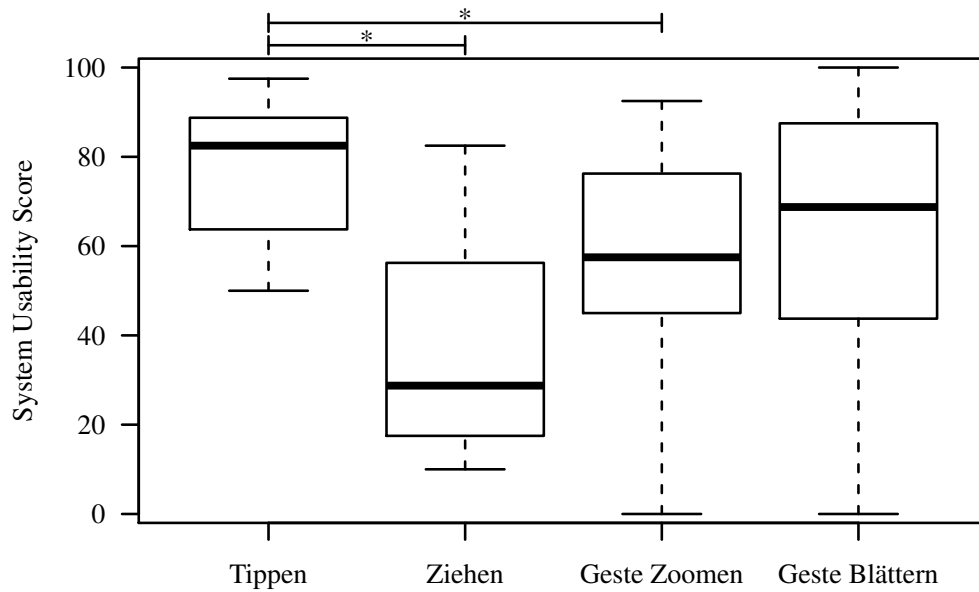


Abbildung 4.7: Zufriedenstellung der Probanden mit den Interaktionsformen ( $n = 12$ )

Tabelle 4.4: Ergebnisse zum Test auf Normalverteilung des System Usability Score je Interaktionsform (Shapiro-Wilk-Test;  $\alpha = 0,05$ ;  $n = 12$ ;  $W_{\text{krit}} = 0,928$ )

	Tippen	Ziehen	Geste Zoomen	Geste Blättern
<b>p</b>	0,350	0,278	0,468*	0,444*
<b>W</b>	0,927	0,919	0,938*	0,936*

\* Normalverteilung

Tabelle 4.5: Ergebnisse zum Signifikanztest der Zufriedenstellung der Probanden mit den Interaktionsformen (zweiseitiger Wilcoxon-Vorzeichen-Rangsummentest;  $\alpha_{\text{kor}} = 0,025$ ;  $n = 12$ ;  $Z_{\text{krit}} = 1,960$ )

		Ziehen	Geste Zoomen	Geste Blättern
<b>Tippen</b>	<b>p</b>	0,000*	0,023*	0,088
	<b> Z </b>	3,060*	2,237*	1,734
<b>Ziehen</b>	<b>p</b>	–	0,170	0,027
	<b> Z </b>	–	1,414	2,197
<b>Geste Zoomen</b>	<b>p</b>	–	–	0,988
	<b> Z </b>	–	–	0,051

\* signifikanter Unterschied



Da für die Interaktionsformen signifikante Unterschiede hinsichtlich der Effizienz und der Zufriedenstellung nachgewiesen werden konnten, wurde die entsprechende Nullhypothese  $H_{10}$  verworfen und  $H_{11}$  angenommen. Die Interaktionsformen unterscheiden sich hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit: Tippen und Ziehen sind im Vergleich zur Geste effizienter und das Tippen führt gegenüber dem Ziehen und der Geste zu einer höheren Zufriedenstellung der Benutzer. Ein Einfluss der Körperhaltung war hingegen nicht nachweisbar. Aus diesem Grund konnte die Nullhypothese  $H_{20}$  nicht verworfen werden. Die Arbeitshypothese  $H_{21}$  wurde verworfen. Die Gebrauchstauglichkeit der Interaktionsformen war für beide untersuchten Körperhaltungen nicht signifikant unterschiedlich.

### 4.1.4 Diskussion

Bei der Untersuchung wurde ein kapazitiver Multitouchscreen (vgl. Abschnitt 3.2) und Microsoft Windows (vgl. Abschnitt 3.4) verwendet. Mit dieser Ausstattung war die Möglichkeit zur drucksensitiven Interaktion nicht gegeben. Die untersuchten Interaktionsformen konzentrierten sich daher auf primäre Eingaben mittels Tippen, Ziehen und Geste. Die in der Studie zu erledigenden Aufgaben, richteten sich nach der Möglichkeit, diese mit allen drei Interaktionsformen erledigen zu können. Jede Aufgabe wurde mit allen Interaktionsformen absolviert, wobei bei jeder einzelnen Aufgabenerledigung nur eine konkrete Interaktionsform zulässig war. Im realen Anwendungsfall werden Benutzer hingegen zwischen mehreren Interaktionsformen nach Bedarf wechseln, sofern diese von der Softwareanwendung angeboten werden.

Ein Einfluss der beiden untersuchten Körperhaltungen konnte nicht nachgewiesen werden. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen von Chourasia et al. (2013) und Schedlbauer et al. (2006), wobei je nach Nutzungskontext durchaus andere Körperhaltungen als die bisher Untersuchten auftreten können. In einer Studie hat Schedlbauer et al. (2006) gezeigt, dass die Bewegungsdauer und die Fehlerrate beim Antippen von Zielen auf einem Touchscreen unabhängig davon sind, ob der Benutzer steht oder sitzt. Chourasia et al. (2013) konnte für große Schaltflächen ( $\geq 20$  mm) keine Unterschiede in der Eingabeleistung zwischen stehenden und sitzenden Probanden feststellen. Die in der Studie genutzten interaktiven Elemente und Schaltflächen zählen nach Chourasia et al. (2013) zu den großen Schaltflächen. In realen Anwendungen können davon abweichende Schaltflächenabmessungen sowie störende Umwelteinflüsse vorkommen, z. B. Vibrationen.

### 4.1.5 Schlussfolgerung

Die Studie zur Touchscreeninteraktion mittels der Interaktionsformen Tippen, Ziehen und Geste ergab Unterschiede bei der Gebrauchstauglichkeit der einzelnen Interak-

tonsformen. So erfolgt die Bearbeitung der beiden untersuchten Aufgaben mittels Tippen und Ziehen effizienter als mit Gesten. Bei der Zufriedenstellung schnitt das Tippen besser ab als das Ziehen oder die Geste. Entsprechend der empirisch ermittelten Gebrauchstauglichkeit ergab sich für den untersuchten Nutzungskontext folgende Priorisierung der Interaktionsformen: Tippen (1), Ziehen (2), Geste (3). Ein Einfluss der Körperhaltung (sitzen oder stehen) konnte im durch das Studiendesign vorgegebenen Nutzungskontext nicht nachgewiesen werden. Die Studienergebnisse liefern somit eine Antwort auf die Forschungsfrage 2 zur Gebrauchstauglichkeit der grundlegenden touchscreenbasierten Interaktionsformen.

## 4.2 Dauer und Intensität der Touchscreeninteraktion im Arbeitsumfeld

Bereits frühzeitig konnte gezeigt werden, dass die Interaktion mit Touchscreens zu einer subjektiv empfundenen Ermüdung führt (vgl. Unterabschnitt 2.4.5). Ähnliche Beobachtungen wurden auch für die Interaktion mit klassischen Computersystemen gemacht, weshalb heute konkrete Empfehlungen zur ergonomischen Gestaltung klassischer Computerarbeitsplätze im beruflichen Umfeld existieren (vgl. Unterabschnitt 2.4.4). Während diese Empfehlungen sogar Arbeits- und Erholungsdauern beinhalten, werden die Besonderheiten der Touchscreeninteraktion bisher nicht berücksichtigt. Durch diese Besonderheiten stellt die ergonomische Gestaltung von Touchscreensystemen für die berufliche Nutzung eine besondere Herausforderung dar. Doch bisher sind wenig Erkenntnisse zur beruflichen Nutzung von Touchscreensystemen bekannt. Ziel dieser Studie war die empirische Erhebung der Interaktionsdauer mit bereits etablierten stationären Touchscreensystemen im Arbeitsumfeld. Konkret sollte ermittelt werden, wie sich die zur Erledigung der Arbeitsaufgabe benötigte Zeit auf die Interaktion mit dem Touchscreen und andere Tätigkeiten verteilt. Diese Aufteilung gibt Aufschluss über die Dauer der touchscreeninduzierten Beanspruchung des Hand-Arm-Systems und mögliche Erholungspausen.

### 4.2.1 Hintergrund

Aktuell bestehende Touchscreensysteme lassen sich zusätzlich zur verwendeten Technologie (vgl. Abschnitt 3.2) nach drei weiteren Kriterien einteilen: ihrer Art, dem Anwendungsort und dem Erfahrungsstand der Nutzergruppe. Bei der Art des Touchscreensystems kann aufgrund der Unterschiede zwischen mobilen und stationären Touchscreensystemen unterschieden werden (Yuan et al. 2005): Mobile Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass der Nutzer den Touchscreen variabel auf seine

Bedürfnisse ausrichten kann, ohne seine Körperhaltung oder seinen Standort zu wechseln. Stationäre Systeme sind hingegen fest in der physischen Umgebung des Nutzers integriert, so dass eine Anpassung der Körperhaltung und bzw. oder des Standorts des Nutzers notwendig ist, um die Ausrichtung des Touchscreens in Bezug auf den Nutzer zu verändern. Entsprechend dieser Einteilung lässt sich ein Smartphone als mobiles Touchscreensystem bezeichnen, solange es in der Hand gehalten wird. Ist das Smartphone hingegen mittels einer Halterung am Armaturenbrett eines Fahrzeugs befestigt, zählt es als stationäres System. Sogenannte Kiosk- und Point-of-Sale-Systeme (POS-Systeme) zählen hingegen zu den stationären Systemen. Bei der Einteilung nach Standort wird je nach Zugänglichkeit des Touchscreensystems zwischen privaten, öffentlichen und halböffentlichen Systemen unterschieden. Während ein privates Touchscreensystem nur von einem Nutzer oder einer stark begrenzten Nutzergruppe (z. B. Familie) genutzt wird, sind öffentliche Touchscreens für alle Nutzer frei zugänglich (Holfelder & Hehmann 1994). Die Nutzergruppe ist dadurch nicht begrenzt. Touchscreensysteme im halböffentlichen Bereich lassen sich durch eine abgrenzbare Nutzergruppe charakterisieren, wobei die Zusammensetzung der Nutzergruppe einer Fluktuation unterliegen kann. Beispiele für halböffentliche Touchscreensysteme sind die oben genannten Kassensysteme oder Steuerungen von Industrieanlagen, bei denen der jeweilige Arbeitgeber die Zusammensetzung der Nutzergruppe beeinflusst. Im öffentlichen Bereich finden sich viele Touchscreensysteme in Form von Fahrkarten- und Ticketautomaten. Beim Erfahrungsstand der Nutzergruppe bezüglich Touchscreens kann man zwischen Experten und Laien unterscheiden (Fisher 1991): Während Experten bereits Erfahrung mit dem System gesammelt haben oder sogar im Umgang damit geschult wurden, kann man Nutzer ohne Erfahrung mit einem konkreten System als Laie bezeichnen. Da es auch Nutzer mit einem mittleren Erfahrungsstand gibt (Santhanam & Wiedenbeck 1993), stellen die beiden Ausprägungen Experte und Laie zwei gegensätzliche Extremwerte dar.

Vergleicht man Touchscreensysteme mit klassischen Computerarbeitsplätzen, ist bei stationären Systemen im Arbeitsumfeld (halböffentlicher Bereich) durch unnatürliche Körperhaltungen bei der Interaktion eine ähnliche Entwicklung von körperlichen Beschwerden oder Erkrankungen des Bewegungsapparates des oberen Rückens und der oberen Extremitäten zu erwarten (Shin & Zhu 2011). Allerdings blieb bisher an Computerarbeitsplätzen eine Ablösung von Tastatur und Maus durch Touchscreens aus. Doch im Gegensatz zu diesen beiden klassischen Eingabegeräten finden sich Touchscreens abseits der Computerarbeitsplätze in Industrie und Handel. So profitieren z. B. insbesondere Kassensysteme von den Interaktionsmöglichkeiten eines Touchscreens. Aber gerade an Kassen ist die Interaktionsdauer häufig nur durch die Dauer der Arbeitsschicht und die zu erledigenden Nebentätigkeiten begrenzt. Oft kommt erschwerend das Fehlen einer Armauflage hinzu, so dass die Belastung des Hand-Arm-Systems durch die Touchscreeninteraktion nochmals stärker ist. Daher bot

sich die empirische Untersuchung der Nutzung touchscreenbasierter Kassensysteme als Untersuchungsgegenstand an.

### 4.2.2 Vorgehen

Die Studie zur Nutzung von stationären Touchscreensystemen im Arbeitsumfeld wurde als Feldstudie konzipiert. Dadurch konnten reale Nutzer bei der Interaktion mit stationären Touchscreensystemen beobachtet werden. Die Touchscreensysteme wurden so gewählt, dass sie der Erfüllung von Arbeitsaufgaben im Rahmen der beruflichen Beschäftigung dienten. Die Nutzung des jeweiligen Touchscreensystems erfolgte damit nicht aufgrund der Versuchsteilnahme.

Um ein Verhältnis zwischen der Dauer der Touchscreeninteraktion und der Dauer für andere Aufgaben ermitteln zu können, wurde die Zeit zur Erledigung der Arbeitsaufgabe (Touchscreeninteraktion inkl. Nebenaufgaben) sowie der Touchscreeninteraktion separat gemessen. Als Messmittel wurden zwei Stoppuhren eingesetzt. Nach dem Abschluss einer Aufgabe wurden die drei Werte in einem Beobachtungsprotokoll notiert. Die Studie umfasste das Beobachten und Protokollieren von mindestens 30 Wiederholungen der Arbeitsaufgabe an zwei verschiedenen Studienstandorten. Als Arbeitsaufgabe wurde ein vollständiger Verkaufsvorgang an einer touchscreenbasierten Kasse gewählt.

Aus der Dauer der Touchscreeninteraktion und der Anzahl der Tippeingaben auf dem Touchscreen wurde die mittlere Dauer einer einzelnen Touchscreeneingabe berechnet. Zusätzlich wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Dauer der Touchscreeninteraktion und die Dauer der Nebenaufgaben berechnet. Ebenso wurde der relative Anteil dieser Werte an der Gesamtdauer der Arbeitsaufgabe ermittelt. Anschließend wurde der maximale relative Anteil der Touchscreeninteraktion aus den Daten herausgefiltert. Für die statistische Auswertung wurde die Software RStudio Desktop in der Version 0.99.485 verwendet. (RStudio 2015).

Der Auswahl des Studienortes erfolgte in zwei Stufen. Zuerst wurde die Art der Kassensysteme an potenziellen Studienorten erfasst. War ein touchscreenbasiertes Kassensystem vorhanden, wurde anschließend der jeweils zuständigen Person das Studienvorhaben erläutert und um die Erlaubnis zur Beobachtung gebeten. Mit diesem Vorgehen konnte an zwei Studienorten eine entsprechende Erlaubnis eingeholt werden. Da die Stoppuhren und Aufzeichnungsprotokolle mitgeführt wurden, wurde in beiden Fällen sofort mit der Beobachtung begonnen.

Die Bearbeitung einer Aufgabe und somit auch die Stoppuhr für die Aufgabendauer starteten mit der Begrüßung des Kunden durch das Kassenpersonal. Die Stoppuhr für die Dauer der Touchscreeninteraktion wurde beim ersten Tipp auf den

Touchscreen gestartet und entsprechend unterbrochen, wenn sich das Kassenspersonal anderen Aufgaben (z. B. Geld zählen) widmete. Die Aufgabe war beendet, wenn der Bezahlvorgang abgeschlossen war. Die Stoppuhr für die Dauer einer Aufgabe wurde gestoppt und die Werte in das Beobachtungsprotokoll übertragen. Dieser Vorgang wurde an jedem Studienort 30 Mal wiederholt. Für die Studienorten wurde protokolliert, ob eine Armauflage für die Touchscreeninteraktion vorhanden war.

### 4.2.3 Ergebnisse

Als Studienorte konnte eine Kantine und eine Tankstelle gewonnen werden. An beiden Studienorten war eine Kasse vorhanden, die lediglich über einen Touchscreen als Ein- und Ausgabemittel verfügte. Die beiden Kassensysteme sind in Abbildung 4.8 dargestellt. Eine Armauflage war in beiden Fällen nicht vorhanden. Das Kassenspersonal arbeitete bereits über ein Jahr mit dem jeweiligen Kassensystem des Studienortes. Man kann das Kassenspersonal aufgrund des Erfahrungsstandes daher als Experten einstufen. An beiden Studienorten konnten jeweils 30 Aufgaben beobachtet und protokolliert werden.



(a) Kantine



(b) Tankstelle

Abbildung 4.8: Kassensysteme an den beiden Studienorten

Obwohl sich die Kassensysteme äußerlich stark ähnelten, waren beide Systeme von unterschiedlichen Herstellern. Zudem ist es bei touchscreenbasierten POS-Systemen üblich, die grafische Benutzungsschnittstelle an den jeweiligen Einsatzzweck anzupassen. Beim Umfang der Aufgabe gab es ebenfalls Unterschiede. Während das Kassenspersonal der Kantine lediglich das Essen der Gäste eintippen und den Betrag kassieren musste, war das Kassenspersonal der Tankstelle neben dem Abrechnen

der Zapfsäulen auch für die Zubereitung von Speisen und Getränken sowie die Herausgabe von Tabakprodukten zuständig. Durch die Unterschiede bei der grafischen Benutzungsschnittstelle und dem Umfang der Arbeitsaufgabe sind die Daten der beiden Studienorte nicht vergleichbar. Für das Erreichen des Studienziels war ein solcher Vergleich nicht nötig; dazu war es ausreichend, den maximalen relativen Anteil der Touchscreeninteraktion an der Dauer der Arbeitsaufgabe zu ermitteln.

Die gemessenen Zeiten für die an beiden Standorten beobachteten Kassierervorgänge sind in Abbildung 4.9 dargestellt. In der Kantine wurden Kassierervorgänge mit einer mittleren Dauer von  $t_{K-Aufgabe} = 11,7 \pm 5,9$  s (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung) beobachtet. Der Anteil der Touchinteraktion umfasste im Mittel  $t_{K-Touch} = 4,8 \pm 1,7$  s der Aufgabendauer. Daraus ergibt sich für die Beobachtungen in der Kantine ein mittlerer relativer Anteil der Touchinteraktion von  $r_{K-Touch} = 41,0\%$  der Aufgabendauer. Die Kassierervorgänge in der Tankstelle dauerten im Mittel  $t_{T-Aufgabe} = 20,2 \pm 16,1$  s. Von dieser Aufgabendauer entfielen  $t_{T-Touch} = 5,9 \pm 4,1$  s auf die Interaktion mit dem Touchscreen. Der relative Anteil der Touchinteraktion an der Aufgabendauer beträgt damit für die Beobachtungen an der Tankstelle  $r_{T-Touch} = 29,2\%$ .

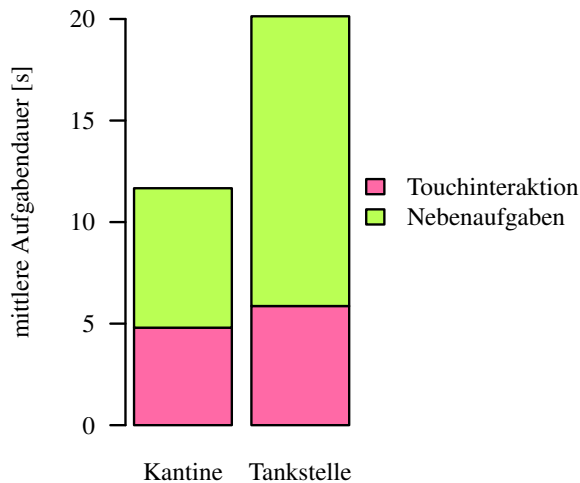


Abbildung 4.9: Aufteilung der Aufgabendauer auf die Touchscreeninteraktion und Nebenaufgaben ( $n = 2$ ;  $N = 30$ )

#### 4.2.4 Diskussion

Die Untersuchung der Intensität der Touchscreeninteraktion im Arbeitsumfeld basiert auf dem Anwendungsfall touchscreenbasierter Kassensysteme. Die Recherche nach geeigneten Studienorten gestaltete sich überaus schwierig, denn die meisten

Supermärkte und Tankstellen werden von einer Konzernzentrale fremdgeführt, so dass vor Ort kein Entscheidungsträger anzutreffen ist, der einer Beobachtung des Personals für Studienzwecke zustimmen könnte. Auch eine offizielle Anfrage an die jeweilige Firmenzentrale erwies sich als nicht zielführend, da eine solche Beobachtung üblicherweise der Zustimmung des Betriebsrates bedarf. Als Ergebnis dieser Umstände konnten lediglich Studienorte für die Beobachtung gewonnen werden, die von der Organisationsstruktur so kompakt waren, dass neben der Zustimmung der Geschäftsführung und der betroffenen Angestellten keine weiteren bürokratischen Hürden zu überwinden waren. Die Interaktion mit diesen Systemen wurde im Rahmen des normalen Arbeitsalltags an zwei Studienorten erhoben. Sowohl die leicht unterschiedlichen Studienorte als auch die hohe Variabilität des Arbeitsalltags stellten eine Herausforderung bei der Datenerhebung und anschließenden Auswertung dar. So musste die Beobachtung am Studienort Tankstelle vereinzelt unterbrochen werden, da das Kassenpersonal mehrfach nach draußen musste, um z. B. einem Kunden an seinem Fahrzeug Hilfestellung zu leisten oder die Ausstattung der Tankstelle in Ordnung zu halten. Auch an der Kasse wiesen die Studienorte Unterschiede bei der Abfertigung von Kunden auf. Während das Kassenpersonal der Kantine lediglich kassierte, musste das Personal der Tankstelle zudem Getränke und Mahlzeiten zubereiten. Die daraus resultierende Variabilität des Arbeitsalltags ist aus ergonomischer Sicht positiv zu beurteilen und verbessert die Belastungssituation, da ansonsten bei einer anhaltenden Interaktion in unnatürlichen Körperhaltungen die Entwicklung von körperlichen Beschwerden oder Erkrankungen des Bewegungsapparates des oberen Rückens und der oberen Extremitäten zu erwarten wäre (vgl. Unterabschnitt 2.4.4). Das Kassenpersonal der Kantine dürfte durch den dort beobachteten monotonen Arbeitsablauf eine höhere Gefährdung für solche körperlichen Beschwerden oder Erkrankungen aufweisen.

#### 4.2.5 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der explorativen Studie zur Intensität und Dauer der Touchscreen-nutzung im Arbeitsumfeld zeigten für den Anwendungsfall Kassensystem, sich die Aufgabendauer zum Kassieren eines Kunden zwischen der Tankstelle und der Kantine durch den unterschiedlichen Aufgabenumfang unterscheidet (Kantine:  $11,7 \pm 5,9$  s; Tankstelle:  $20,2 \pm 16,1$  s). Dennoch liegen die Werte für die mittlere Dauer der Touchscreeninteraktion eng beieinander (Kantine:  $4,8 \pm 1,7$  s; Tankstelle:  $5,9 \pm 4,1$  s). Auf die Touchscreeninteraktion entfallen also im Fall der Kantine im Mittel 41,0 % der Aufgabendauer (Tankstelle: 29,2 %). Die Zeitintensität der Nutzung von Touchscreensystemen betrug also für die beiden beobachteten Anwendungsfälle im Mittel zwischen 29 und 41 Prozent der Aufgabendauer (vgl. Forschungsfrage 3).

## 4.3 Vorstudie Biomechanik

Die Vorstudie wurde durchgeführt, um die Grundlagen für den wissenschaftlichen Nachweis der physischen Ermüdung durch die Interaktion mit stationären Touchscreens zu erarbeiten (vgl. Unterabschnitt 2.4.5). Ziel war die Identifikation von durch die Touchscreeninteraktion beanspruchter Muskeln, um diese in einer anschließenden Studie gezielt auf Ermüdungserscheinungen untersuchen zu können.

### 4.3.1 Hintergrund

Der theoretische Hintergrund der Studie umfasst die physische Ermüdung bei der Interaktion mit stationären Touchscreens. Umgangssprachlich ist der Effekt als „Gorillaarm“ bekannt (Carmody 2010, Pogue 2013) und auch wissenschaftlich konnte eine subjektiv empfundene Ermüdung bereits in Studien von Borg (1982), Sears (1991), Ahlström et al. (1992) und Plaisant & Sears (1992) nachgewiesen werden. Details zu den Studien sind in Abschnitt 2.4 zu finden.

### 4.3.2 Vorgehen

Um die Umgebungsbedingungen möglichst gut kontrollieren zu können, wurde die Studie als Laborversuch konzipiert. Die Platzierung der Mess- und Aufzeichnungstechnik war dadurch problemlos möglich. Um die individuelle Ermüdung über die Versuchsdauer erfassen zu können, wurden Messwiederholungen mit abhängiger Stichprobe (Within-Subjects Design, vgl. Keren 1993) vorgesehen.

Die demografischen Daten zur Beschreibung der Stichprobe beinhalten Angaben zu Alter, Geschlecht und Händigkeit sowie die Auflistung ggf. ausgeübter Sportarten mit starker Beanspruchung des Hand-Arm-Systems (z. B. Tennis). Die Datenaufzeichnung umfasste die Beschleunigung des Handgelenks der Hand, mit der die Interaktionsaufgabe ausgeführt wurde. Zudem wurden sowohl die Bewegungsdauer als auch Fehler und Schwierigkeitsindex nach MacKenzie & Buxton (1992) erfasst. Die Probanden wurden zum Lauten Denken nach Lewis (1982) ermuntert, um subjektive qualitative Aussagen zur Touchscreeninteraktion zu erhalten.

Der Versuchsaufbau (Abbildung 4.10) enthielt einen stationären Touchscreen vom Typ Faytech 1210 BL (Faytech 2009). Dieser Touchscreen verfügt über eine resistive Berührungserfassung (vgl. Abschnitt 3.2), so dass bei einer Berührung ein gewisser Druck notwendig ist, um eine erfolgreiche Eingabe auszuführen. Da auf eine Armauflage bewusst verzichtet werden sollte, wurde ein Touchscreen auf einem



höhenverstellbaren Tisch so befestigt, dass die Probanden den Versuch im Stehen absolvieren konnten.

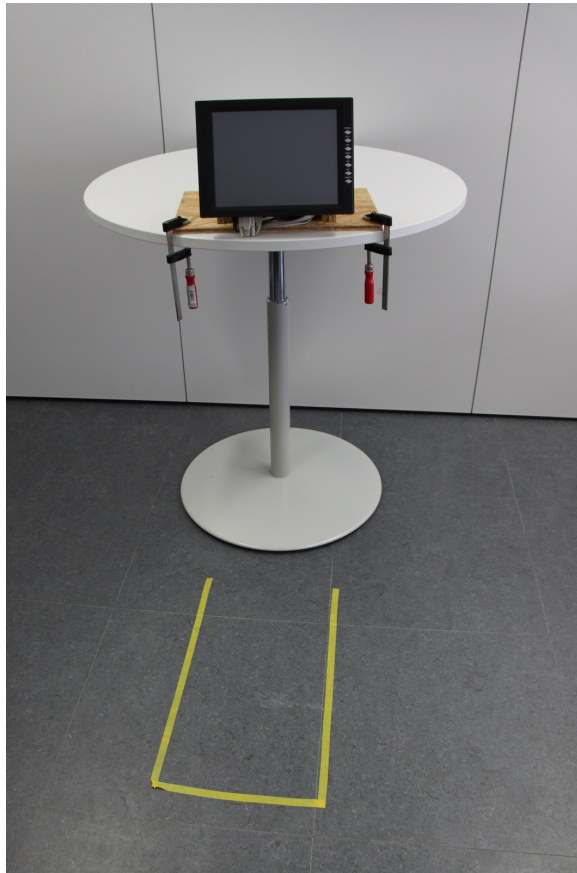
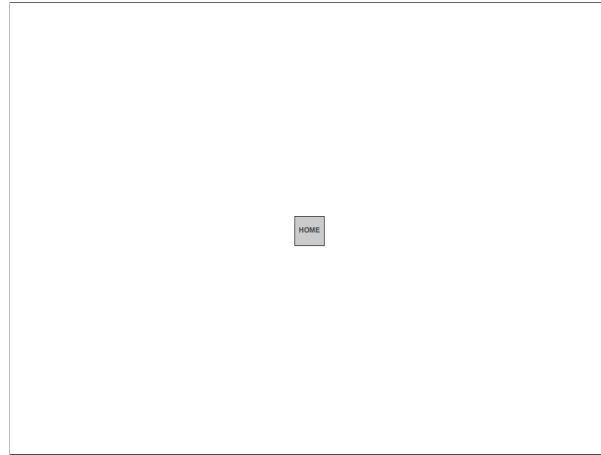


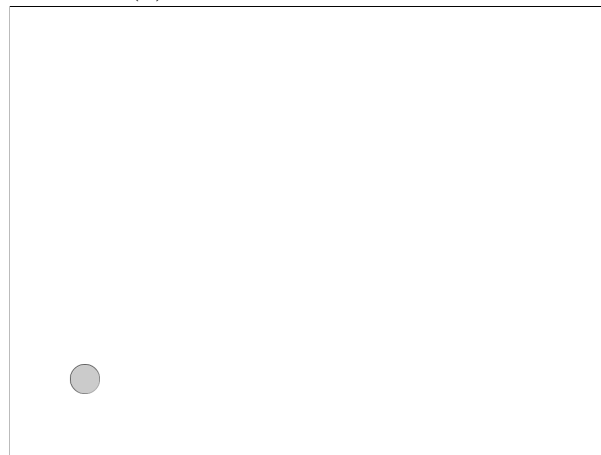
Abbildung 4.10: Versuchsaufbau zur Vorstudie der Biomechanik bei der Touchscreeninteraktion

Der Neigungswinkel des Touchscreens orientierte sich mit  $\alpha = 15^\circ$  an bereits vorhandenen Systemen, die eine Interaktion in stehender Körperhaltung mit stationären Touchscreens erfordern – konkret an den Fahrkartenautomaten der Deutschen Bahn AG. Der Winkel zwischen Fixierlinie und der Horizontalen lag damit zwischen den in Abschnitt 2.4 beschriebenen Grenzen von  $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ , wobei die Fixierlinie nicht im rechten Winkel auf dem Touchscreen stand. Die Höhe des Tisches wurde für jeden Probanden individuell so eingestellt, dass sich die Unterkante des Touchscreens auf Höhe des Ellenbogens befand. Bei der auszuführenden Aufgabe handelte es sich um eine Tippaufgabe nach dem Gesetz von Fitts (Fitts 1954) in der zweidimensionalen Variante entsprechend MacKenzie & Buxton (1992). Für die Tippaufgabe wurde die Software Movement Time Evaluator (MTE) in der Version 2.2.4 eingesetzt (Schedlbauer 2011). Der mittels dieser Software konfigurierte Versuch sah das abwechselnde Antippen einer zentral angeordneten Schaltfläche (Abbildung 4.11a) und eines dar-

aufhin an einer zufälligen Position erscheinenden Ziels (Abbildung 4.11b) vor. Beim Antippen des Ziels verschwand dieses und die zentrale Schaltfläche erschien erneut. Im Versuch musste jeder Proband bis zu 15 Mal hintereinander je 100 Ziele und daher auch zusätzlich 100 Mal die zentrale Schaltfläche antippen, so dass jeder Proband im Versuchsverlauf maximal 3000 gültige Touchscreeneingaben erreichen konnte. Die Zahl der tatsächlichen Touchscreenberührungen konnte durch Fehleingaben (daneben getippt) höher ausfallen. Bei einem vorzeitigen Versuchsabbruch wurden die maximal möglichen Touchscreeneingaben entsprechend nicht erreicht.



(a) Schaltfläche im Zentrum



(b) Zufällig erscheinendes Ziel

Abbildung 4.11: Im Movement Time Evaluator anzutippende Ziele der Vorstudie zur Biomechanik

Die anzutippenden Ziele waren kreisrund und hatten einen Durchmesser von  $W = 50$  px. Die reale Höhe des Ziels auf der Anzeige lässt sich über die anzeigenspezifische Pixeldichte  $\rho_A$  nach Gleichung 4.1 ermitteln. In der Gleichung stellt  $n_{Av}$  die

Pixelanzahl der Anzeige in vertikaler und  $n_{Ah}$  in horizontaler Richtung dar. Die Höhe und Breite der Anzeige sind in den Variablen  $h_A$  und  $b_A$  zu finden. Diese zur Berechnung benötigten Werte wurden dem Datenblatt (Faytech 2009) entnommen. Ein kreisrundes Ziel mit einem Durchmesser von  $W = 50$  px ergibt auf der gewählten Anzeige einen Kreis mit einem Durchmesser von  $d = 12,2$  mm.

$$\begin{aligned}\rho_A &= \frac{n_{Av}}{h_A} = \frac{n_{Ah}}{b_A} \\ &= \frac{768 \text{ px}}{186 \text{ mm}} = \frac{1024 \text{ px}}{247 \text{ mm}} \\ &= 4,1 \frac{\text{px}}{\text{mm}}\end{aligned}\tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}d &= \frac{W}{\rho_A} \\ &= \frac{50 \text{ px}}{4,1 \frac{\text{px}}{\text{mm}}} \\ &= 12,2 \text{ mm}\end{aligned}$$

Die Beschleunigung des Handgelenks wurde mit einem Affectiva Q-Sensor in der Version 2.0 (Affectiva 2012) in allen drei Raumachsen mit der technisch maximal möglichen Frequenz von  $f = 32$  Hz aufgezeichnet (Abbildung 4.12). Der gesamte Versuch wurde auf Video samt Tonspur aufgezeichnet. Die Versuchsanleitung enthielt neben Fragen zu den demografischen Daten eine deutsche Version des Standardfragebogens zur Händigkeit nach Oldfield (1971). Die Versuchsanleitung ist in Anhang A enthalten. Zum Abschluss des Versuchs wurde der Proband nach der subjektiven physischen Belastung des Hand-Arm-Systems befragt.



Abbildung 4.12: Beschleunigungssensor vom Typ Affectiva Q-Sensor 2.0 mit Markierungen für die Orientierung der drei Raumachsen

Die Datenanalyse umfasste in einem ersten Schritt die explorative Untersuchung der Auswirkungen der Versuchsdauer die Beschleunigung des dominanten Handgelenks bei der Tippaufgabe. Dazu wurde eine eigene Software programmiert um die Logfiles des MTE einzulesen und daraus die Zeitpunkte jedes fehlerfreien Antippens der zentralen Schaltfläche zu ermitteln. Mit dem eingelesenen Logfile des Beschleunigungssensors wurde anschließend für jeden der vorher ermittelten Zeitpunkte der Betrag der Aufprallbeschleunigung ermittelt. Hierfür wurde im Zeitfenster von  $\Delta t = \pm 64 \text{ ms}$  um den Zeitpunkt der Berührung der größte Vektorbetrag der dreidimensionalen Beschleunigung herausgefiltert. Das Datenbankmodell der erstellten Software ist in Anhang B enthalten; der Quellcode befindet sich in Anhang C.

Zur statistischen Auswertung wurde die Software RStudio Desktop in der Version 0.99.485 verwendet (RStudio 2015). Für die Analyse zeitabhängiger Veränderungen in Daten aus mehreren Messzeitpunkten eignet sich die Berechnung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson (Freivalds 2011). Die aufgezeichneten Video- und Audiodaten wurden nach Mayring (2010) qualitativ ausgewertet, um die subjektive physische Beanspruchung des Hand-Arm-Systems zu analysieren.

An dem konzipierten Versuch durften alle potenziellen und tatsächlichen Benutzer herkömmlicher Touchscreens teilnehmen. Die Grundgesamtheit umfasste damit alle Menschen mit normaler oder korrigierter Sehfähigkeit sowie einem unbeeinträchtigten Hand-Arm-System für die Touchscreeneingabe. Das Anwerben von freiwilligen Probanden fand im persönlichen und erweiterten Umfeld des Fachgebiets Mensch-Maschine-Systemtechnik der Universität Kassel statt. Eine Verzerrung der Ergebnisse durch diese Form der Probandenrekrutierung war beim konzipierten Versuch nicht zu erwarten, da sich evtl. vorhandene Unterschiede bei der individuellen Leistungsfähigkeit durch die Messwiederholungen aufheben. Aus den interessierten Personen wurden die Probanden so ausgewählt, dass innerhalb der Stichprobe sowohl das Geschlecht als auch die Händigkeit ausgeglichen war.

Der Versuchsablauf umfasste eine Begrüßung des jeweiligen Probanden sowie eine kurze Erläuterung des Versuchs. Anschließend wurde ein Beschleunigungssensor am Handgelenk der dominanten Hand des Probanden befestigt und der Touchscreen mit Hilfe der Software des Touchscreenherstellers für den Probanden individuell kalibriert. Nach einer kurzen Eingewöhnung in die Interaktionsaufgabe wurde die Datenaufzeichnung durch die Versuchsleitung gestartet.

### 4.3.3 Ergebnisse

Die Stichprobe bestand aus neun Probanden, von denen acht den Versuch bis zum Ende absolvierten. Von diesen acht Probanden waren 4 Probanden weiblich und vier

männlich. Das mittlere Alter und die Standardabweichung betrug bei der Stichprobe  $22,4 \pm 3,7$  Jahre (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung). Die Ergebnisse der Befragung zur Händigkeit nach Oldfield (1971) decken sich mit der beobachteten Händigkeit der Probanden bei der Versuchsdurchführung. Die Händigkeit der Stichprobe war ausgeglichen.

Während des Versuchs traten unerwartete Ereignisse auf. So brach ein Proband bereits nach dem ersten Durchgang der Tippaufgabe den Versuch ab. Da dies zu Beginn der Studie passierte, wurde ein zusätzlicher Proband akquiriert, um eine ausgeglichene Stichprobe sicherzustellen. Die Daten des abgebrochenen Versuchs wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Die Darstellung des zeitlichen Verlauf der Beschleunigung über die gesamte Versuchsdauer weist zahlreiche Ausreißer auf (Abbildung 4.13). Da das Filtern der Daten nicht zu rechtfertigen ist, konnte die Korrelation nicht nach Pearson berechnet werden. Auch eine Berechnung nach Spearman scheiterte, da die Daten einige Bindungen aufwiesen. Es wurde daher die Korrelation nach Kendall berechnet. Die Korrelation zwischen der Versuchsdauer und der maximalen Aufprallbeschleunigung ergab keinen Zusammenhang ( $\tau = 0,062$ ;  $p = 2,2 \cdot 10^{-16}$ ). Die maximale Aufprallbeschleunigung ändert sich also bis zum Ende der Versuchsdauer nicht.

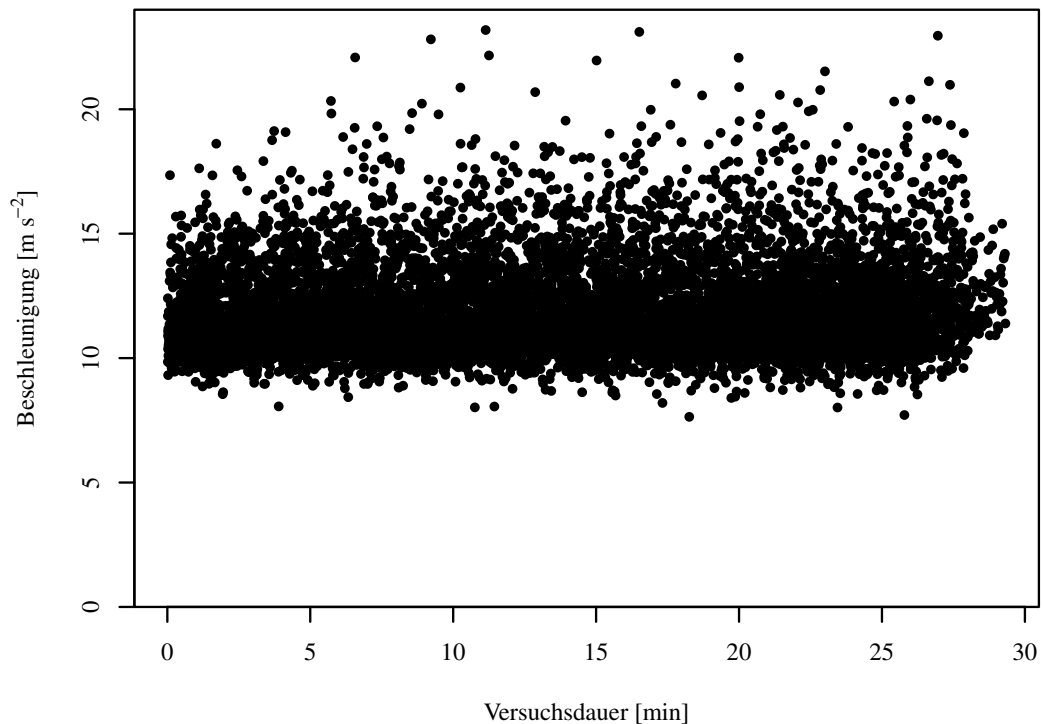


Abbildung 4.13: Zeitverlauf des Betrags des Beschleunigungsvektors der Vorstudie ( $n = 8$ ,  $N = 9891$ )

Die qualitative Inhaltsanalyse ergab Hinweise auf eine für eine statische und stehende Körperhaltung zu lange Versuchsdauer, die Eintönigkeit der gewählten Tippaufgabe sowie die zu niedrige Positionierung des Touchscreens. Die gewählte Anordnung des Touchscreens verursachte eine starke Vorwärtsneigung des Kopfes, woraus eine Belastung der Nackenmuskulatur resultierte. Einzelne Probanden konnten eine Beanspruchung der Muskulatur im Schulterbereich feststellen. Nach dem Ende der Tippaufgabe wurden von den betroffenen Probanden zwei Stellen im Schulterbereich angezeigt, die der Lage von Trapez- und Deltamuskel entsprechen. Zudem konnten verschiedene Entlastungsbewegungen beobachtet werden: Lageänderung des Hand-Arm-Systems mit oder ohne Änderung der Körperhaltung, Ausschütteln der interagierenden Hand bzw. des gesamten Arms, Verlagerung des Körperschwerpunktes mit oder ohne Änderung der Fußstellung. Mit Ausnahme des unerwarteten Versuchsabbruchs eines Probanden gab es keine weiteren unerwarteten Beobachtungen.

### 4.3.4 Diskussion

Die Stichprobe der Vorstudie zur Biomechanik bei der Touchscreeninteraktion war mit acht Teilnehmern stark begrenzt, aber sowohl von der Geschlechter- als auch der Händigkeitverteilung ausgeglichen. Angelegt als explorative Vorstudie waren durch die kleine Stichprobe keine statistisch belastbaren Ergebnisse zu erwarten. Dennoch lieferten die Ergebnisse erste wichtige Erkenntnisse für den weiteren Weg zu Beantwortung der Forschungsfragen 4 und 5 (vgl. Abschnitt 2.7). Die erreichte Versuchsdauer konnte als Untergrenze für zukünftige Studien angesetzt werden. Um damit die bereits bemängelte Monotonie der Tippaufgabe nicht weiter zu steigern, waren weitere Studien nur mit verändertem Aufgabenablauf denkbar. Ebenso war die Aufstellung des Touchscreens zu überdenken.

### 4.3.5 Schlussfolgerung

Im Rahmen der explorativen Vorstudie zur Biomechanik bei der Touchscreeninteraktion konnten erste Erfahrungen und Erkenntnisse zur Beantwortung der Forschungsfragen 4 (Verändert sich die Interaktion durch die touchscreeninduzierte Ermüdung des Hand-Arm-Systems?) und 5 (Können aus der touchscreeninduzierten Ermüdung des Hand-Arm-Systems Empfehlungen für die Dauer der Touchscreeninteraktion und der notwendigen Erholungspausen abgeleitet werden?) gesammelt werden. So konnten die theoretischen Grundlagen zur Aufprallbeschleunigung in Erfahrung gebracht und bereits im Versuch getestet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse umfassten hauptsächlich die Konkretisierung des Versuchsaufbaus in Bezug auf Platzierung

des Touchscreens, Körperhaltung sowie Aufgabenablauf und -dauer. Darüber hinaus lieferte der Versuch einen ersten Hinweis auf die durch die Touchscreeninteraktion beanspruchte Muskulatur. Die Identifikation der konkreten Muskeln (Delta- und Trapezmuskel) legte den Grundstein für eine elektromyografische Untersuchung der Muskelaktivität bei der Touchscreeninteraktion.

## 4.4 Computergestützte Analyse der Biomechanik

Das Ziel der computergestützten Analyse war die Überprüfung der Beobachtungen aus der Vorstudie. Konkret sollten die Erkenntnisse zur beanspruchten Muskulatur geprüft und eine quantitative Aussage zum Ausmaß der Beanspruchung erarbeitet werden. Teile dieser Untersuchung wurden bereits in Domhardt & Schmidt (2013b) veröffentlicht.

### 4.4.1 Hintergrund

Ein erster Versuch zur Ermittlung und Analyse der tatsächlich auftretenden Muskelkräfte bei der Touchscreeninteraktion umfasste die Erstellung eines einfachen biomechanischen Modells. Die Grundlagen für das biomechanische Modell lieferte die Arbeit von Kellerer (2010), der ein statisches biomechanisches Modell (Abbildung 4.14) zur Bestimmung des „Antwortverhalten des Hand-Arm-Systems auf mechanische Schwingungen“ heranzog.

Kellerer (2010) berechnet über die Masse  $m$  der einzelnen Segmente (Oberarm, Unterarm, Hand) die jeweilige Gewichtskraft und multipliziert diese mit dem jeweiligen Abstand  $x$  des Segments vom Schultergelenk, um für jedes Segment ein Drehmoment um das Schultergelenk zu erhalten. Die Summe dieser Drehmomente  $M_y$  wird abschließend um den resultierenden Gesamtarmabstand zwischen Schultergelenk und Hand  $x_{\text{res}}$  geteilt, um die Kraft  $F_{\text{Gres}}$  zu erhalten Gleichung 4.2.

$$\begin{aligned} M_y &= (m_{\text{Oberarm}} \cdot x_{\text{Oberarm}} + m_{\text{Unterarm}} \cdot x_{\text{Unterarm}} + m_{\text{Hand}} \cdot x_{\text{Hand}}) \cdot g \\ F_{\text{Gres}} &= \frac{M_y}{x_{\text{res}}} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Abweichend vom Modell von Kellerer (2010) ergab sich anhand des realen Anwendungsfalles eines touchscreenbasierten Kassensystems (vgl. Abschnitt 4.2) eine andere Körperhaltung (Abbildung 4.15). Diese Körperhaltung wurde bei der Erstellung eines eigenen biomechanischen Modells (Abbildung 4.16 auf S. 148) berücksichtigt.

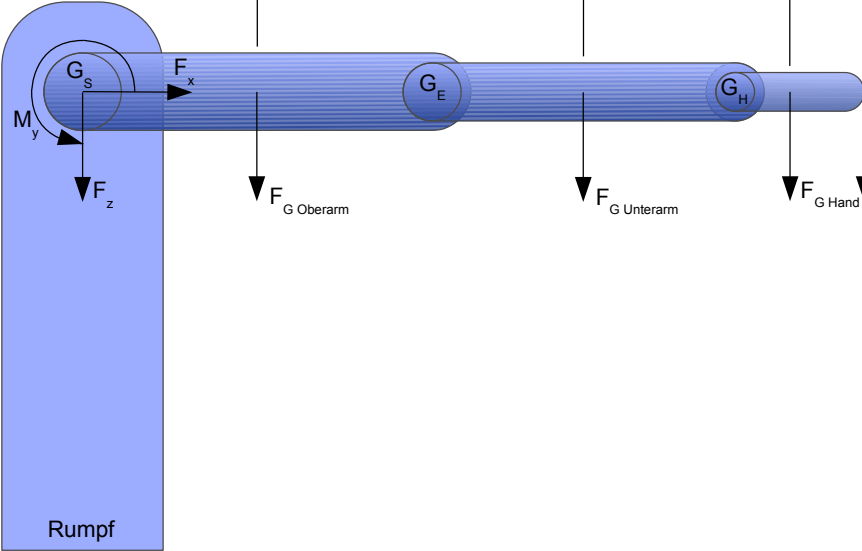


Abbildung 4.14: Statisches biomechanisches Modell nach Kellerer (2010, S. 53);  $G_S$  – Schultergelenk,  $G_E$  – Ellbogengelenk,  $G_H$  – Handgelenk



Abbildung 4.15: Touchscreen-Interaktion an einem Kassensystem



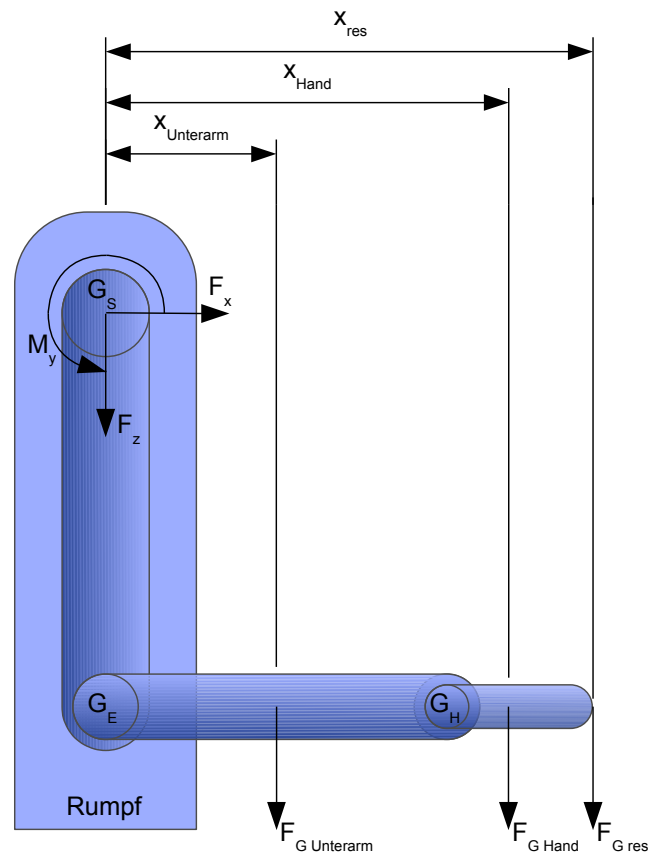


Abbildung 4.16: Statisches biomechanisches Modell zur Berechnung der Haltungsarbeit;  $G_S$  – Schultergelenk,  $G_E$  – Ellbogengelenk,  $G_H$  – Handgelenk

Durch den am Rumpf anliegenden Oberarm trägt die Masse des Oberarms nichts zum Drehmomente um die y-Achse bei. Die beobachtete Körperhaltung bei der Benutzung eines touchscreenbasierten Kassensystems stellt einen besonderen Fall dar, weshalb der Term zur Berechnung des Oberarmdrehmomentes in der Gleichung erhalten bleiben sollte. Die Berechnung der statischen Haltungsarbeit erfolgte gemäß Gleichung 4.2 mit Hilfe recherchierter Tabellenwerte aus DIN EN ISO 7250-1 und DOD-HDBK-743A. Die benötigten Tabellenwerte waren jedoch nur für das 50. Perzentil männlich in notwendigem Umfang verfügbar.

Die Berechnung ergab für die statische Haltungsarbeit eine notwendige Kraft um die y-Achse von 9,75 N (vgl. Abbildung 4.16). Diese Kraft ist hauptsächlich vom Deltamuskel zu erbringen und entspricht beim 50. Perzentil männlich 4,5 % der Maximalkraft. Der ermittelte Wert liegt damit unter dem von Rohmert (1960) und Schmidtke (1989) vorgeschlagenen Grenzwert der statischen Dauerleistungsgrenze von 15 %.

Um eine biomechanische Analyse des Hand-Arm-Systems abseits des 50. Perzentils männlich zu ermöglichen, wurde ein rechnergestützter Ansatz gewählt. Auf diese Weise konnten die benötigten Daten auch für andere Körper ermittelt werden.

### 4.4.2 Vorgehen

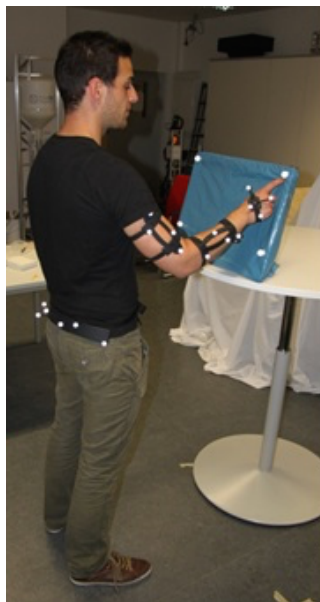
Die Studie wurde als Laborversuch konzipiert, da auf das kamerabasierte System zur Bewegungserfassung zurückgegriffen werden sollte. Mit Hilfe des Systems sollte die natürliche Bewegung der Probanden bei der Touchscreeninteraktion aufgezeichnet und anschließend computergestützt ausgewertet werden. Die Probanden wurden unter den am Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik der Universität Kassel beschäftigten Studierenden rekrutiert. Für den Versuch wurden zuerst sämtliche Körpersegmente des Probanden mit Targets für die Bewegungserfassung markiert. Nach dem Einstellen der Tischhöhe und dem Starten der Datenaufzeichnung wurde der Proband angewiesen, nacheinander die vier Ecken des Touchscreens anzutippen. Die von den Probanden auszuführende Bewegung entsprach einer simulierten 4-Punkt-Kalibrierung, bei der die Probanden mit dem Finger jede Ecke des Touchscreens berührten. Von dieser Bewegung wurden jeweils drei Durchgänge aufgezeichnet.

Als Ergebnis der Studie sollten die durch die Touchscreeninteraktion beanspruchten Muskeln eindeutig benannt werden können. Zudem war das Ausmaß der physischen Beanspruchung dieser Muskeln zu quantifizieren.

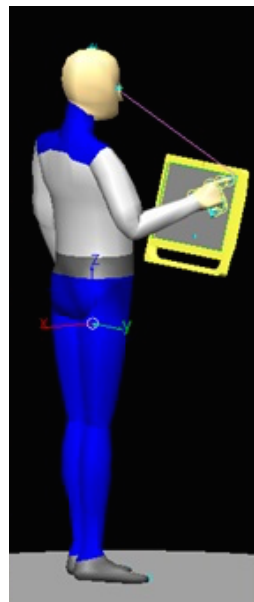
Die Touchscreeninteraktion der Versuchsperson wurde mit Hilfe einer videobasierten Bewegungserfassung auf Infrarotbasis aufgezeichnet (Advanced Realtime Tracking 2013). Der Aufbau mit Touchscreen und höhenverstellbarem Tisch ist in Abbildung 4.17a auf S. 150 zu sehen. Der Touchscreen war Bestandteil eines Komplet-PCs der Firma Asus mit der Typbezeichnung ET2011EGT (Asus 2015). Da die Oberfläche des verwendeten Computers für die videobasierte Bewegungserfassung auf Infrarotbasis zu stark spiegelte, musste er abgedeckt werden. Das Ergebnis der Aufzeichnung war für jeden Proband eine Textdatei, in der die Raumkoordinaten und die Rotationsmatrix für jedes Körpersegment mit einer Frequenz von 60 Hz abgespeichert waren. Abschließend wurden für die computergestützte Analyse von der Versuchsperson 18 charakteristische Körpermaße erfasst.

Für die weitere softwaregestützte Analyse wurden die aufgezeichneten Bewegungsdaten mit Hilfe eines eigens erstellten Programms in ein textbasiertes Format für den Import in die Software RAMSIS Ergonomic Expert sowie in eine C3D-Datei für den Import in die Software AnyBody konvertiert. Die biomechanische Analyse mittels RAMSIS Ergonomic Expert benötigt für den Import von aufgezeichneten Bewegungsbahnen ein Manikin, dessen Abmessungen und Körperhaltung den aufgezeichneten

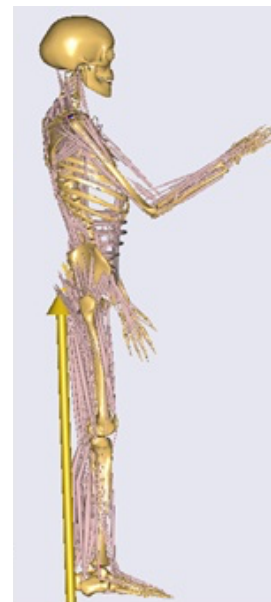
Bewegungsdaten entspricht. Dazu wurde mit Hilfe der charakteristischen Körpermaße des Probanden in der Software RAMSIS Body Builder ein Manikin erstellt (Abbildung 4.17b). Nachdem am Manikin Referenzpunkte an den Stellen der Marker erstellt wurden, konnten diese den importierten Bewegungsbahnen zugeordnet werden. Nach diesem Schritt folgte das Manikin den aufgezeichneten Bewegungsdaten. Nun konnten zu jedem Zeitpunkt der Bewegung die notwendigen Berechnungsdaten wie Gelenkwinkel, Körpermasse inkl. Teilmassen und Schwerpunkte mit Hilfe der Analysefunktionen von RAMSIS ermittelt werden. Ebenso war die Analyse des Haltungskomforts bzw. die Komfortanalyse einzelner Körperteile möglich. Bei der Interaktion mit einem fest installierten Touchscreen war speziell die Stellung der Halswirbelsäule kritisch zu hinterfragen (vgl. Unterabschnitt 4.3.3). Die Software AnyBody ermöglichte anschließend die biomechanische Analyse der Beanspruchung einzelner Muskeln. Durch den Import der Bewegungsbahnen waren Haltung und Bewegung des Manikins identisch zur realen Versuchsperson (Abbildung 4.17c).



(a) Bewegungserfassung



(b) Modell in RAMSIS



(c) Modell in AnyBody

Abbildung 4.17: Bewegungserfassung und Computermodelle der Interaktion

Anschließend wurde die Haltungskraft an der Zeigefingerspitze in Richtung der Schwerkraft mit 15 % der Dauerleistungsgrenze des 50. Perzentils männlich angenommen. Die zu erbringende Muskelkraft entspricht nach Rohmert (1960) und Schmidtke (1989) der statischen Dauerleistungsgrenze (DLG) und ist damit von einem gesunden Mann über einen längeren Zeitraum erbringbar. Die daraus resultierende Muskelbeanspruchung ermöglichte die Identifikation beanspruchter Muskeln. Auf

eine Quantifizierung dieser Muskelbeanspruchung wurde aufgrund der künstlichen Beaufschlagung der Fingerspitze mit einer zusätzlichen Kraft verzichtet.

### 4.4.3 Ergebnisse

Während der Studie wurden die Bewegungsdaten von zwei Probanden aufgezeichnet (Abbildungen 4.17a und 4.18a) und computergestützt ausgewertet. Der Import von aufgezeichneten Bewegungsdaten mittels RAMSIS Ergonomic Expert (vgl. Abbildung 4.18b) und die anschließende biomechanische Analyse ermöglichten die Ermittlung individueller Parameter wie resultierende Körpermaße, Körpermasse sowie Teilmassen, Schwerpunkte und Gelenkwinkel. Die von RAMSIS anhand der Manikin-Abmessungen ermittelte Körpermasse wich lediglich 1,5 kg von der realen Masse der Versuchsperson ab. Anhand dieser Daten ließ sich zusammen mit dem bereits genannten biomechanischen Modell (vgl. Unterabschnitt 4.4.1) die Kraft im Schultergelenk für eine individuelle Versuchsperson berechnen. Die RAMSIS-Funktion zur Komfortanalyse zeigte allerdings auch für die extremsten Haltungen der Touchscreeninteraktion keine Auffälligkeiten. Dies könnte dem höhenverstellbaren Tisch geschuldet sein, der für diesen Versuch auf eine optimale Höhe eingestellt wurde. Dies ist bei stationären Touchscreensystemen abseits von Laboruntersuchungen fast nie der Fall. Die Ergebnisse der Analyse statischer Muskelkräfte mittels AnyBody ermöglichten die Bestätigung der Ergebnisse aus den Vorversuchen. Es zeigte sich, dass der Bewegungsanteil bei der Interaktion mit stationären Touchscreens fast ausschließlich durch den Deltamuskel realisiert wird. Dies wurde von AnyBody durch eine dunkelrote Einfärbung der betroffenen Muskelgruppen visualisiert (vgl. Abbildung 4.18c).

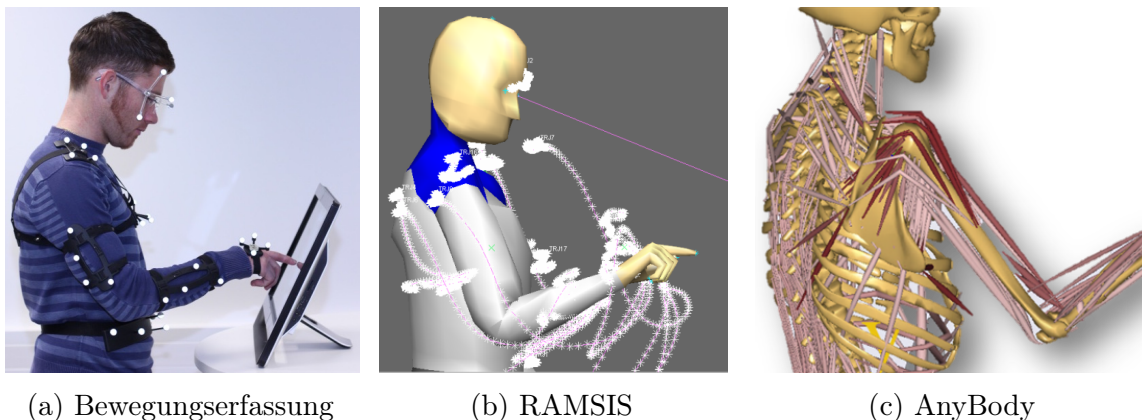


Abbildung 4.18: Softwaregestützte Analyse der Biomechanik mittels RAMSIS und AnyBody

### 4.4.4 Diskussion

Die Hinweise aus der Vorstudie zu den beanspruchten Muskeln konnten im Rahmen der computergestützten Analyse der Biomechanik bei der Touchscreeninteraktion bestätigt werden (vgl. Unterabschnitt 4.3.3). Der computergestützte Ansatz ermöglichte im Gegensatz zum einfachen biomechanischen Modell (vgl. Abbildung 4.16) die Berücksichtigung dreidimensionaler Bewegungen. Die Gelenkwinkel, Körpermasse (inkl. Teilmassen) und Schwerpunkte einzelner Extremitäten waren mit dieser Methode auch für Körperabmessungen abseits des 50. Perzentils männlich problemlos bestimmbar, so dass nicht auf Tabellenwerte mit militärischen Hintergrund zurückgegriffen werden musste. Diese Tabellenwerke (z. B. DOD-HDBK-743A) sind zwar sehr umfangreich, aber durch die Vorauswahl, die bei Soldaten im Rahmen der Musterung getroffen wird, nicht repräsentativ für die Zivilbevölkerung. Im Gegensatz dazu hat sich gezeigt, dass die mittels RAMSIS ermittelte Körpermasse kaum von der Realität abweicht, obwohl das manuelle Abmessen der Probanden mit einem Maßband und das händische Anlegen des Manikins in der Software RAMSIS BodyBuilder fehlerbehaftet sind.

Bei der computergestützten Maximalkraftberechnung werden automatisch gesamte Gelenkketten berücksichtigt. Allerdings ist dafür bei AnyBody eine Haltekraft notwendig. Eine reine Haltungskraft unterstützt die Software in der verwendeten Version nicht, so dass die Haltungskraft als künstliche Haltekraft an der Fingerspitze des Manikins in Richtung der Schwerkraft eingeleitet wurde. Auch wenn die verwendete Kraft nicht repräsentativ für die Touchscreeninteraktion war, hat sie dennoch die Identifikation der belasteten Muskulatur ermöglicht, wodurch die Beobachtungen aus der Vorstudie bestätigt wurden. Die Komfortanalyse der Körperhaltung bei der Touchscreeninteraktion war mit RAMSIS nicht möglich, da die Software dafür eine Fahrergrundhaltung voraussetzt. Dass eine Abweichung von der Fahrergrundhaltung nicht vorgesehen war, ist dem Ursprung der Software (Automobilbau) geschuldet. Auch eine dynamische Analyse der Bewegungsabläufe war mit RAMSIS nicht realisierbar. Dennoch hat sich RAMSIS zur Datengewinnung und einfachen biomechanischen Modellierung als zielführend erwiesen.

Obwohl die in der computergestützten Analyse der Biomechanik ermittelten Kräfte unter der Dauerleistungsgrenze der einzelnen Muskeln lagen, konnten nach der Vorstudie bei einigen Probanden Folgen von Überbeanspruchung beobachtet werden. Es wurde angenommen, dass der dynamische Bewegungsanteil der Touchscreeninteraktion größer war als bisher angenommen, so dass die Touchscreeninteraktion zu Beanspruchungen führt, welche die Dauerleistungsgrenze überschreiten. Die computergestützte Analyse beschränkte sich allein auf Haltungsarbeit und vernachlässigte damit die dynamischen Interaktionsanteile.

#### 4.4.5 Schlussfolgerung

Mit Hilfe von aufgezeichneten Bewegungsdaten bei der Touchscreeninteraktion konnte eine charakteristische Körperhaltung ermittelt werden. Die Ermittlung der in dieser Körperhaltung statisch wirkenden Kräfte (Haltungsarbeit) ergab für den Deltamuskel eine Beanspruchung unterhalb der Dauerleistungsgrenze. Aufbauend auf der ermittelten Körperhaltung wurde eine Computersimulation mittels AnyBody durchgeführt, bei der die Erkenntnisse der Vorstudie bezüglich der beanspruchten Muskulatur bestätigt werden konnten. So zeigte sich auch in der Computersimulation mit AnyBody bei der charakteristischen Körperhaltung der Touchscreeninteraktion die größte Beanspruchung für den Delta- und den Trapezmuskel.

Die Ergebnisse der computergestützten Analyse ermöglichten die Planung und Vorbereitung einer Folgestudie, bei der die dynamischen Anteile der Touchscreeninteraktion berücksichtigt werden konnten. Durch die Identifikation der beanspruchten Muskulatur wurde der gezielte Einsatz der Elektromyografie ermöglicht. Damit tragen diese Ergebnisse einen Anteil zur Beantwortung der Frage nach dem Einfluss der touchscreeninduzierten Ermüdung des Hand-Arm-Systems auf die Interaktion (Forschungsfrage 4) und zum Ableiten von Empfehlungen zu ggf. notwendigen Erholungspausen (Forschungsfrage 5) bei.

### 4.5 Touchscreeninduzierte Ermüdung des Hand-Arm-Systems

Der Versuch zur Biomechanik der Touchscreeninteraktion wurde konzipiert, um die Forschungsfrage 4 (vgl. Abschnitt 2.7) zu beantworten: Verändert sich die Interaktion durch die touchscreeninduzierte Ermüdung des Hand-Arm-Systems? Das Ziel war der Nachweis des sogenannten „Gorillaarm“ (vgl. Unterabschnitt 2.4.5) mit Hilfe objektiver Messdaten. Anhand dieser Messdaten war zudem zu prüfen, ob Empfehlungen zur zulässigen Interaktionsdauer mit stationären Touchscreensystemen abgeleitet werden können (Forschungsfrage 5, vgl. Abschnitt 2.7). Zur Studie ist eine Publikation in Vorbereitung.

Es wurde vermutet, dass die physische Belastung, induziert durch eine konstante und andauernde Touchscreeninteraktion, zu kinematischen Veränderungen der Bewegung und physiologisch nachweisbaren Effekten in der beanspruchten Muskulatur führt. Da die Art, Umfang und Richtung der kinematischen Veränderungen nicht absehbar waren, wurde eine Punkthypothese ( $H_1$ ) formuliert (ungerichtet). Bei der physischen Beanspruchung wurde hingegen eine Steigerung mit zunehmender Versuchsdauer

erwartet, woraus eine gerichtete Hypothese resultierte ( $H_2$ ). Die korrespondierenden Hypothesenpaare lauten wie folgt:

$H_{10}$  Die Kinematik der Touchscreeninteraktion ist unabhängig von der Interaktionsdauer.

$H_{11}$  Die Kinematik der Touchscreeninteraktion ändert sich in Abhängigkeit der Interaktionsdauer.

$H_{20}$  Die physische Beanspruchung bei der Touchscreeninteraktion verringert sich mit zunehmender Interaktionsdauer oder bleibt gleich.

$H_{21}$  Die physische Beanspruchung bei der Touchscreeninteraktion steigert sich mit zunehmender Interaktionsdauer.

Das Signifikanzniveau wurde mit den für nutzerbasierte Laboruntersuchungen üblichen  $\alpha = 0,05$  festgelegt (Bortz & Döring 2006, Eid et al. 2011). Entsprechend der Hypothesenanzahl ergibt eine Korrektur nach der Bonferroni-Methode (Dunn 1961) ein korrigiertes Signifikanzniveau von  $\alpha_{\text{kor}} = 0,025$ .

##### 4.5.1 Hintergrund

Umgangssprachlich wird der Begriff Muskelermüdung für eine Reihe verschiedener Symptome und Zustände verwendet, wie z. B. Schwäche und Müdigkeit (Enoka 2008). Nach einer strengerem Definition wird unter Muskelermüdung die bewegungsinduzierte Reduktion der Fähigkeit zur Krafterzeugung verstanden, die bereits kurz nach dem Beginn einer andauernden Belastung feststellbar und zudem reversibel ist (Enoka 2008, Williams & Ratel 2009).

Eine Möglichkeit zur objektiven Erfassung der Muskelaktivität bietet die Elektromyografie (EMG). Dabei handelt es sich um ein Verfahren zur Ermittlung des Erregungs- und Kontraktionszustandes der Skelettmuskulatur. Bei diesem Verfahren werden die Veränderungen der elektrischen Potenziale, die bei einer Muskelkontraktion auftreten, messtechnisch erfasst (vgl. Unterabschnitt 2.5.3). Eine Erfassung dieser Veränderung ist bei der nichtinvasiven Oberflächenmyografie über eine bipolare Ableitung möglich. Dazu werden auf der Haut zwei Elektroden in Verlaufsrichtung der Muskulatur über dem zu untersuchenden Muskel angebracht. Zusätzlich wird eine Referenzelektrode auf einem elektrisch inaktiven Bereich angebracht, zum Beispiel über einem Knochen. Das erfasste elektrische Potenzial wird von den Elektroden abgeleitet und über einen Differenzverstärker zu einem Aktionspotenzial verrechnet (Basmajian & De Luca 1985, Kamen & Gabriel 2010). Das Aktionspotenzial wird auch als Motor-Unit-Action-Potential (MUAP) bezeichnet. Das EMG-Rohsignal besteht aus der Summe der ungefilterten unbearbeiteten Überlagerungen aller vom Elektrodenpaar erfassten

Aktionspotenziale. Dieses Summenpotenzial wird auch als Interferenzsignal bezeichnet (Winter 2009). Für die Aufzeichnung dieses Interferenzsignals hat sich nach Wiedemann et al. (2014) eine Erfassungsfrequenz von  $f = 1000$  Hz als angemessen erwiesen.

Zur Beurteilung der muskulären Ermüdung ist die Analyse des aufgezeichneten Interferenzsignals im Zeit- und Frequenzbereich notwendig (Davies & Reisman 1994). Die Ermüdung eines Muskels bei der isometrischen Kontraktion geht mit der Verringerung der traditionellen Spektraleigenschaften des EMG-Signals (z. B. mittlere oder Medianfrequenz) einher (Phinyomark et al. 2012, Beck et al. 2015). Flynn et al. (2004) nennen eine Verringerung der mittleren Frequenz von 15 % als sicheres Zeichen für die Muskelermüdung. In einer Studie von Shin & Zhu (2011) wurde die mittlere normalisierte Muskelaktivität zur Beurteilung der Muskelermüdung bei der Touchscreeninteraktion erfasst. Ein Einfluss der Versuchsdauer konnte in diesem Versuch nicht nachgewiesen werden. Zur Analyse der spektralen Eigenschaften muss das EMG-Signal vom Zeit- in den Frequenzbereich transformiert werden. Doch nur bei einer andauernden isometrischen Kontraktion kann das Signal für einen kurzen Zeitraum ( $t < 2$  s, vgl. Merletti & Conte 1997) als statisch angenommen werden, so dass eine Fourier-Transformation zulässig wäre (Merletti & Conte 1997, Bonato et al. 2001). Diese Bedingung ist im vorliegenden Versuchsdesign durch das Antippen wechselnder Ziele nicht erfüllt, so dass auf ein anderes Verfahren ausgewichen werden musste. Eine Analyse der Daten mit dem in der Software Biopac AcqKnowledge hinterlegten Algorithmus zur „EMG Frequency & Power Analysis“ war ebenfalls nicht möglich, da der dort genutzte Algorithmus zur Berechnung der spektralen Leistungsdichte ebenfalls auf der für diese Versuchsdaten unzulässigen Fourier-Transformation basiert. Für einen dynamischen Lastfall hat sich die spektrale Zerlegung des EMG-Signals im Vergleich zur mittleren oder Medianfrequenz als wirkungsvolleres Instrument zur Feststellung der Ermüdung herausgestellt (Beck et al. 2014). Ein geeignetes Verfahren für die Analyse des EMG-Signals im Frequenzbereich ist die Wavelet-Transformation (Reaz et al. 2006, Beck et al. 2014). Speziell für die Frequenzanalyse von EMG-Signalen entwickelte von Tschärner (2000) einen geeigneten Parametersatz für die Wavelet-Transformation.

### 4.5.2 Vorgehen

Zur objektiven Untersuchung der Muskelermüdung bei der Touchscreen-Interaktion wurden die Muskelaktivität und die Beschleunigung im Rahmen eines Laborversuchs anhand von Messwiederholungen mit abhängiger Stichprobe (Within-Subjects Design, vgl. Keren 1993) untersucht. Da die explorative Vorstudie mit neun Probanden gezeigt hatte, dass Probanden durchaus in der Lage sind, Tippaufgaben über eine Dauer



von 30 Minuten und darüber hinaus auszuführen, aber über die Monotonie dieser repetitiven Tätigkeit klagten, wurde der Versuch so gestaltet, dass die Probanden abwechselnd zwei verschiedene Aufgaben mittels andauernder Touchscreeninteraktion absolvierten. Dabei wurde die Muskelaktivität über die elektromyografischen Signale erfasst.

Die befragungsbasierten Ansätze zur Erfassung der wahrgenommenen Anstrengung bei physischer Belastung, wie zum Beispiel von Borg (1982), führen durch die befragungsbedingte Pause zu einer ungewollten Erholungsphase und verhindern so die Aufzeichnung einer kontinuierlich ansteigenden Ermüdung (vgl. Abschnitt 2.5). Aus diesem Grund konnten auch Fragebögen zur Ermittlung subjektiver Daten, wie zum Beispiel Zufriedenstellung nach SUS gemäß Brooke (1996) oder mentale Beanspruchung nach NASA-TLX gemäß Hart & Staveland (1988) während des Versuchs nicht eingesetzt werden.

Entsprechend der aufgestellten Hypothesen wurden die physische Beanspruchung und die Kinematik als abhängige Variablen festgelegt. Die Interaktionsdauer war die unabhängige Variable. Die erfassten demografischen Daten umfassten Alter, Geschlecht und Händigkeit und dienten zur Beschreibung der Stichprobe.

Aus der Operationalisierung der abhängigen Variablen resultierten Art und Umfang der dafür notwendigen Datenerfassung. Die physische Beanspruchung der interaktionsrelevanten Muskulatur wurde über die EMG-Signale von Delta- und Trapezmuskel operationalisiert. Konkret wurde die mittlere Frequenz des EMG-Signals zur Beurteilung der Muskelermüdung genutzt. Um eine Vergleichbarkeit zur Studie von Shin & Zhu (2011) herzustellen, wurde zusätzlich die normalisierte Muskelaktivität erfasst.

Im Vorversuch konnten der Delta- und der Trapezmuskel als von der Touchscreeninteraktion beanspruchte Muskeln identifiziert werden (vgl. Unterabschnitt 4.3.3). Die Lage der beiden Muskeln am menschlichen Körper ist in Abbildung 4.19 schematisch dargestellt. Die beiden oberflächennahen Muskeln ermöglichten damit über die elektromyografische Erfassung des jeweiligen Summenpotentials die Ermittlung interaktionsinduzierter physischer Beanspruchung.

Zur Operationalisierung der Interaktionskinematik wurde der Betrag des Beschleunigungsvektors herangezogen. Dieser Betrag wurde aus den drei Beschleunigungen berechnet, die am Handgelenk der dominanten Hand in drei orthogonalen Raumachsen mit einem Beschleunigungssensor erfasst wurden.

Für die Aufzeichnung der notwendigen Daten wurden mehrere Verfahren eingesetzt. In der Vorbefragung wurde die Online-Umfrage-Software LimeSurvey (The LimeSurvey Project Team 2013) in der Version 1.92+ Build 120909 verwendet. Es waren

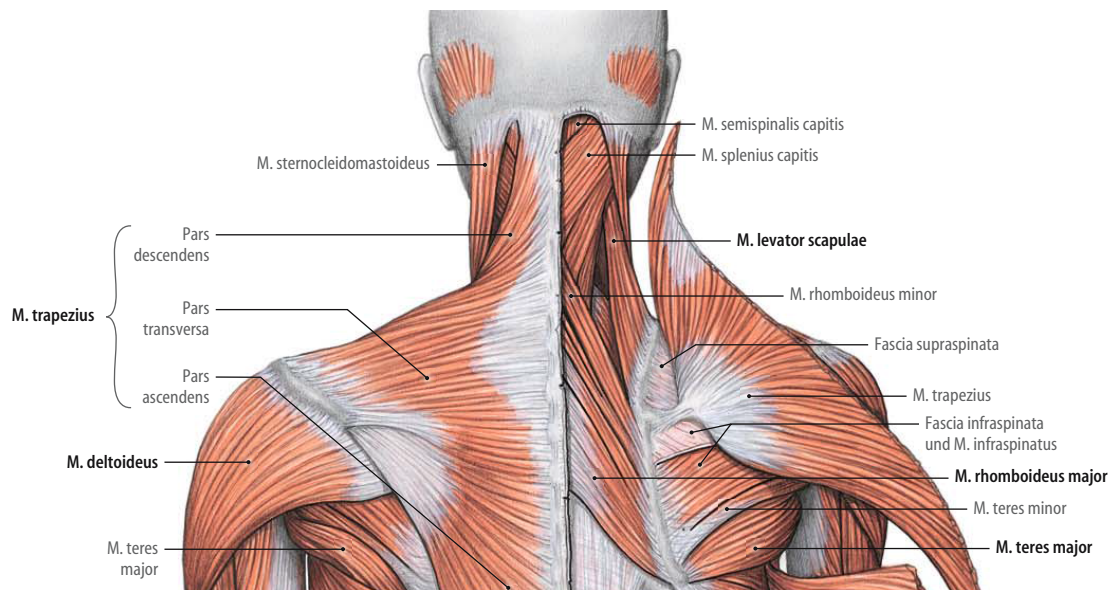


Abbildung 4.19: Interaktionsrelevante Muskulatur im Schulterbereich (Tillmann 2005, S. 405)

offenen Fragen zur Erfassung der demografischen Daten und der Kontaktmöglichkeiten enthalten. Das Edinburgh Inventory (Oldfield 1971), der Standardfragebogen zur Erfassung der Händigkeit, war vollständig mit zehn geschlossenen Fragen in deutscher Sprache enthalten.

Das Labor, in dem der Versuch stattfand, verfügte über ein System zur optischen Bewegungserfassung. Es handelte sich um ein ARTTrack 2 von Advanced Realtime Tracking (ART) (Advanced Realtime Tracking 2013) mit acht Kameras, die ein quadratisches Trackingvolumen mit einer Kantenlänge von  $a = 3,5\text{ m}$  und einer Höhe von  $h = 2,7\text{ m}$  abdeckten. Zur Abschirmung von Infrarotstörungen durch das Sonnenlicht verfügte das Labor über einen lichtdichten Vorhang.

Der Versuchsplatz des Probanden wurde im Erfassungsvolumen des optischen Bewegungserfassungssystems positioniert. Er bestand aus einem höhenverstellbaren Tisch und einem höhenverstellbaren Bürodrehstuhl ohne Armlehnen. Auf diese Weise wurde eine optimale Anpassung an die unterschiedliche Körpergröße der einzelnen Probanden ermöglicht. Durch die individuelle Berücksichtigung von Blickwinkel und Reichraum konnten identische Bedingungen für alle Probanden geschaffen werden. Die berührungsempfindliche Anzeige war vom Typ Elo Touchsystems 1541L (Elo Touch Solutions 2013). Sie verfügt über ein dualtouchfähiges akustisches System zur Berührungserfassung (SAW, vgl. Abschnitt 3.2) und ist an einem rutschfesten Standfuß (Smart Display SF-D01, Smart Display Concept 2012) befestigt. Der Standfuß ließ die stufenlose Verstellung des Neigungswinkels des Touchscreens zu, der für

den Versuch auf einen Winkel von  $30^\circ$  eingestellt wurde (vgl. Abschnitt 2.4). Für den Versuch wurde der Touchscreen an die vordere Tischkante gestellt, so dass dort kein Platz zum Ablegen von Hand, Unterarm oder Ellenbogen vorhanden war. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.20 zu sehen.



Abbildung 4.20: Versuchsplatz mit Proband

Am Versuchspersonenplatz wurde ein Terra-Business-PC der Wortmann AG mit dem Betriebssystem Microsoft Windows 7 eingesetzt. Für die Realisierung der Tippaufgabe und die Erfassung objektiver Leistungsdaten wurde wie in der Vorstudie die Software Movement Time Evaluator (MTE) in der Version 2.2.4 eingesetzt (Schedlbauer 2011). Die anzutippenden Ziele waren kreisförmig und der Durchmesser betrug  $W = 30 \text{ px}$ . Ein Durchmesser von  $W = 30 \text{ px}$  ergibt auf der gewählten Anzeige nach Gleichung 4.3 und den Werten von Elo Touch Solutions (2013) einen Kreis mit einem Durchmesser von  $d = 7,6 \text{ mm}$ . Die Variablen der Gleichung 4.3 wurden bereits in Unterabschnitt 4.3.2 erläutert.

$$\begin{aligned}
 \rho_A &= \frac{n_{Av}}{h_A} = \frac{n_{Ah}}{b_A} \\
 &= \frac{768 \text{ px}}{193,5 \text{ mm}} = \frac{1366 \text{ px}}{344,2 \text{ mm}} \\
 &= 3,97 \frac{\text{px}}{\text{mm}}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned}
 d &= \frac{W}{\rho_A} \\
 &= \frac{30 \text{ px}}{3,97 \frac{\text{px}}{\text{mm}}} \\
 &= 7,6 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Auf dem Versuchspersonen-PC wurde neben dem Spiel für die Ermüdungsaufgabe der entsprechende Multitouch-Treiber zum Touchscreen in der damals aktuellen Version 3.0.1 installiert, der die Kalibrierung des Touchscreens ermöglichte. Der dargestellte Bildschirminhalt des Versuchspersonen-PC wurde mit dem Framegrabber vom Typ VGA2USB des Herstellers Epiphan (Epiphan Systems 2013) zur Aufzeichnung erfasst.

Am Arbeitsplatz des Versuchsleiters (Abbildung 4.21) wurden drei Computer zur Versuchssteuerung und Datenaufzeichnung eingesetzt. Zur Videoaufzeichnung diente ein PC von Dell mit Microsoft Windows 7 und dem Noldus Media Recorder in der Version 1.0. Aufgezeichnet wurde der Bildschirminhalt des Versuchspersonen-PC von einem Framegrabber und eine seitliche totale Ansicht der Versuchsperson von einer Netzwerkkamera vom Typ Axis 214 PTZ (Axis Communications AB 2013) inklusive Tonspur von einem Tischmikrofon direkt vor dem Proband. Ein zweiter PC wurde zur Erfassung und Speicherung der physiologischen Parameter benötigt. Das verwendete System war ein BioPac MP150 (BioPac Systems 2013c) mit jeweils einer Erweiterung für Beschleunigungen (BioPac Systems 2013b) und Elektromyografie (BioPac Systems 2013a). Der dritte PC war ebenfalls ein PC von Dell und diente als Steuerzentrale für den Versuchsleiter. Mit der Software Noldus Observer XT in der Version 11.0 wurde die Aufzeichnung der Videos und der physiologischen Daten gesteuert. Zusätzlich war wie auf dem Versuchspersonen-PC die Software MTE von Schedlbauer (2011) in der Version 2.2.4 installiert und ermöglichte die Fernsteuerung der Tippaufgabe auf dem Versuchspersonen-PC. Für den Softwarewechsel am Versuchspersonen-PC zwischen der Software zur Kalibrierung der berührungsempfindlichen Anzeige, der Tipp- und der Ermüdungsaufgabe war am Versuchsleiterplatz eine Funkmaus und eine Funktastatur vorhanden. Das Bewegungserfassungssystem und die Aufzeichnung der Bewegungsdaten wurden über die Software DTrack in der Version 2.7 direkt vom Versuchsleiter-PC gesteuert.



Abbildung 4.21: Versuchsleiterplatz während der Ermüdungsaufgabe





Die Durchführung eines Versuchs begann mit der Begrüßung des Probanden im Versuchslabor. Anschließend wurde dem Proband die Versuchspersonenerklärung zum Ausfüllen vorgelegt. Die Versuchspersonenerklärung findet sich in Anhang E. Nach dem Klären offener Fragen wurde die fünf EMG-Elektroden angebracht.

Für einen guten elektrischen Kontakt zwischen Haut und Elektrode war die Haut entsprechend vorzubereiten (Merletti 1999). Dies umfasste ggf. die Enthaarung der betroffenen Hautpartie mit einem Einwegrasierer. Anschließend wurden tote Hautschichten der Epidermis mit feinem Sandpapier verletzungsfrei abgetragen. Zur Entfettung der Haut wurde sie mit einem in Alkohol getränkten Zellstofftupfer abgerieben. Auf diese Weise wurde eine möglichst geringe Impedanz der Elektrode erreicht.

Je zwei Elektroden wurden über dem Trapezmuskel am unteren Rand des Schulterblatts und über dem Deltamuskel seitlich am Oberarm positioniert. Die korrekte Position der Elektroden wurde durch Anspannen der beiden Muskeln kontrolliert. Der aus der Applikation resultierende Abstand der aufgeklebten Elektroden betrug dabei ca.  $\Delta s = 30 \text{ mm}$ . Die Referenzelektrode wurde am Dornfortsatz des siebten Halswirbels (C7) angebracht. Die verwendeten Einwegelektroden mit Leitgel waren von GE Healthcare und trugen die Referenznummer 2009101-403 (vgl. Abbildung 4.22). Die Positionen der fünf applizierten EMG-Elektroden ist in Abbildung 4.23 zu sehen.

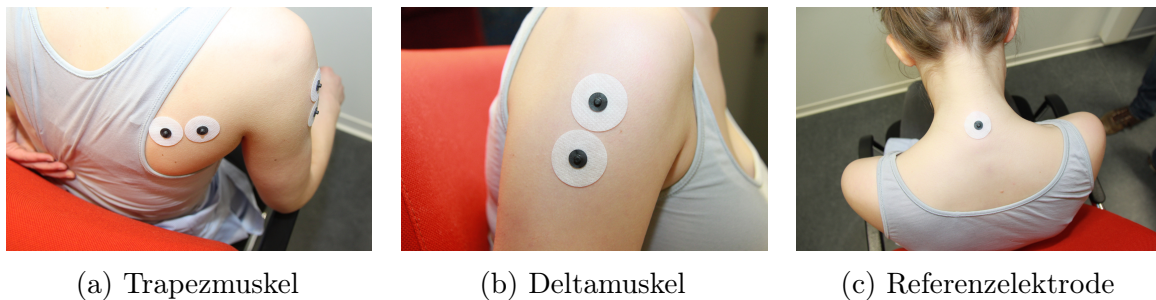


Abbildung 4.23: Positionierung der EMG-Elektroden an einer Probandin

Die Elektroden wurden verkabelt und die Kabel wurden gegen Verdrehen und zur Vermeidung von Bewegungsartefakten mit einem Fixierpflaster vom Typ Leukosilk gesichert. Dem Probanden wurden die Targets zur optischen Bewegungserfassung an Kopf, Schultern, Oberarmen, Unterarmen, Händen und Brust angelegt. Die Targets sind als schwarze Elemente mit hell leuchtenden Punkten in Abbildung 4.20 auf S. 158 erkennbar. Die beiden Funksender zur Übertragung der EMG- und Beschleunigungssignale wurden am Probanden befestigt und eingeschaltet. Tisch und Stuhl des Versuchspersonenplatzes wurden in der Höhe individuell an den Proband angepasst.

Nach dem manuellen Start der Datenaufzeichnung und der Bewegungserfassung durch den Versuchsleiter wurde zuerst ein Händeklatschen des Probanden aufgezeichnet, um notfalls eine zusätzliche Synchronisationsmöglichkeit der verschiedenen Video- und Sensordaten zu haben. Anschließend wurde mit dem Probanden eine Kraftübung mit dem Ziel einer maximalen isometrischen Kontraktion der beiden präparierten Muskeln durchgeführt. Der Proband muss dabei für jeden Muskel je eine bestimmte Armhaltung gegen eine hohe statische Belastung über mehrere Sekunden aufrecht erhalten. Die auf diese Weise gewonnen EMG-Werte der Muskelaktivität dienen später der Normalisierung der EMG-Daten eines Probanden während der Interaktion. Eine so durchgeführte Normalisierung wird auch als MVC-Normalisierung (Maximum Voluntary Contraction) bezeichnet. Dadurch wurde der Vergleich der EMG-Daten zwischen mehreren Probanden im Rahmen der Auswertung überhaupt ermöglicht.

Es folgte die Positionierung des Probanden am Versuchspersonenplatz sowie die Kalibrierung des Touchscreens mit der vom Hersteller stammenden Software. Die Genauigkeit der Kalibrierung wurde mit einem Testlauf der Tippaufgabe mit lediglich 12 Zielen überprüft und notfalls wiederholt. Der Testlauf diente zudem dazu, den Proband mit der Tippaufgabe vertraut zu machen. Anschließend begann die eigentliche Versuchsdurchführung.

Mit dem Start der Datenaufzeichnung begann ebenfalls die Video- und Audioaufzeichnung des Versuchs. Sowohl der Versuchspersonenplatz als auch der Bildschirminhalt der Versuchspersonencomputers wurden für die gesamte Versuchsdauer aufgezeichnet. Von der Biopac-Software wurde ebenfalls während der gesamten Versuchsdauer die Rohdaten der beiden EMG- und der drei Beschleunigungskanäle kontinuierlich aufgezeichnet und in einem Logfile abgelegt. Die MTE-Software erzeugte mit jedem Durchgang der Tippaufgabe ein Logfile mit der Interaktionsleistung des Probanden. Die ART-Software zur Bewegungserfassung legte mit dem Abschluss der Aufzeichnung ein Logfile für die gesamte Versuchsdauer ab. Für jeden Proband entstanden also folgende Versuchsdaten:

- Biopac-Logfile
  - 2 EMG-Kanäle (Trapez- und Deltamuskel)
  - 3 Beschleunigungen (x-, y- und z-Achse)
- MTE-Logfile
  - Zeitpunkt jeder Berührung
  - Position des Ziels
  - Fehler beim Antippen eines Ziels

- Video
  - Bildschirmaufzeichnung des Versuchspersonencomputers
  - Totale des Versuchspersonenplatzes
- ART-Logfile
  - Position aller Targets (dreidimensionale Translation)
  - Orientierung aller Targets (dreidimensionale Rotation)

Mit dem Absolvieren der letzten Tippaufgabe wurde die Datenaufzeichnung beendet und die Versuchsdaten gesichert. Dem Proband wurden die Funksender, die Targets und die Klebeelektroden abgenommen. Gelegentlich auftretende Rötungen an den Stellen der Klebeelektroden wurden auf Wunsch des Probanden mit einer beruhigenden Salbe behandelt. Der gesamte Versuch dauerte je Proband zirka eine Stunde. Die Versuche fanden über einen Zeitraum von zwei Wochen jeweils zur gleichen Tageszeit statt.

Zur Auswertung der erfassten Daten wurde eine Software erstellt, die zuerst die Rohdaten der einzelnen Datenquellen (Noldus Observer, MTE, Biopac) einliest und die Zeitstempel abgleicht. Dies war nötig, da die Rohdaten des Noldus Observer absolute Zeitangaben in der genutzten Zeitzone (Mitteleuropäische Sommerzeit, UTC+2), die Rohdaten des MTE absolute Zeitangaben im Unix-Zeitformat (vergangenen Sekunden seit Donnerstag, dem 1. Januar 1970 00:00 Uhr UTC) und die Biopac-Rohdaten relative Zeitangaben in Sekunden seit dem Start der Versuchsaufzeichnung enthalten. Anschließend wurden für jeden Probanden die folgenden Berechnungsschritte durchgeführt:

1. Ermittlung der maximalen isometrischen Kontraktion (Maximum Voluntary Contraction) aus der Kontraktionsphase für jeden der beiden EMG-Kanäle
2. Ermittlung aller fehlerfreien Berührungen der zentralen „Home“-Schaltfläche
3. Berechnung der relativen Muskelaktivierung als quadratischer Mittelwert (Root Mean Square, RMS) über die letzten 100 Millisekunden im Verhältnis zur maximalen isometrischen Kontraktion vor jeder Berührung für jeden der beiden EMG-Kanäle
4. Berechnung der maximale Aufprallbeschleunigung (Maximum Impact Acceleration, MIA) als Vektorbetrag für jede Berührung

Zum Einlesen der XML-Dateien wurde auf die Bibliothek von Marcadet (2014) zurückgegriffen (Lizenzbedingungen siehe Anhang H). Details zur erstellten Software



können dem Quellcodeausdruck in Anhang G entnommen werden. Die Berechnungsergebnisse wurden für jeden Proband in Form von zwei CSV-Dateien zur statistischen Auswertung abgelegt:

- Rohdaten der beiden EMG-Kanäle für jede absolvierte Zeigeaufgabe (zur Ermittlung der mittleren Frequenz)
- relative Muskelaktivierung und maximalen Aufprallbeschleunigung für jede einzelne Berührung (zur statistischen Auswertung)

Für die statistischen Auswertung wurde die Software RStudio Desktop in der Version 0.99.485 (RStudio 2015) eingesetzt. Zur Analyse des Frequenzspektrums wurden die EMG-Rohdaten jeder Zeigeaufgabe und jedes Kanals mittels eines R-Skript in einzelne CSV-Dateien separiert, so dass eine Verwendung des Skripts von Faulhuber (2012) zur Wavelet-Transformation nach von Tscherner (2000) möglich war. Das Matlab-Skript von Faulhuber (2012) fand mittels GNU Octave in der Version 4.0.0 (Eaton et al. 2015) Verwendung.

Analog zur Vorstudie wurde der Zeiteinfluss auf die Aufprallbeschleunigung bei der Tippaufgabe mittels Korrelation analysiert (vgl. Unterabschnitt 4.3.2). Über dieses Analyseverfahren wurde auch der Einfluss der Versuchsdauer auf die Muskelaktivität untersucht.

Die zu berücksichtigende Grundgesamtheit war bei einer empirischen Untersuchung zu den Grundlagen der Biomechanik bei der Touchscreeninteraktion nicht eingrenzbar. Je nach Anwendungsfall eines Touchscreens führen unterschiedliche Nutzergruppen die Interaktion aus (vgl. Abschnitt 4.2). Die Probanden mussten daher für die Teilnahme am Versuch mit Ausnahme einer normalen oder korrigierten Sehfähigkeit sowie einem unbeeinträchtigten Hand-Arm-System für die Touchscreeneingabe keine weiteren Voraussetzungen erfüllen. Der Umfang der Stichprobe wurde mit 30 Probanden festgelegt, um eine statistische Prüfung der Hypothesen mittels Signifikanztests zu ermöglichen.

Der Aufruf zur Versuchsteilnahme erfolgte in Lehrveranstaltungen und per Mailverteiler unter den Studierenden. Zur Steigerung der Motivation zur Versuchsteilnahme wurde eine Versuchspersonenvergütung in Form von drei Buchgutscheinen im Wert von jeweils 20 Euro angekündigt, die nach Abschluss der Versuche unter den Versuchsteilnehmern verlost wurden. Im Aufruf war ein Link zur Onlinebefragung enthalten, mit der die demografischen Daten, die Händigkeit und die Kontaktdaten der Probanden abgefragt wurden. Die Onlinebefragung wurde mit 30 vollständig ausgefüllten Datensätzen geschlossen. Insgesamt wurden 83 Datensätze angelegt.

Durch eine entsprechende Aufgabengestaltung wurde für eine unterbrechungsfreie Touchscreeninteraktion gesorgt. Die erste zu absolvierende Aufgabe war eine Tipp-

aufgabe nach dem Gesetz von Fitts (Fitts 1954) in der zweidimensionalen Variante entsprechend MacKenzie & Buxton (1992). Die Tippaufgabe wurde im Gegensatz zur Vorstudie auf 64 Ziele begrenzt, die quasirandomisiert erschienen und von den Probanden möglichst schnell und fehlerfrei anzutippen waren. Die Ziele waren ausgehend von der Mitte der Anzeige im Abstand von jeweils 100 Pixeln und im Winkelraster von  $45^\circ$  angeordnet, so dass ein Muster entsprechend Abbildung 4.24 entstand. Durch die quasirandomisierte Reihenfolge konnten die Probanden nicht das nächste Ziel voraussagen. Eine so konzipierte Tippaufgabe dauerte je nach Effizienz des Versuchsteilnehmers zwischen 50 und 70 Sekunden. Die Ausführung dieser Aufgabe ermöglichte eine standardisierte Erfassung des Ermüdungszustandes der interaktionsrelevanten Muskulatur.

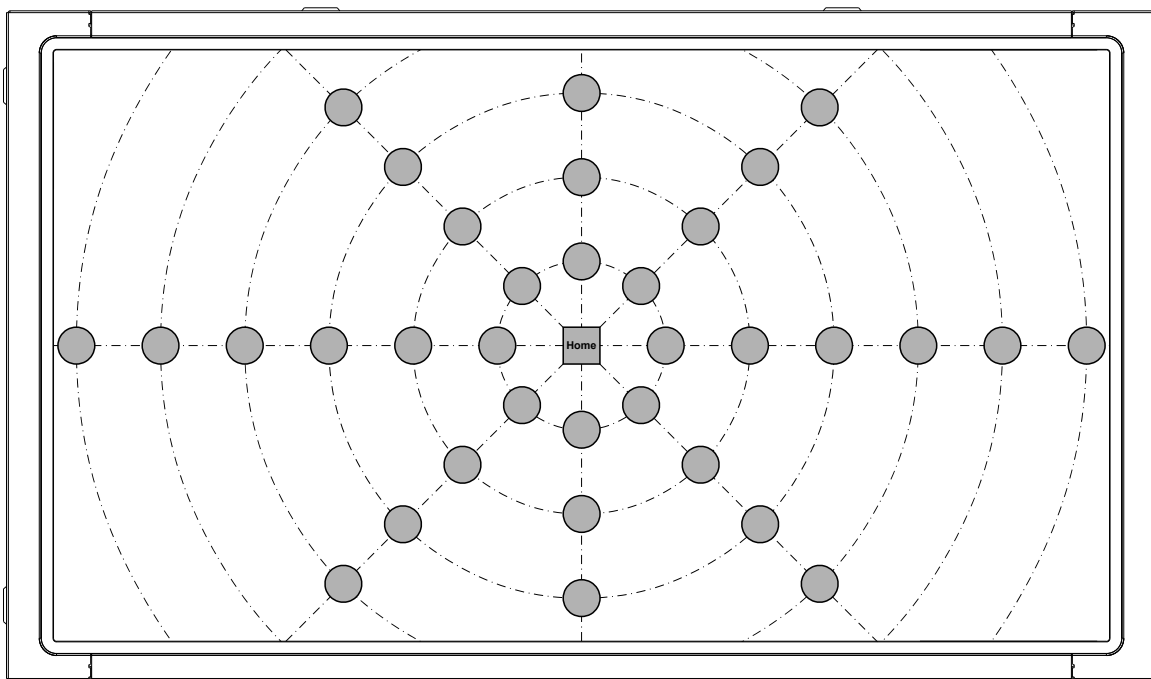


Abbildung 4.24: Anordnung der Ziele für die Tippaufgabe auf dem Touchscreen

Die zweite Interaktionsaufgabe war ein Computerspiel für Touchscreens, bei der die Probanden zur Aufgabenerfüllung dauerhaft zwei Finger der dominanten Hand auf dem Touchscreen bewegen mussten. Auf diese Weise wurden unterbrechungsbedingte Erholungseffekte vermieden und zugleich die physische Belastung der Muskulatur des Hand-Arm-Systems verstärkt. Für diese Ermüdungsaufgabe wurde von Microsoft das Spiel Rebound (Microsoft 2013a) aus dem Touch Pack für Windows 7 (Microsoft 2013b) verwendet. Das Spiel war so konfiguriert, dass die Finger horizontal mittig in der unteren Bildschirmhälfte zu führen waren und ein Spieldurchgang vier Minuten dauerte (Abbildung 4.25).

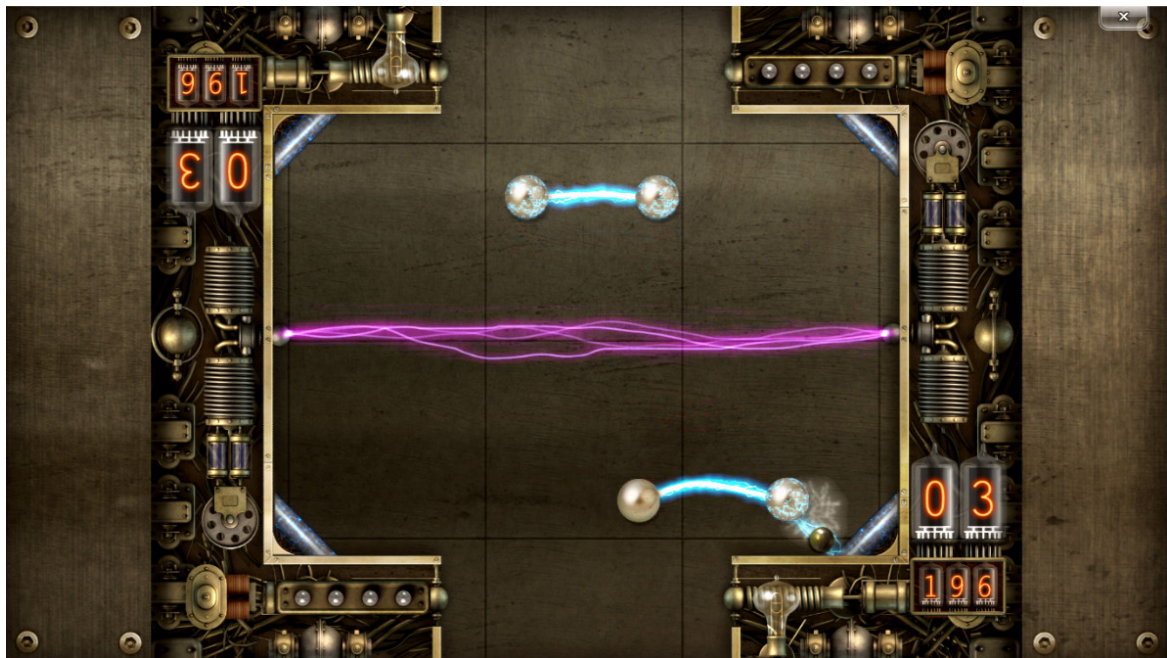


Abbildung 4.25: Ermüdungsaufgabe mittels Microsoft Rebound (Microsoft 2013a)

Da die Versuche lediglich mit einem Probanden gleichzeitig durchgeführt werden konnten, resultierte die Versuchsdauer aus der Auslegung der einzelnen Aufgaben sowie der Anzahl der Aufgabenwiederholung. Der Zyklus aus Tipp- und Ermüdungsaufgabe wurde insgesamt fünfmal wiederholt, um einen Zeitverlauf der objektiven Interaktionsdaten zu erfassen. Ein Diagramm des Ablaufs ist in Abbildung 4.26 dargestellt. Um den Versuchsablauf zu standardisieren und so allen Probanden vergleichbare Versuchsbedingungen zu garantieren, wurde ein Ablaufprotokoll erstellt, das bei jeder Versuchsdurchführung schrittweise abgearbeitet wurde. Das vollständige Ablaufprotokoll ist in Anhang F enthalten.

### 4.5.3 Ergebnisse

An der Studie nahmen insgesamt 30 Probanden teil. Von einem Proband wurde der erste Durchgang der Tippaufgabe aus Unachtsamkeit der Versuchsleitung nicht aufgezeichnet, so dass bei diesem Proband kein Startzeitpunkt feststellbar war. Dieser unvollständige Datensatz wurde daher von der Auswertung ausgeschlossen. Die folgende Analyse bezieht sich auf die verbliebenen 29 Probanden. 13 Probanden waren männlich, 16 weiblich. Der Altersdurchschnitt der Stichprobe lag bei  $26,7 \pm 5,1$  Jahre. Die konkrete Altersverteilung ist im Diagramm in Abbildung 4.27 auf S. 168 dargestellt.

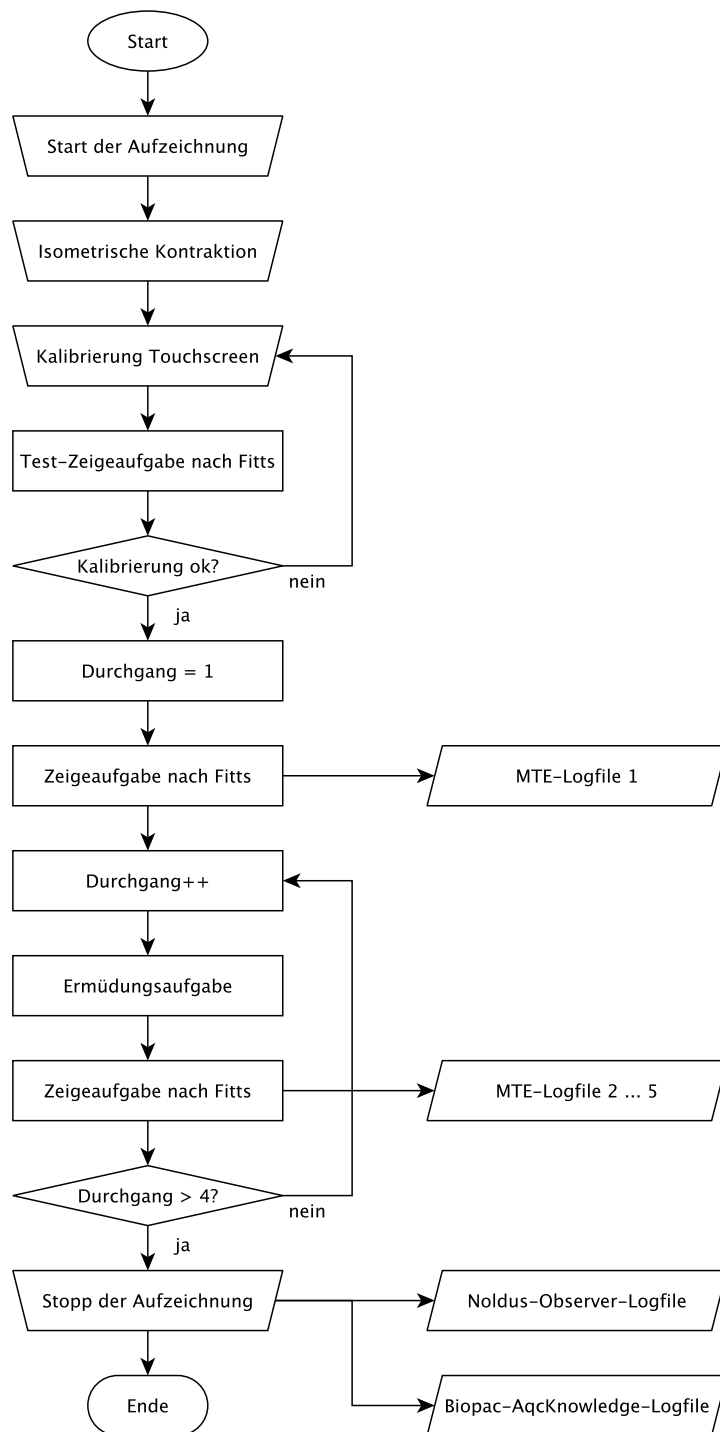


Abbildung 4.26: Ablauf des Versuchs zur empirischen Untersuchung der Biomechanik

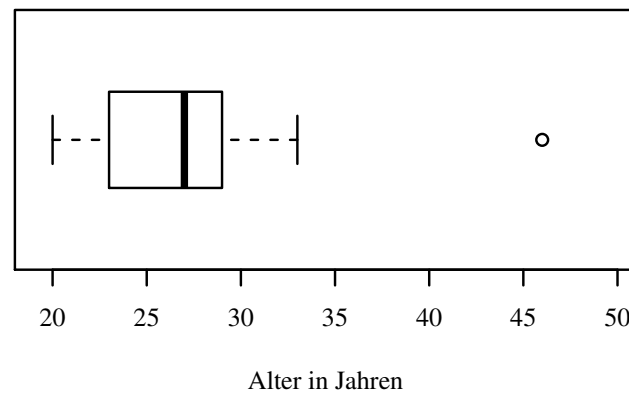


Abbildung 4.27: Altersverteilung der Stichprobe ( $n = 29$ )

Die Händigkeit der Probanden wurde im Rahmen der Vorbefragung erfasst und mit der im Versuch bevorzugten Hand abgeglichen. Die Ergebnisse der Vorbefragung zur Händigkeit ergaben für zwei Probanden eine gleichberechtigte Nutzung beider Hände. Für den Versuch mussten sich diese beiden Probanden vorab auf eine Hand festlegen. Daraus ergaben sich für den Versuch 24 Rechtshänder und 5 Linkshänder. Die konkrete Aufteilung der Händigkeit der untersuchten Stichprobe ist in Abbildung 4.28 abgebildet.

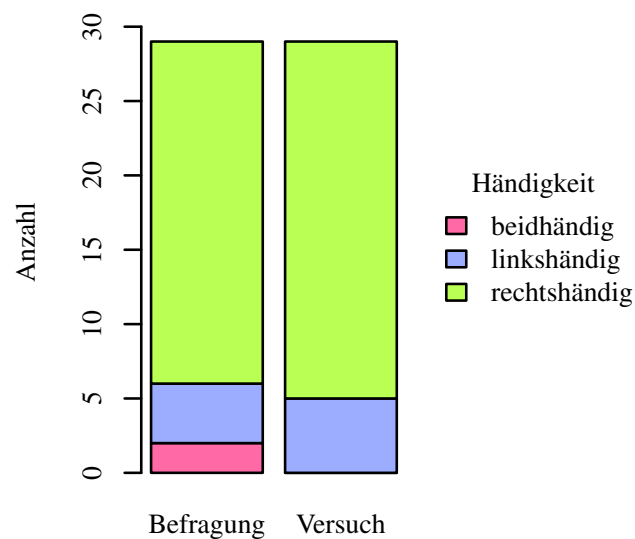


Abbildung 4.28: Verteilung der Händigkeit in der Stichprobe ( $n = 29$ )

Zur Analyse des Einflusses der Versuchsdauer auf die Aufprallbeschleunigung wurde die Korrelation nach Kendall berechnet. Die Korrelation zwischen der Versuchsdauer und der maximalen Aufprallbeschleunigung ergab keinen Zusammenhang

( $\tau = -0,028$ ;  $p = 2,2 \cdot 10^{-4}$ ). Die Aufprallbeschleunigung verändert sich bis zum Ende der Versuchsdauer nicht. Dies kann auch anhand der Darstellung des zeitlichen Verlauf der Beschleunigung über die Versuchsdauer in Abbildung 4.29 nachvollzogen werden. Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, die Nullhypothese  $H_{10}$  beizubehalten und die Alternativhypothese  $H_{11}$  zu verwerfen. Die Kinematik der Touchscreeninteraktion ist damit für den untersuchten Zeitraum unabhängig von der Interaktionsdauer.

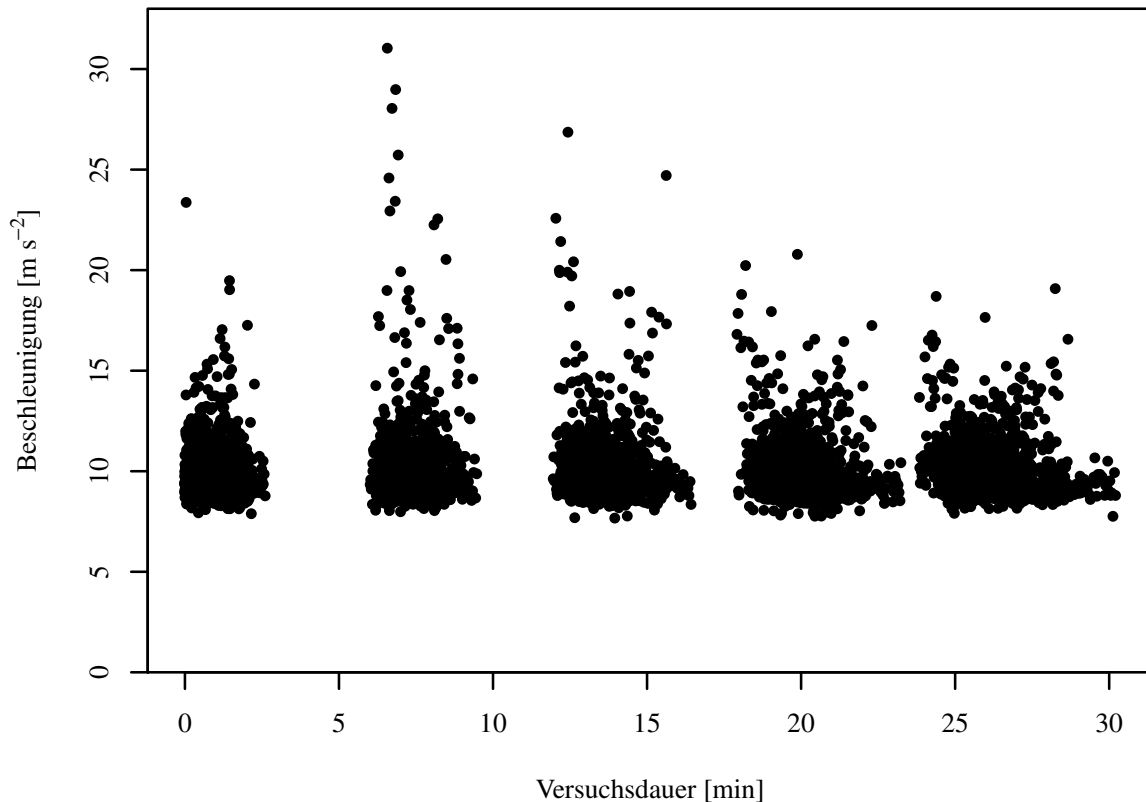


Abbildung 4.29: Zeitverlauf des Betrags des Beschleunigungsvektors ( $n = 29$ ,  $N = 7639$ )

Die Ergebnisse der Frequenzanalyse (Abbildung 4.30 auf S. 170) zeigen für den Trapezmuskel einen signifikanten Unterschied der mittleren EMG-Frequenz zwischen dem ersten und vierten Durchgang der Tippaufgabe (Tabelle 4.6 auf S. 170 und Tabelle 4.7 auf S. 171). Dieser Unterschied umfasst eine Abnahme der mittleren Frequenz um  $\Delta f_{\text{abs}} = 1,6 \text{ Hz}$  bzw.  $\Delta f_{\text{rel}} = 1,7 \%$ . Der vierte Durchgang der Tippaufgabe entspricht einer mittleren Interaktionsdauer von  $t_{\text{Interaktion}} = 1194 \text{ s}$ , also ca. 20 Minuten. Zum fünften Durchgang der Tippaufgabe sowie den übrigen Durchgängen konnte keine signifikante Verringerung gegenüber dem ersten Durchgang festgestellt werden. Die mittleren Frequenzen des Deltamuskels ändern sich nicht.

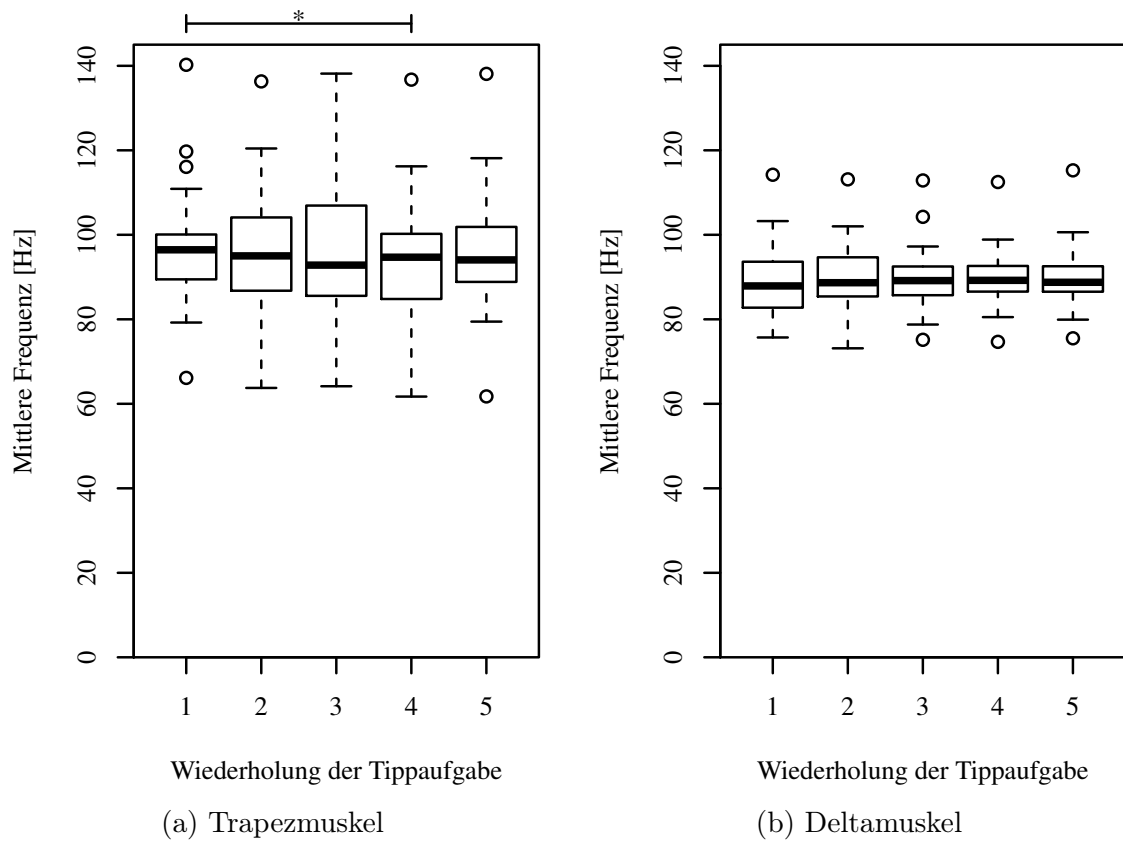


Abbildung 4.30: Verteilung der mittleren EMG-Frequenz je Muskel und Tippaufgabe ( $n = 29$ )

Tabelle 4.6: Ergebnisse zum Test auf Normalverteilung der mittleren Frequenz je Tippaufgabe (Shapiro-Wilk-Test;  $\alpha = 0,05$ ;  $n = 29$ ;  $W_{\text{krit}} = 0,963$ )

		1	2	3	4	5
<b>Trapezmuskel, absolute Werte [Hz]</b>	<b>p</b>	0,164	0,408*	0,606*	0,328	0,292
	<b>W</b>	0,948	0,964*	0,972*	0,960	0,957
<b>Deltamuskel, absolute Werte [Hz]</b>	<b>p</b>	0,102	0,246	0,057	0,065	0,038
	<b>W</b>	0,940	0,955	0,930	0,933	0,924
<b>Trapezmuskel, normalisierte Werte [%]</b>	<b>p</b>	–	0,615*	0,448*	0,753*	0,590*
	<b>W</b>	–	0,972*	0,966*	0,977*	0,971*
<b>Deltamuskel, normalisierte Werte [%]</b>	<b>p</b>	–	0,147	0,827*	0,366	0,761*
	<b>W</b>	–	0,946	0,980*	0,962	0,977*

\* Normalverteilung

Tabelle 4.7: Ergebnisse zum Signifikanztest der mittleren Frequenz je Tippaufgabe zum ersten Durchgang (einseitiger Wilcoxon-Vorzeichen-Rangsummentest;  $\alpha_{\text{kor}} = 0,025$ ;  $n = 29$ ;  $Z_{\text{krit}} = 1,645$ )

		1 – 2	1 – 3	1 – 4	1 – 5
<b>Trapezmuskel, absolute Werte [Hz]</b>	<b>p</b>	0,407	0,168	0,014*	0,128
	<b>Z</b>	0,249	0,983	2,194*	1,157
<b>Deltamuskel, absolute Werte [Hz]</b>	<b>p</b>	0,732	0,804	0,947	0,889
	<b>Z</b>	0,616	0,854	1,611	1,222
<b>Trapezmuskel, normalisierte Werte [%]</b>	<b>p</b>	0,359	0,128	0,012*	0,142
	<b>Z</b>	0,378	1,157	2,238*	1,092
<b>Deltamuskel, normalisierte Werte [%]</b>	<b>p</b>	0,770	0,832	0,954	0,901
	<b>Z</b>	0,768	0,962	1,676	1,287

\* signifikanter Unterschied

Der Zeitverlauf der Aktivität der beiden Muskeln während der Interaktion ist in Abbildung 4.31 und Abbildung 4.32 dargestellt. Da in den Daten beider Muskeln einige Artefakte vorhanden sind, eignet sich auch hier eine Korrelation nach Kendall. Für den Trapezmuskel (Abbildung 4.31) zeigt sich kein Zusammenhang ( $\tau = -0,004$ ;  $p = 0,640$ ). Auch die Muskelaktivität des Deltamuskels (Abbildung 4.32) ist unabhängig von der Versuchsdauer ( $\tau = -0,001$ ;  $p = 0,872$ ).

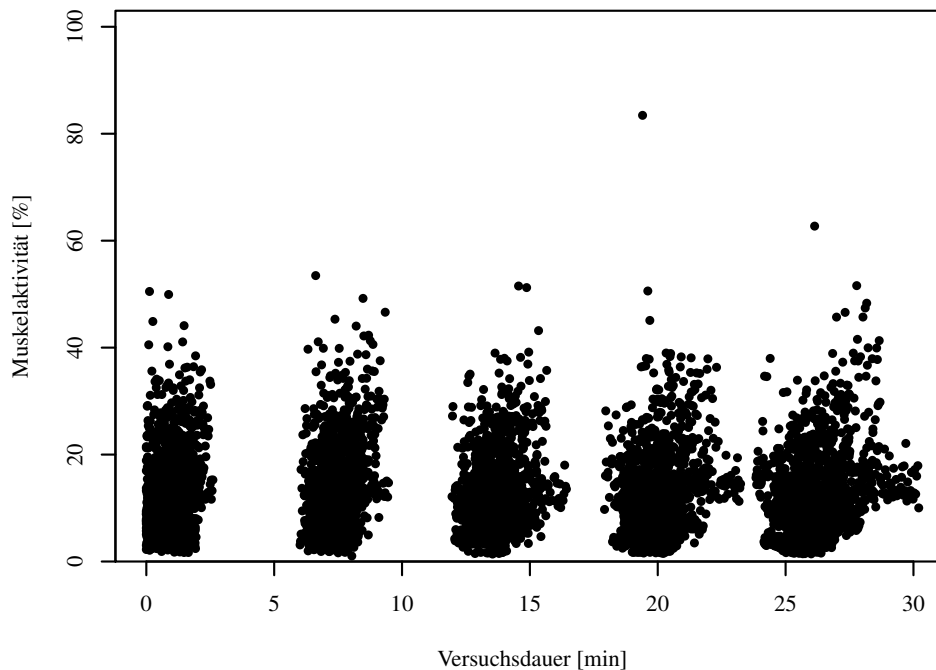


Abbildung 4.31: Zeitverlauf der Aktivität des Trapezmuskels ( $n = 29$ ,  $N = 7639$ )



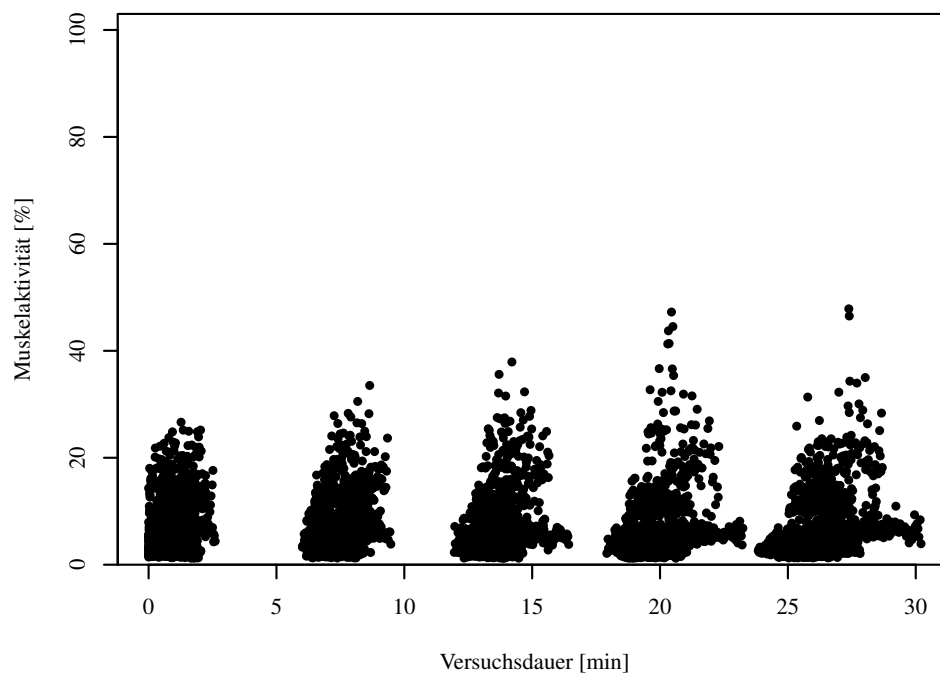


Abbildung 4.32: Zeitverlauf der Aktivität des Deltamuskels ( $n = 29$ ,  $N = 7639$ )

Da sowohl die Frequenzanalyse als auch die Analyse der normalisierten Muskelaktivität keine statistisch signifikanten Ergebnisse zu einer Ermüdung der Muskulatur durch die Touchscreeninteraktion liefern, konnte auch hier die Nullhypothese  $H_20$  nicht verworfen werden. Dementsprechend war die Alternativhypothese  $H_21$  abzulehnen. Die untersuchte Interaktionsdauer hat nicht zu einer nachweisbaren Ermüdung der beiden Muskeln geführt.

#### 4.5.4 Diskussion

Bei einem der ersten Probanden fiel eine der acht zur Bewegungserfassung benötigten Kameras mit einem technischen Defekt permanent aus. Dadurch wurden Position und Orientierung der Targets des Hand-Arm-Systems nicht kontinuierlich erfasst. Eine Analyse der damit unvollständigen Daten aus der optischen Bewegungserfassung war damit nicht möglich.

Während der Versuchsdurchführung konnte bei einem Probanden ein unerwartetes Interaktionsverhalten beobachtet werden. Während der Kalibrierung des Touchscreens tippte dieser Proband lediglich in die Mitte der Anzeige statt auf die Ziele in den Ecken des Bildschirms. Das Verhalten führte im anschließenden Testlauf der Tippaufgabe zu keinem einzigen Treffer. Die Versuchsleitung durchschaute das

Problem nicht sofort sondern ging von einem eigenen Fehler aus und wiederholte daraufhin die Kalibrierung, was allerdings zum gleichen Ergebnis führte. Erst beim dritten Kalibrierungsversuch wurde die ungewöhnliche Interaktion entdeckt und konnte durch eine erneute Einweisung des Probanden abgestellt werden, so dass im vierten Anlauf der Touchscreen erfolgreich kalibriert werden konnte.

Die computergestützte Analyse der Biomechanik bei der Touchscreeninteraktion (vgl. Abschnitt 4.4) beschränkte sich allein auf Haltungsarbeit und vernachlässigte damit die dynamischen Interaktionsanteile. Die in der Vorstudie zur Biomechanik beobachtete Überbeanspruchung der Muskulatur des Hand-Arm-Systems (vgl. Unterabschnitt 4.3.3) kann eine Auswirkungen der dynamischen Interaktionsanteile der Touchscreeninteraktion sein. Um dieser Vermutung nachzugehen, wurde eine zusätzliche Studie zur Biomechanik bei der Touchscreeninteraktion konzipiert und durchgeführt. Die theoretischen Grundlagen der Analyse der EMG-Signale (vgl. Unterabschnitt 4.5.1) basieren oft auf Untersuchungen der Beinmuskulatur, z. B. beim Radfahren. Der von Flynn et al. (2004) angeführte Schwellwert einer 15 %-igen Verringerung der mittleren EMG-Frequenz zur Feststellung der Muskelermüdung geht laut der im Artikel angeführten Referenz auf Ament et al. (1993) zurück. Allerdings sprechen Ament et al. (1993) nicht von der mittleren Frequenz, sondern von der Medianfrequenz. Je nach Verteilung einer Stichprobe unterscheiden sich die beiden Werte voneinander, aber beide Werte sind geeignete Variablen zur Feststellung der Muskelermüdung (Phinyomark et al. 2012).

Obwohl bereits in der Studie von Shin & Zhu (2011) der Nachweis zum Einfluss der Interaktionsdauer auf das EMG-Signal offen geblieben war, wurde eine ähnliche Studie konzipiert und durchgeführt. Die Gründe hierfür lagen in der kritischen Betrachtung dieser Studie. Als Ursachen für den ausgebliebenen Nachweis der Muskelermüdung wurden folgende Schwachpunkte der Studie von Shin & Zhu (2011) in Betracht gezogen:

1. Ableitung des EMG-Signals von nicht an der Interaktion beteiligten Muskeln
2. mittlere normalisierte Muskelaktivität ungeeignet, um muskuläre Ermüdung festzustellen
3. mit 15 Minuten zu kurze Versuchsdauer
4. Versuchsdesign lässt auf mehrere Unterbrechungen schließen, die eine unerwünschte Erholung der Muskulatur ermöglichen

Die Auswahl der Muskeln zur Ableitung des EMG-Signals ist in Shin & Zhu (2011) nicht begründet. Im Theorieteil des Artikels wird lediglich die Schulter- und Nackenmuskulatur allgemein als kritischer Bereich für die Touchscreeninteraktion genannt. Die Auswahl des oberen Trapez- und der Halsstreckmuskeln erfolgt von Shin & Zhu

(2011) ohne weitere Begründung oder Konkretisierung. Dieser Missstand konnte durch die eigens durchgeführte Vorstudie (vgl. Abschnitt 4.3) sowie die computergestützte Analyse der Biomechanik (vgl. Abschnitt 4.4) behoben werden. Zur Nutzung der mittleren normalisierten Muskelaktivität für die Feststellung des Ermüdungszustandes der Muskulatur finden sich in der Literatur ambivalente Aussagen. So sagen Basmajian & De Luca (1985), Freiwald et al. (2007) und Kamen & Gabriel (2010) für submaximale Kontraktionen eine steigende Amplitude bei zunehmender Ermüdung durch die Rekrutierung zusätzlicher motorischer Einheiten voraus. Im Gegensatz dazu verweisen Viitasalo & Komi (1977), Kupa et al. (1995) und Merletti et al. (2002) auf eine Abnahme der Amplitude, da beim Einsetzen der Ermüdung bereits alle motorischen Einheiten aktiviert wurden und somit eine Verringerung der Muskelkraft eine Verringerung der Amplitude zur Folge haben muss. In der eigenen Studie wurde die normalisierte Muskelaktivität lediglich erfasst, um einen Vergleich zu Shin & Zhu (2011) ziehen zu können. Die Ermüdung der Muskulatur wurde hingegen über die mittlere Frequenz des EMG-Signals operationalisiert. Dieses Verfahren ist bisher unumstritten (vgl. Unterabschnitt 4.5.2). Die Versuchsdauer des eigenen Versuchs wurde im Vergleich zur Studie von Shin & Zhu (2011) etwas verlängert und Unterbrechungen, die zur Erholung der Muskulatur führen könnten, wurden vermieden. Dennoch führte auch die systematische Vermeidung dieser identifizierten Schwachpunkte nicht zu einem objektiven Nachweis der Muskelermüdung bei der Touchscreeninteraktion.

Das objektive Ergebnis dieser Studie steht im Widerspruch zu dem subjektiven Empfindungen der Probanden dieser und anderer Studien zur Biomechanik bei der Touchscreeninteraktion. Sollte die Ursache für diese subjektiven Empfindungen tatsächlich die Muskelermüdung sein, ist kritisch zu hinterfragen, ob die Operationalisierung der Ermüdung durch die Frequenzeigenschaften des EMG-Signals bei den niedrigen Kontraktionswerten der Touchscreeninteraktion geeignet war. Dazu fanden sich in der entsprechenden Fachliteratur keine Hinweise.

#### 4.5.5 Schlussfolgerung

Die empirische Studie zur Biomechanik lieferte trotz systematischem und sorgfältigem Vorgehen nicht die erforderlichen Ergebnisse zur Beantwortung der Forschungsfragen 4 (Verändert sich die Interaktion durch die touchscreeninduzierte Ermüdung des Hand-Arm-Systems?) und 5 (Können aus der touchscreeninduzierten Ermüdung des Hand-Arm-Systems Empfehlungen für die Dauer der Touchscreeninteraktion und der notwendigen Erholungspausen abgeleitet werden?). So konnte mit Ausnahme eines signifikanten Effekts auf die mittlere Frequenz der elektromyografisch erfassten

Muskelaktivität nach einer Versuchsdauer von 20 Minuten keine weiteren Hinweise auf eine touchscreeninduzierte Ermüdung des Hand-Arm-Systems gefunden werden. Da nach ca. 30 Minuten ununterbrochener Touchscreeninteraktion weder anhand der Frequenzanalyse noch auf Basis der normalisierten Muskelaktivität Anzeichen auf eine Ermüdung der beiden untersuchten Muskeln gefunden werden konnten, bleiben die Forschungsfragen 4 und 5 unbeantwortet. An dieser Stelle kann lediglich auf die normativen Vorgaben der DIN EN ISO 9241-420 verwiesen werden.

## 4.6 Einfluss haptischer Rückmeldungen auf die Interaktion

Durch die Untersuchung zur haptischen Rückmeldung sollte geklärt werden, ob sich die Interaktion mit Touchscreensystemen durch eine künstliche haptische Rückmeldung verbessern lässt (vgl. Unterabschnitt 2.4.6). Der Versuch, von Immersion (2012) einen entsprechend ausgerüsteten Touchscreen zu beziehen, schlug leider fehl. Weder die Anfragen an den Vertrieb noch die Nachrichten über die sozialen Medien wurden beantwortet. Die Firma Immersion war zum Zeitpunkt der Arbeit der einzige kommerzielle Anbieter von Touchscreens mit haptischer Rückmeldung (vgl. Abschnitt 3.3). Die Grundlage für eine empirische Untersuchung bot schließlich eine Kooperation mit der Firma Continental Automotive GmbH, die den Prototyp eines Touchpads entwickelt hatte, der auf Basis einer eindimensional angeregten Masse haptische Rückmeldungen ermöglicht. Aus dieser Zusammenarbeit ergab sich die Festlegung auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion als Anwendungsbeispiel. Die Ergebnisse der Studie wurden bereits in Domhardt et al. (2013) veröffentlicht.

### 4.6.1 Hintergrund

Hintergrund der Studie ist die primäre Fixierung der Touchscreeninteraktion auf die visuelle Wahrnehmung. Ist die visuelle Wahrnehmung nicht möglich, z. B. durch Blindheit, oder bereits anderweitig ausgelastet, z. B. beim Autofahren, wird die Interaktion mit einem Touchscreensystem stark erschwert (Bornschein et al. 2013). Daher existieren verschiedene Ansätze, die nichtvisuelle Perzeption (vgl. Unterabschnitt 2.5.1) und damit die Zugänglichkeit von Touchscreensystemen zu verbessern. Eine Realisierungsmöglichkeit der Blindbedienbarkeit von Touchscreens ist die sogenannte „Virtual-Button-Methode“, bei der die Anzeige in eine regelmäßige

Anordnung von Schaltflächen unterteilt wird (Bauer & Ebert 2015). Alternativen dazu sind Multitouch-Gesten, bei denen keine genaue Positionierung der Finger auf dem Touchscreen erforderlich ist (Wu & Balakrishnan 2003, Bragdon et al. 2011) oder die Nutzung des Touchscreenrahmens zur Positionierung der Finger (Roth & Turner 2009). Doch bereits die Arbeiten von Geldard (1960) und Hill & Grieb (1988) zeigen, dass die Idee zur Nutzung künstlich erzeugter Rückmeldungen bei interaktiven Systemen nicht neu ist. So wurde die auditive Wahrnehmung von Vanderheiden (1996) in der „Talking Fingertip Technique“ dazu benutzt, dem Benutzer eines touchscreenbasierten Kiosksystems eine Beschreibung des auf dem Touchscreen berührten Elements vorzulesen. Mittlerweile sind sogenannte Text-To-Speech-Systeme (TTS) ein fester Bestandteil von Softwareplattformen mit integrierter Touchscreenunterstützung (vgl. Abschnitt 3.4). Zusätzlich zur auditiven Wahrnehmung wurde von Hill & Grieb (1988) mit „Touch 'n Talk“ eine zusätzliche Schicht mit fühlbaren Unebenheiten auf dem Touchscreen angebracht und so eine statische taktile Rückmeldung realisiert. Einen vergleichbaren Ansatz verfolgten Landau & Wells (2003) mit dem „Talking Tactile Tablet“. Bei beiden Systemen wurde die haptische Wahrnehmung als Rückmeldungs-kanal genutzt aber dabei durch die prinzipbedingt feste Anordnung der Unebenheiten auf der zusätzlichen Schicht ein entscheidender Vorteil des Touchscreens aufgehoben: Die grafische Oberfläche ist nicht mehr frei konfigurierbar, sondern muss sich an dem vorhandenen Raster der taktilen Schicht orientieren. Zudem sind Interaktionsformen wie Wischen und Ziehen sowie die Mehrfingergersten durch die unebene Oberfläche nicht möglich. Eine Rückmeldung über eine erfolgte Eingabe kann bei den beschriebenen Systemen lediglich visuell oder auditiv erfolgen. Durch die Nutzung einer künstlichen haptischen Rückmeldung auf elektromechanischer Basis können diese Nachteile vermieden werden (vgl. Abschnitt 3.3). Damit bleiben die grafische Benutzungsschnittstelle frei gestaltbar und Interaktionsformen mit größerem Flächenbedarf als eine Tippeingabe ausführbar.

Ein möglicher Anwendungsfall einer solchen künstlichen haptischen Rückmeldung ist die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion mit touchbasierten Systemen, da dort der visuelle Kanal hauptsächlich durch die Fahrzeugführung beansprucht wird (Blattner et al. 2012b, Blattner et al. 2012a, Pitts et al. 2012b, Pitts et al. 2012c).

Während traditionelle mechanische Schalter, Taster oder Drehknöpfe prinzipbedingt eine taktile Rückmeldung aufweisen, fehlt diese bei herkömmlichen Touchscreens (Burnett & Porter 2001, Choi & Kuchenbecker 2012, Xu & Bailey 2013). Pitts et al. (2012a) konnten feststellen, dass während der touchscreenbasierten Fahrer-Fahrzeug-Interaktion der Blick zu 70 % der Zeit nicht auf die Straße gerichtet war. Die Touchscreeninteraktion stellt in diesem wie in den meisten Anwendungsfällen eine

Nebenaufgabe dar (vgl. Abschnitt 4.2). Das Ziel der Studie war die Beurteilung des Einflusses der haptischen Rückmeldung auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion.

### 4.6.2 Vorgehen

Um den Einfluss einer haptischen Rückmeldung auf die Interaktion wissenschaftlich beurteilen zu können, wurde ein Laborversuch im Fahrsimulator konzipiert. Parallel zur Fahraufgabe waren Nebenaufgaben mit dem haptischen Touchpad zu absolvieren. Um eine Veränderung der Interaktionsleistung der Probanden zu ermitteln, wurden Messwiederholungen mit abhängiger Stichprobe (Within-Subjects Design, vgl. Keren 1993) als Untersuchungsart gewählt. Dieses Versuchsdesign ermöglichte eine Normalisierung der intrapersonellen Änderungen. Durch den Einsatz der künstlichen haptischen Rückmeldung wurden eine Verringerung der Ablenkung des Fahrers sowie eine Verbesserung der Effektivität und Effizienz bei der Erledigung der Nebenaufgaben erwartet. Als Entscheidungsgrundlage wurden folgende korrespondierende Hypothesenpaare formuliert:

$H_{10}$  Die Ablenkung von der Hauptaufgabe ist mit haptischer Rückmeldung höher oder gleich als ohne haptische Rückmeldung.

$H_{11}$  Die Ablenkung von der Hauptaufgabe ist mit haptischer Rückmeldung geringer als ohne haptische Rückmeldung.

$H_{20}$  Die Effizienz bei der Erledigung der Nebenaufgaben ist mit haptischer Rückmeldung geringer oder gleich als ohne haptische Rückmeldung.

$H_{21}$  Die Effizienz bei der Erledigung der Nebenaufgaben ist mit haptischer Rückmeldung höher als ohne haptische Rückmeldung.

Das Signifikanzniveau wurde mit den für nutzerbasierte Laboruntersuchungen üblichen  $\alpha = 0,05$  festgelegt (Bortz & Döring 2006, Eid et al. 2011). Entsprechend der Hypothesenanzahl ergibt sich eine Korrektur nach der Bonferroni-Methode (Dunn 1961) ein korrigiertes Signifikanzniveau von  $\alpha_{\text{korr}} = 0,025$ .

Die unabhängige Variable stellt die dichotome Ausprägung der haptischen Rückmeldung dar: Es war möglich, diese zu aktivieren oder diese abzuschalten. Die abhängigen Variablen ergeben sich aus den Hypothesen und wurden wie folgt operationalisiert:

**Ablenkung:** Fahrleistung und Blickzuwendung

**Effizienz:** Fehlerrate und Dauer der Nebenaufgabe

Aus der Operationalisierung resultierten die Messwerte, die während des Versuchs erfasst wurden. Die Fahrleistung in der Hauptaufgabe ergab sich nach dem standardisierten Lane Change Test (LCT) entsprechend ISO 26022 aus der gemittelten Spurabweichung beim Fahren mit gleichzeitiger Bewältigung von Nebenaufgaben von der individuellen Solltrajektorie aus einer Referenzfahrt. Zur Ermittlung der Blickzuwendung wurde je ein Video vom Gesicht des Fahrers aus der Richtung des Lenkrades und aus der Richtung der Mittelkonsole aufgezeichnet, so dass mittels Videoanalyse die Aufteilung der Blickzuwendung zwischen Straße (Hauptaufgabe) und Nebenaufgabe ermittelt werden konnte. Die Erfassung der Fehlerrate und Dauer der Nebenaufgabe wurde über die Aufzeichnung von Logfiles der Nebenaufgaben realisiert, wobei die Logfiles eine Auflistung aller Nutzerinteraktionen mit Zeitstempel enthielten. Zur Beschreibung der Stichprobe wurden demografische Daten sowie Fahrpraxis pro Jahr und die Technikaffinität der Probanden nach Karrer et al. (2009) erfasst.

Die Erfassung der demografischen Daten der Probanden fand durch eine Befragung mit Hilfe der Online-Umfrage-Software LimeSurvey (The LimeSurvey Project Team 2013) statt. Neben Fragen zu Geschlecht und Alter wurde der Besitz einer Fahrerlaubnis (geschlossene Frage) sowie die jährliche Fahrpraxis (offene Frage) und die Händigkeit nach Oldfield (1971) abgefragt. Die Aufgabe der Fahrzeugführung wurde durch eine Spurwechselaufgabe nach ISO 26022 im Fahrsimulator realisiert. Die dazu notwendige Software wurde von Mattes (2003) zur Verfügung gestellt. Abbildung 4.33 zeigt ein Beispiel der Außenansicht, bei der der Proband gemäß den Schildern in die rechte Spur wechseln soll.

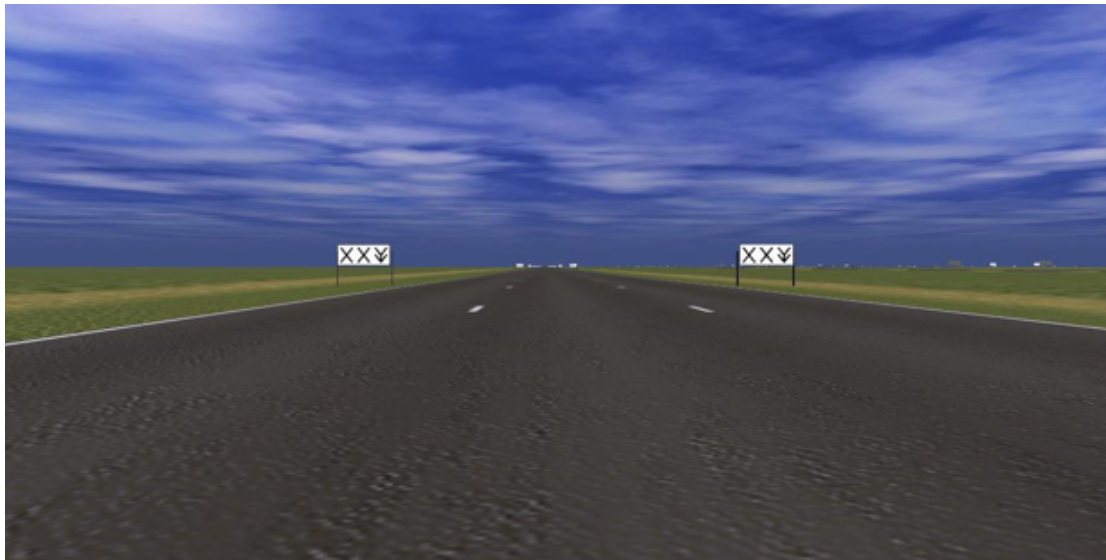


Abbildung 4.33: Fahrsimulation der Spurwechselaufgabe nach ISO 26022

Ein Prototyp des haptischen Touchpads wurde zusammen mit der Software zur Durchführung und Aufzeichnung von Nebenaufgaben von der Firma Continental zur Verfügung gestellt. Der bereits verbaute Prototyp ist in Abbildung 4.34 abgebildet.



Abbildung 4.34: Kapazitives Touchpad mit elektromechanischer haptischer Rückmeldung

Zur Integration des Prototyps in den vorhandenen Fahrsimulator musste zuerst eine höhen- und längsverstellbare Armlehne konstruiert und gefertigt werden. Für das haptische Touchpad wurde nach einem CAD-Modell eine passende Aufnahme in der Verlängerung der Armauflage geschaffen. Ein CAD-Rendering ist in Abbildung 4.35 zu sehen.



Abbildung 4.35: CAD-Rendering der Höhen- und längsverstellbaren Armlehne beim 95. Perzentil männlich

Es wurde eine stufenlose Längsverstellung und eine Höhenverstellung in neun Stufen realisiert, welche die Benutzung des haptischen Touchpads für Personen vom 5. Perzentil weiblich (Abbildung 4.36a) bis zum 95. Perzentil männlich (Abbildung 4.36b) ermöglichte.





(a) niedrige Position



(b) hohe Position

Abbildung 4.36: Höhen- und längsverstellbare Armlehne im Fahrsimulator

Die zum Touchpad zugehörige grafische Benutzungsschnittstelle stellte im Ausgangszustand auf einem kleinen Bildschirm in der Mittelkonsole das Hauptmenü dar (Abbildung 4.37a) und ermöglichte im Untermenü „Control“ vier unterschiedliche fahrzeugtypische Nebenaufgaben. Es war jeweils das Betätigen der Heckscheibenheizung (Rear Defrost), der Frontscheibenheizung (Front Defrost), der Umluft (Air-Circulation) und der Klimaanlage (A/C) möglich (Abbildung 4.37b).



(a) Hauptmenü (Home)



(b) Control

Abbildung 4.37: Grafische Benutzungsschnittstelle der Software zum haptischen Touchpad

Die direkte Versuchsumgebung für den Fahrversuch umfasste das Fahrzeug-Mock-up mit Fahrersitz, Pedalerie und Lenkrad, das haptische Touchpad in der Mittelarmlehne sowie einen Bildschirm in der Mittelkonsole (Abbildung 4.38). Zur Beobachtung des Versuchs kamen drei Kameras zum Einsatz. Eine Kamera erfasste die seitliche Totale und je eine weitere Kamera diente zur Erfassung des Gesichts aus Fahrt- und Bildschirmrichtung. Zum Betrieb des Versuchsaufbaus waren drei vernetzte

Computer (Fahrsimulator, Nebenaufgabe und Datenaufzeichnung) notwendig, die über einen netzwerkinternen Zeitserver synchronisiert wurden. Eine schematische Darstellung des gesamten Versuchsaufbaus ist in Abbildung 4.39 zu sehen.



Abbildung 4.38: Versuchspersonenplatz der Studie

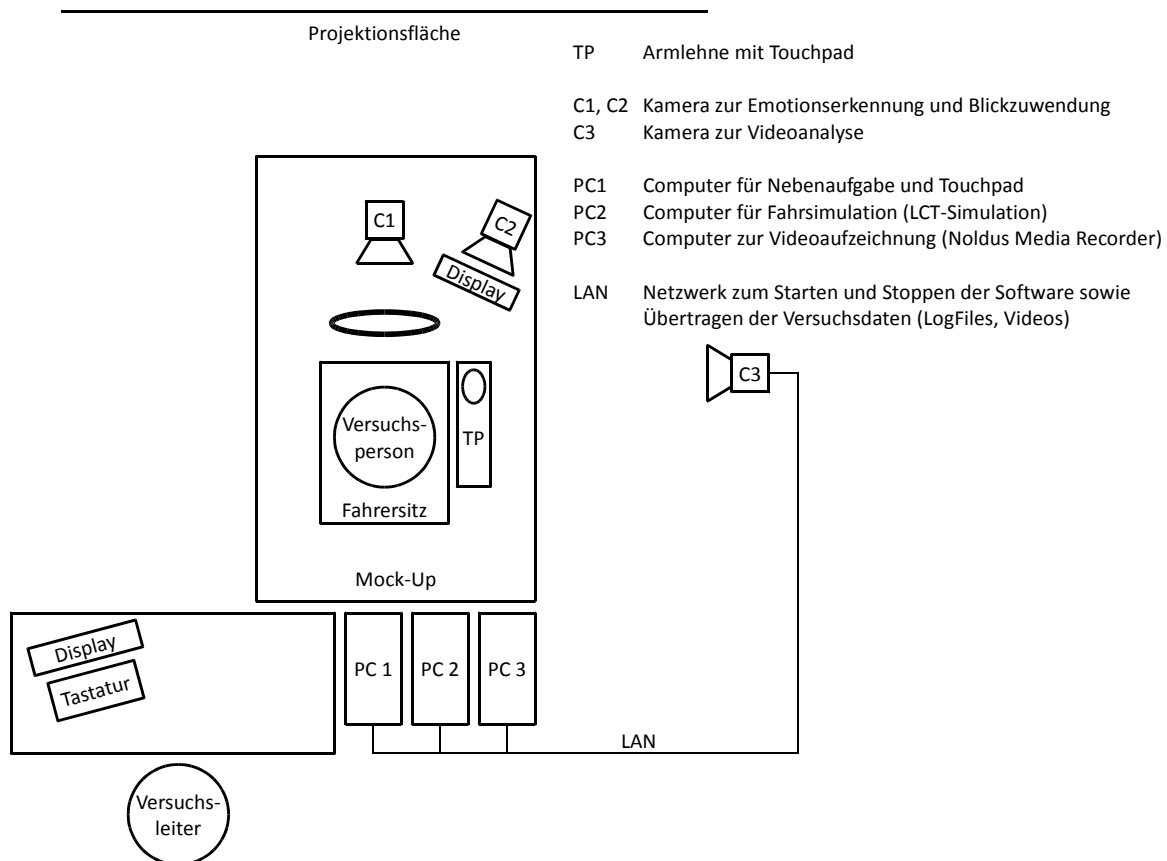


Abbildung 4.39: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Im Rahmen der Versuchsauswertung wurden zuerst die erhobenen Versuchsdaten aus den verschiedenen Datenquellen zusammengeführt und anschließend statistisch ausgewertet. Die Hypothesenprüfung erfolgte anhand von geeigneten Signifikanztests. Die statistische Auswertung wurde mit Hilfe der Software RStudio Desktop in der Version 0.99.485 durchgeführt (RStudio 2015).

Die Technikaffinität nach Karrer et al. (2009) umfasst vier Subskalen: Begeisterung für Technik, Kompetenz im Umgang mit Technik, positive Technikfolgen und negative Technikfolgen. Items mit einem negativen Einfluss auf die Technikaffinität wurden gemäß der standardisierten Auswertung gepolt, so dass auf jeder Skala Werte zwischen eins (geringe Technikaffinität) und fünf (hohe Technikaffinität) erreichbar waren. Die Auswertung der Fragen Händigkeit folgte den Vorgaben des Standardfragebogens gemäß Oldfield (1971). Die Fahrleistung ergab sich nach ISO 26022 aus der gemittelten Spurabweichung beim Fahren mit gleichzeitiger Bewältigung von Nebenaufgaben von der individuellen Solltrajektorie aus der Referenzfahrt. Zur Ermittlung der Blickzuwendung je Nebenaufgabe wurden die beiden Videoaufnahmen von vorn und aus Richtung der Mittelkonsole mittels Noldus Observer mit dem Logfile der Nebenaufgabe synchronisiert und anschließend das Blickverhalten des Probanden kodiert. Die Effizienz wurde anhand der Fehlerrate und der aktiven Interaktionsdauer bis zum Tastendruck ermittelt. Dazu wurde die Interaktion im Menü „Control“ ausgewertet, da dort ein Fehler ohne weitere Folgen blieb und kein Zurückspringen ins Hauptmenü nötig war. Als Fehler wurde jede Betätigung einer falschen Taste gewertet. Die aufsummierten Fehler wurden zur Berechnung der Fehlerrate mit der Gesamtanzahl der Tastenbetätigungen ins Verhältnis gesetzt. Die Dauer der Nebenaufgabe umfasste den Zeitraum vom Wechsel ins Menü „Control“ bis zur Betätigung der korrekten Taste.

Die Grundgesamtheit umfasste alle Inhaber einer Fahrerlaubnis. Daraus resultierte eine normale oder zumindest korrigierte Sehfähigkeit der potenziellen Probanden. Zur Rekrutierung der Probanden wurden mehrere Maßnahmen getroffen. Um die breite Öffentlichkeit anzusprechen, wurde eine Presseerklärung über die Lokalpresse (Dilling 2013) sowie das Regionalmanagement Nordhessen verbreitet. Die Erstellung des dazu notwendigen Bildmaterials erfolgte durch einen kommerziellen Fotografen. Der Aufruf wurde zusätzlich in Form von Flyern an einer nahen Tankstelle, dem ADAC Reise- & Servicecenter Kassel und dem TÜV-Service-Center Kassel ausgelegt. Die elektronischen Verbreitungswege des Aufrufs umfassten die Internetauftritte des Fachgebiets und der Universität sowie das offizielle Facebook-Profil der Universität. Zusätzlich wurde der Aufruf über den offiziellen Mailverteiler der Bürgeruniversität verteilt, so dass Uniinteressierte und Gasthörer erreicht wurden. Zur Motivation potentieller Versuchsteilnehmer wurde die Verlosung von drei Buchgutscheinen in Höhe von jeweils 20 Euro angekündigt.

Die potentiellen Versuchsteilnehmer wurden zu einer Onlinebefragung geleitet, in der Kontaktdaten, demografische Daten, der Besitz einer Fahrerlaubnis sowie die jährliche Fahrpraxis, die Händigkeit nach Oldfield (1971) und die Technikaffinität nach Karrer et al. (2009) abgefragt wurden. Insgesamt haben 54 Personen die Befragung begonnen, von denen 39 die Befragung vollständig absolvierten. Die 39 Teilnehmer wurden per E-Mail oder Telefon zur Versuchsteilnahme eingeladen. Die Terminvergabe erfolgte bei der Einladung per E-Mail über Doodle (Doodle 2013) und per Telefon mittels Absprache, so dass jeder Proband seinen Wunschtermin aus insgesamt 48 Terminalalternativen aussuchen konnte. Die Termine lagen an mehreren Tagen jeweils zwischen 14 und 20 Uhr, so dass auch Berufstätige am Versuch teilnehmen konnten. Da die Versuche in die Urlaubszeit fielen, war die Teilnahme nicht für alle eingeladenen Versuchspersonen möglich. Insgesamt kamen 32 Versuchstermine zustande.

In einem Pretest wurden Versuchsaufbau, Versuchsablauf und Datenaufzeichnung anhand von Testprobanden unter realen Versuchsbedingungen geprüft. Dabei wurden letzte Probleme und Unstimmigkeiten beim Ablauf erkannt und behoben. Die Dauer des Versuchs mit einem Proband wurde mit ca. 20 Minuten ermittelt. Außerdem konnten das Inbetriebnahmeprotokoll für den Versuchsaufbau (Anhang I) und das Ablaufprotokoll (Anhang K), anhand derer der Versuchsleiter den jeweiligen Proband durch den Versuch führte, finalisiert werden. Zusätzlich wurde eine leicht verständliche Versuchspersonenerklärung (Anhang J) verfasst, um die Probanden standardisiert über Ethik und Datenschutz aufklären zu können.

Bei der Versuchsdurchführung wurde zur Vermeidung von Versuchsleiterartefakten und zur Sicherstellung eines einheitlichen Umgangs mit den Probanden auf ein striktes Vorgehen gemäß Ablaufprotokoll geachtet. Die Durchführung des Versuchs dauerte im Schnitt je Proband eine halbe Stunde. Zur Begrüßung des Teilnehmers wurde die schriftliche Versuchspersonenerklärung ausgehändigt. Fahrersitz, Mittelarmlehne und Kameras wurden auf die Körpermaße des Probanden eingestellt. Nach dem Start der Videoaufzeichnung fand eine Übungsrunde mit dem Fahrsimulator statt. Dabei wurden die Probanden bereits mit der Spurwechselaufgabe konfrontiert, bei der sie eine quasirandomisierte Spurwechselfolge möglichst präzise absolvieren mussten. Es folgte die Einführung des Probanden in die Interaktion mit dem haptischen Touchpad und der grafischen Benutzungsschnittstelle. Dazu wurde der Proband aufgefordert, die Funktionen des Touchpads auszuprobieren. Die Menüs und Schaltflächen wurden vom Versuchsleiter erklärt.

Nachdem offene Fragen geklärt waren, wurde die Referenzfahrt der Spurwechselaufgabe (vgl. ISO 26022) durchgeführt. Direkt im Anschluss folgten die beiden Fahrten, bei denen mit dem Touchpad Nebenaufgaben zu bewältigen waren. Die Nebenaufgaben umfassten jeweils drei Interaktionsschritte, die mit dem Touchpad durchgeführt wurden: Zuerst musste vom Hauptmenü aus vier Möglichkeiten das

Untermenü Control (vgl. Abbildung 4.37a auf S. 180) gewählt werden. In diesem Untermenü war je nach Anweisung des Versuchsleiters eine von vier Schaltflächen zu betätigen (vgl. Abbildung 4.37b auf S. 180).

1. Betätigen der Heckscheibenheizung
2. Betätigen der Frontscheibenheizung
3. Betätigen der Umluft
4. Betätigen der Klimaanlage

Die Anweisungen wurden dem Probanden während des Versuchs einzeln vorgelesen. Der letzte Interaktionsschritt umfasste das Betätigen einer dedizierten Taste, die zurück ins Hauptmenü führte. Nach Abschluss einer Aufgabe bekam der Proband unverzüglich die nächste Aufgabe mitgeteilt.

In Abhängigkeit einer geraden oder ungeraden Probandennummer wurde entweder der erste oder der zweite Fahrdurchgang mit Nebenaufgaben mit elektromechanischer haptischer Rückmeldung durchgeführt. Die jeweils andere Fahrt fand ohne haptische Rückmeldung statt. Der vollständige Versuchsplan mit den Aufgaben entsprechend den Tasten im Menü Control ist in Tabelle 4.8 dargestellt.

Tabelle 4.8: Versuchsplan mit Zustand der elektromechanischen haptischen Rückmeldung

Probandennummer	Aufgabenreihenfolge	1. Fahrt	2. Fahrt
1, 7, 13, 19, 25, 31	1234 2431 3241 4231	ein	aus
2, 8, 14, 20, 26, 32	2413 3142 4213 1243	aus	ein
3, 9, 15, 21, 27	3421 4321 1324 2314	ein	aus
4, 10, 16, 22, 28	4123 1423 2134 3214	aus	ein
5, 11, 17, 23, 29	1342 2143 3412 4312	ein	aus
6, 12, 18, 24, 30	2341 3124 4132 1432	aus	ein

### 4.6.3 Ergebnisse

Die Stichprobe bestand aus 20 männlichen und 12 weiblichen Probanden. Das Durchschnittsalter lag bei  $41,6 \pm 18,8$  Jahren (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung). Die detaillierte Altersverteilung ist im Diagramm in Abbildung 4.40 dargestellt. Die Fahrpraxis der Stichprobe beträgt im Mittel 13 Tkm pro Jahr (Standardabweichung: 11 Tkm pro Jahr). Die erfragte Technikaffinität der Stichprobe nach Karrer et al. (2009) ist in Abbildung 4.41 abgebildet. Auf den Subskalen der Technikaffinität konnten Werte zwischen 1 und 5 erreicht werden. Da in allen Subskalen der Technikaffinität

drei Viertel der Probanden oberhalb der Skalenmitte liegen, kann laut persönlicher Rücksprache mit der Autorin des Standardfragebogens von einer überdurchschnittlich technikaffinen Stichprobe ausgegangen werden. Die Auswertung des Edinburgh Inventory nach Oldfield (1971) ergab 1 Links- und 31 Rechtshänder.

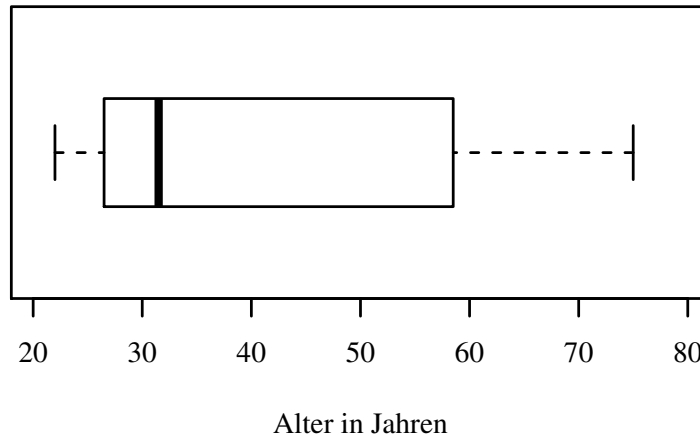


Abbildung 4.40: Altersverteilung der Stichprobe ( $n = 32$ )

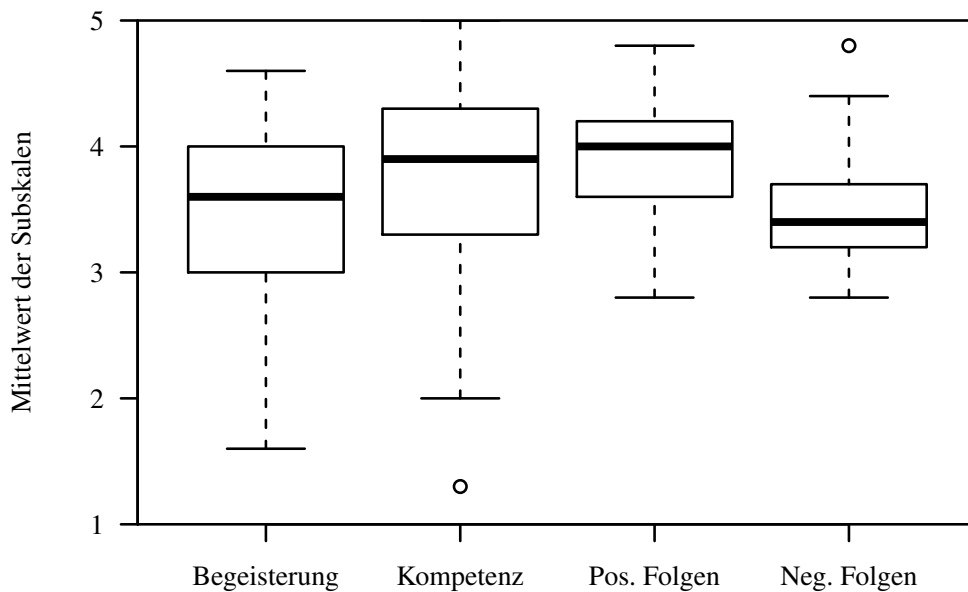
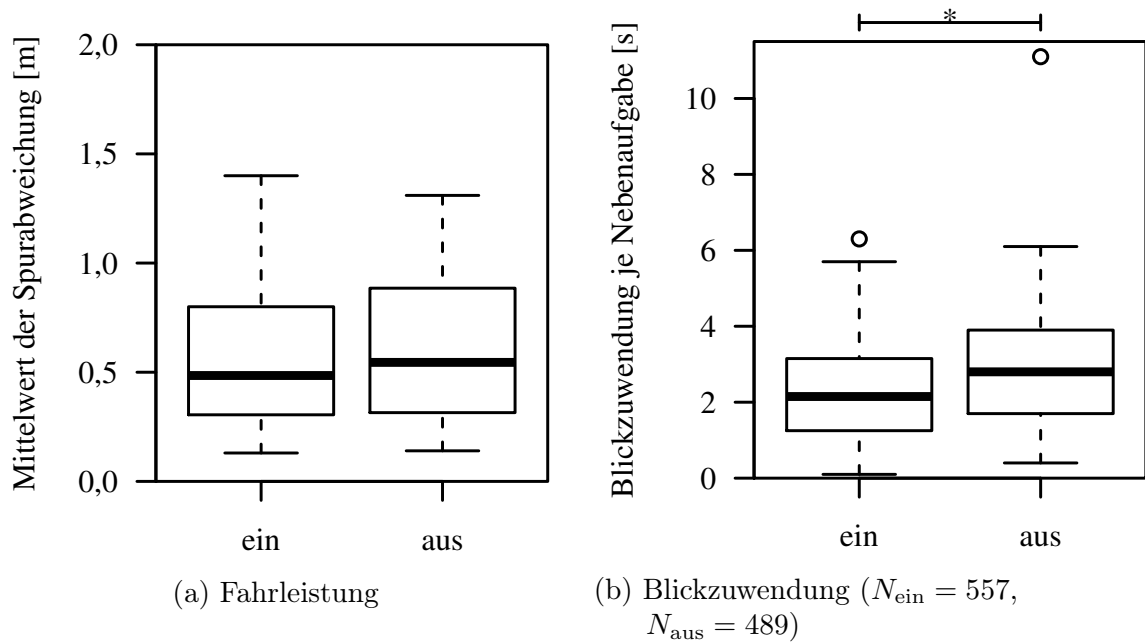


Abbildung 4.41: Technikaffinität der Stichprobe ( $n = 32$ )

Die Ablenkung von der Fahraufgabe wurde einerseits anhand der gemittelten Spurabweichung beim Fahren mit gleichzeitiger Bewältigung von Nebenaufgaben von der individuellen Solltrajektorie aus der Referenzfahrt (Abbildung 4.42a) und aus der Blickzuwendung zur Nebenaufgabe (Abbildung 4.42b) ermittelt.

Abbildung 4.42: Ablenkung nach Zustand der haptischen Rückmeldung ( $n = 32$ )

Da aufgrund der Stichprobeneigenschaften keine Normalverteilung angenommen werden konnte (Shapiro-Wilk-Test;  $W_{\text{krit}} = 0,966$ ;  $N = 32$ ; aktive haptische Rückmeldung:  $p = 0,000$ ;  $W = 0,866$ ; deaktivierte haptische Rückmeldung:  $p = 0,007$ ;  $W = 0,901$ ), wurde zur Hypothesenprüfung ein einseitiger Wilcoxon-Vorzeichen-Rangsummentest durchgeführt. Dieser ergab für die Fahrleistung keinen signifikanten Unterschied ( $p = 0,337$ ,  $|Z| = 0,430$ ,  $N = 32$ ). Die Auswertung der Blickzuwendung bezieht sich auf 557 absolvierte Nebenaufgaben mit aktivierter haptischer Rückmeldung und 489 absolvierte Nebenaufgaben mit abgeschalteter haptischer Rückmeldung. Der signifikante Unterschied der Blickzuwendung von 0,7 s zwischen diesen beiden Gruppen macht 29 % aus ( $p = 0,009$ ;  $|Z| = 2,356$ ;  $N = 32$ ). Die aktivierte haptische Rückmeldung verringert folglich signifikant die Fahrerablenkung. Auf Basis dieser Ergebnisse konnte die Nullhypothese  $H_{10}$  verworfen und Alternativhypothese  $H_{11}$  beibehalten werden.

Bei der Betrachtung der Effizienz zeigte sich für die Fehlerrate (Abbildung 4.43a) keine signifikante Verbesserung durch eine aktivierte haptische Rückmeldung ( $p = 0,232$ ;  $|Z| = 0,750$ ;  $N = 27$ ). Die Dauer zur Bewältigung einer Nebenaufgabe (Abbildung 4.43b) sank jedoch durch die aktivierte haptische Rückmeldung signifikant um 1,3 s bzw. 19 % ( $p = 0,017$ ;  $|Z| = 2,119$ ;  $N = 30$ ). Somit ist die Effizienz bei der Erledigung der Nebenaufgaben mit aktivierter haptischer Rückmeldung höher als ohne haptische Rückmeldung. Dieser Ergebnisse ermöglichten das Verwerfen der Nullhypothese  $H_{20}$  und das Beibehalten der Alternativhypothese  $H_{21}$ .

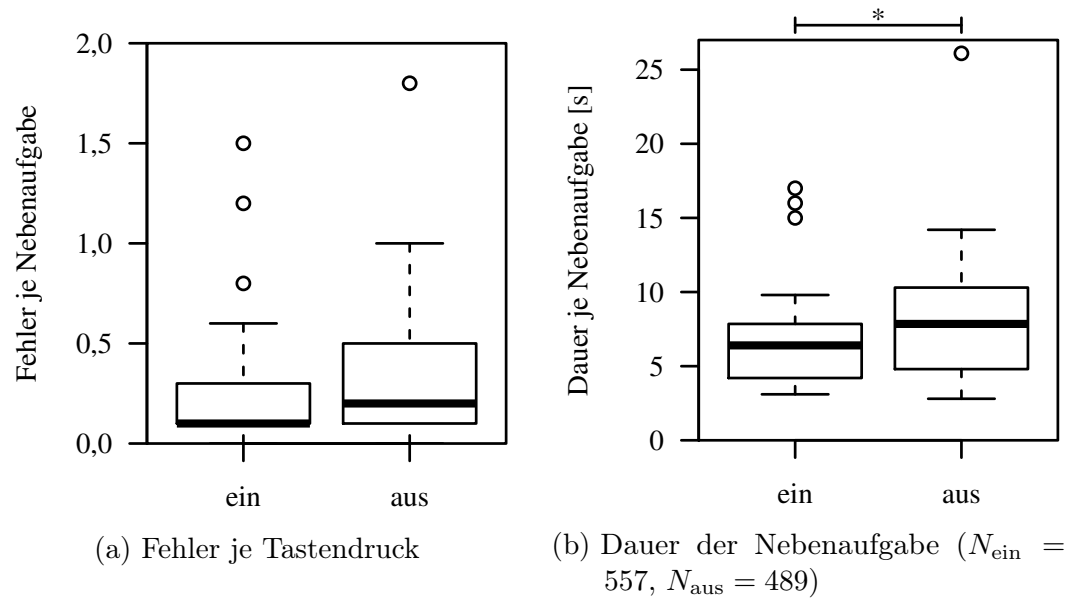


Abbildung 4.43: Effizienz der Aufgabenbearbeitung nach Zustand der haptischen Rückmeldung ( $n = 32$ )

Über die Prüfung der Hypothesen hinaus wurden die Daten explorativ ausgewertet. Um die Altersabhängigkeit der Ergebnisse abschätzen zu können, erfolgte eine Aufteilung der Stichprobe: Die jüngsten 40 % der Stichprobe bildeten die Gruppe der jungen Probanden ( $n = 13$ ; Durchschnittsalter = 25,2 Jahre); die Ältesten 40 % ergaben die Gruppe der älteren Probanden ( $n = 13$ ; Durchschnittsalter = 62,7 Jahre); dazwischen lagen die Probanden mittleren Alters ( $n = 6$ ). Bei der Gegenüberstellung der jungen und der älteren Probanden konnten für die Jungen eine 44 % bessere Fahrleistung ( $p < 0,01$ ), eine 33 % geringere Blickzuwendung während der Aufgabenbearbeitung ( $p < 0,01$ ), eine 38 % geringere Aufgabendauer ( $p < 0,01$ ) und eine 60 % geringere Fehlerrate ( $p < 0,01$ ) festgestellt werden. Das Alter der Probanden hatte demzufolge einen starken Einfluss auf die Fahrerablenkung und Effizienz.

Die nach ISO 26022 ermittelten Werte für die Fahrleistung fallen fast identisch zu Pitts et al. (2012b) aus, dessen Untersuchungsgegenstand ein Touchscreen mit elektromechanischer haptischer Rückmeldung war. Die Ergebnisse der Blickzuwendung zeigen, dass mit aktivierter elektromechanischer haptischer Rückmeldung die Ablenkungsdauer fast um ein Viertel reduziert werden kann. Die benötigte Dauer zur Bewältigung der Nebenaufgaben ist schlecht mit anderen Studien vergleichbar, da dieser Wert neben der Interaktionsleistung der Stichprobe zusätzlich von Art und Umfang der gestellten Nebenaufgaben sowie der Gestaltung der grafischen Benutzungsschnittstelle abhängig ist.



### 4.6.4 Diskussion

Im Rahmen der Studie zur haptischen Rückmeldung wurde versucht, den Standardfragebogen nach Karrer et al. (2009) dazu zu nutzen, um die Stichprobe in eine technikaffine und eine weniger technikaffine Gruppe einzuteilen. Auf persönliche Nachfrage bei der Autorin zu diesem Ansatz wurde eine pragmatische Dreiteilung der Subskalen (oberes, mittleres und unteres Drittel) vorgeschlagen, wobei die Probanden des oberen Drittels die technikaffine Gruppe und die Probanden des unteren Drittels die weniger technikaffine Gruppe bilden sollten. Durch die Aufteilung des abstrakten Konstrukts der „Technikaffinität“ auf vier Subskalen ist es jedoch kaum zu bewerkstelligen, dass ein Proband auf allen Subskalen im gleichen Drittel liegt. Eine Verrechnung der vier Subskalen zu einem Gesamtwert, der die gewünschte Aufteilung ermöglichen würde, ist laut persönlicher Auskunft der Autorin nicht möglich. Der Standardfragebogen zur Ermittlung der Technikaffinität nach Karrer et al. (2009) eignet sich damit lediglich zur Beschreibung der Stichprobe.

Obwohl in der Studie ein Touchpad statt eines Touchscreens genutzt wurde, waren die erreichten Ergebnisse nahezu identisch zu Studien, in denen ein entsprechend ausgestatteter Touchscreen zum Einsatz kam (vgl. Pitts et al. 2012b). Dies lässt auf eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Touchscreens mit haptischer Rückmeldung schließen. Zudem fand sowohl die eigene Studie als auch der Versuch von Pitts et al. (2012b) in einem unbewegten Fahrsimulator statt, so dass die Interaktion durch die fehlenden Vibrationen und Erschütterungen vergleichbar zur Interaktion mit herkömmlichen stationären Computersystemen sein dürfte. Lediglich die Sitzhaltung der Studien unterscheidet sich deutlich von anderen Anwendungsfeldern, wie z. B. Kassensystemen (vgl. Abschnitt 4.2).

### 4.6.5 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der durchgeführten Studie erlauben eine Aussage auf die Forschungsfrage 6 und liefern damit die Antwort, ob die Interaktion mit Touchscreensystemen durch haptische Rückmeldungen verbessert werden kann. Durch den direkten Vergleich zwischen der aktiven und deaktivierten haptischen Rückmeldung bei identischen Aufgaben konnte gezeigt werden, dass durch die künstliche haptische Rückmeldung sowohl die Dauer der Blickzuwendung als auch die Aufgabendauer signifikant geringer sind. Durch eine aktive haptische Rückmeldung lässt sich die Interaktion mit Touchscreensystemen verbessern. Werden Touchscreensysteme in Bereichen mit begrenzter visueller Aufmerksamkeit eingesetzt (z. B. Tesla Motors 2016), kann durch den Einsatz einer künstlichen haptischen Rückmeldung ein Stück der Sicherheit von physischen Schaltern und Tasten zurückgewonnen werden.

## 5 Zusammenfassung der Gestaltungsempfehlungen und Erprobung

Bereits frühzeitig konnte das erweiterte Modell eines Mensch-Maschine-Systems als geeignete Basis für Touchscreensysteme und Touchscreeninteraktion identifiziert werden (vgl. Abschnitt 2.2). Das daraus entstandene Basismodell für Touchscreensysteme (Abbildung 5.1) teilt sich in das Subsystem Mensch, die Benutzungsschnittstelle und das Subsystem Maschine und enthält alle charakteristischen Bestandteile eines Touchscreensystems. Diese Aufteilung ermöglichte die systematische Herleitung und Strukturierung touchscreenspezifischer Gestaltungsempfehlungen (GE).

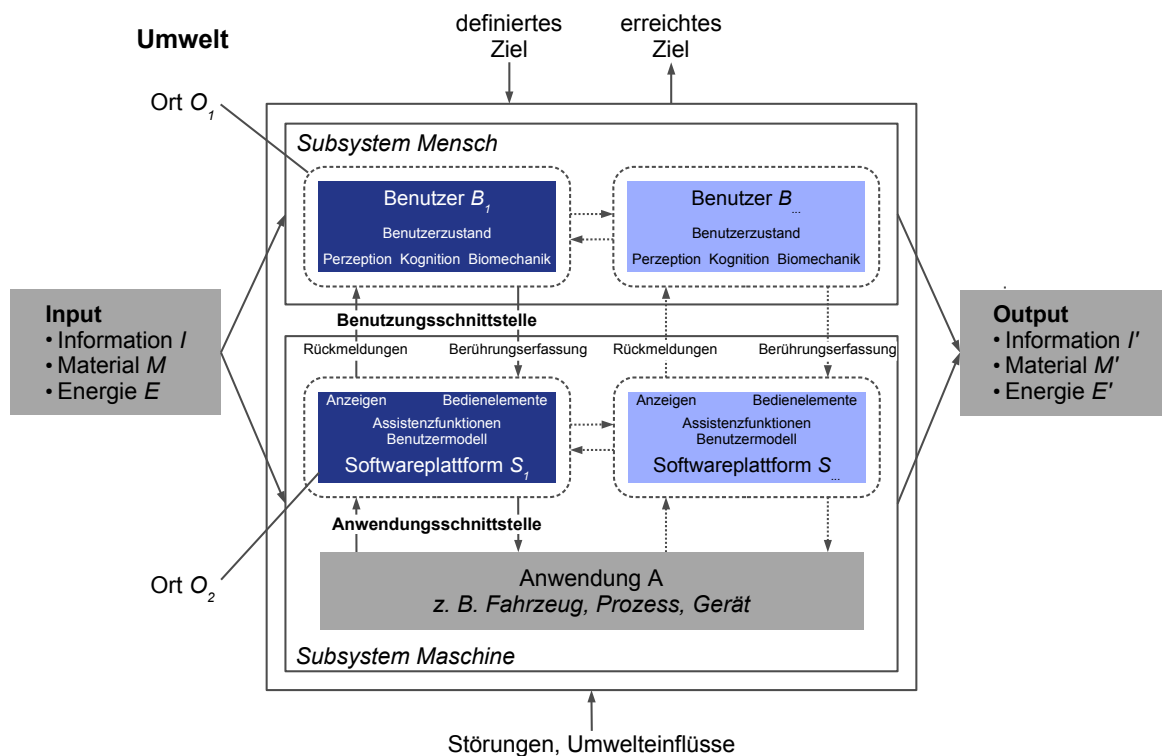


Abbildung 5.1: Basismodell für Touchscreensysteme

Die Herleitung der Gestaltungsempfehlungen beruhte auf den recherchierten theoretischen Grundlagen (TG, vgl. Kapitel 2), den Ergebnissen der Literaturanalyse der technologischen Realisierungsmöglichkeiten (LA, vgl. Kapitel 3) und den Erkenntnissen der empirischen Untersuchung der Touchscreeninteraktion (EU, vgl. Kapitel 4). Mit den Kürzeln TG, LA und EU wurde der Ursprung der jeweiligen Gestaltungsempfehlung kenntlich gemacht und damit eine Zuordnung zu den entsprechenden Kapiteln ermöglicht.

Die auf diesem Weg erarbeiteten Gestaltungsempfehlungen wurden anschließend dem Basismodell für Touchscreensysteme zugeordnet und in den menschenzentrierten Gestaltungsprozess (vgl. Unterabschnitt 2.6.1) integriert. Abschließend wurde die Verwendung der Gestaltungsempfehlungen an einem Praxisbeispiel erprobt.

### 5.1 Gestaltungsempfehlungen des Subsystems Mensch

Die Aspekte Perzeption, Kognition und Biomechanik des Subsystems Mensch wurden in den theoretischen Grundlagen erläutert (vgl. Abschnitt 2.5). Die für die Perzeption bei der Touchscreeninteraktion wichtigsten Sinnesmodalitäten sind die visuelle und die haptische Sinnesmodalität (vgl. Unterabschnitt 2.5.1). Nachgeordnet ist der auditive Sinneskanal.

Aus den allgemeingültigen theoretischen Grundlagen zur Leistungsfähigkeit der visuellen Wahrnehmung (vgl. Unterabschnitt 2.5.1) ergibt sich die optimale Visualisierung von schriftlichen Informationen bei Berücksichtigung des optimalen Schwinkels von ca. 20 Winkelminuten. Sollen Informationen farbcodiert werden, ist die Grenze des Farbsehens von  $\pm 15$  Grad zu berücksichtigen. Bei der Verwendung von Farben sollten schriftliche Informationen nicht in blau dargestellt werden. Je nach Benutzergruppe ist die alleinige Verwendung einer Farbcodierung durch die Farben rot und grün zu vermeiden.

Aus der Theorie lässt sich für die Wahrnehmung mit der Fingerkuppen ein Abstand von mindestens 2 mm für zwei unterscheidbare haptische Reize und eine Absolutschwelle für den Druck von  $0,31 \text{ mg mm}^{-2}$  ableiten. Bei älteren Nutzern sind diese Werte nach oben zu korrigieren. Der zeitliche Raum beinhaltet die zeitliche Veränderung der haptischen Reize. Bei einem kinästhetischen Reiz sollte die Frequenz bei 10 bis 30 Hz liegen. Eine taktile Erregung kann bis zu einer Frequenz von 1000 Hz erfolgen. Die jeweils wahrgenommene Bandbreite kann in Abhängigkeit der Impedanz des Benutzers variieren. Die gleichzeitige Nutzung mehrerer Modalitäten zum Vermitteln einer Systemrückmeldung birgt durch die intersensorische Konkurrenz zusätzliche Schwierigkeiten bei der Gestaltung. So traut der Mensch zum Beispiel eher seiner haptischen als der visuellen Wahrnehmung (Schönhammer

2009). Bei der Gestaltung künstlicher, haptisch kodierter Eingabemöglichkeiten und Systemrückmeldungen müssen daher sämtliche genutzten Rückmeldungsmodalitäten konsistent sein. Durch die Nutzung der haptischen Wahrnehmungsmodalität durch künstlich erzeugte haptische Rückmeldungen lassen sich die Blickzuwendungen zum Touchscreen signifikant reduzieren und die Effizienz der Touchscreeninteraktion signifikant erhöhen.

Die theoretischen Grundlagen zur Kognition (vgl. Unterabschnitt 2.5.2) beinhalten die Empfehlung, schnell zu verarbeitende Informationseinheiten, sogenannte „Chunks“, aus Kapazitätsgründen bei gleichzeitiger Wahrnehmung auf eine Anzahl von  $7 \pm 2$  Chunks zu begrenzen. Für die Fixierung eines Chunk im Langzeitgedächtnis ist eine Dauer zwischen fünf bis zehn Sekunden notwendig. Zusätzlich fallen Parallelen zwischen dem Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen (1983) und den verschiedenen Modellen intuitiver Interaktion nach Blackler & Hurtienne (2007) auf. Die schnelle und unbewusste Anwendung vorhandenen Wissens als Voraussetzung für die intuitive Interaktion (Blackler & Hurtienne 2007) entspricht dem fertigkeitsbasierten Verhalten nach Rasmussen (1983). Die von Blackler & Hurtienne (2007) verglichenen Modelle enthalten weitere, aber miteinander nur bedingt vergleichbare Bestandteile, wie zum Beispiel Kultur und Metapher, die einzig einen schrittweise steigenden kognitiven Schwierigkeitsgrad gemein haben. Auch diese Bestandteile der von Blackler & Hurtienne (2007) angeführten Modelle zur intuitiven Interaktion lassen sich jeweils den oberen beiden Ebenen des Drei-Ebenen-Modells zuordnen. Werden bei der Umsetzung der Benutzungsschnittstelle die beiden kognitiven Modelle für das sogenannte „Top-Down-Processing“ berücksichtigt, kann eine intuitive Interaktion gemäß Blackler & Hurtienne (2007) gefördert werden. Zur Förderung der intuitiven Interaktion sind bei der Umsetzung einer touchscreenbasierten Benutzungsschnittstelle möglichst geringe Anforderungen an das Vorwissen der Benutzer zu stellen. In der folgenden Liste geht eine höhere Nummer mit steigenden Voraussetzungen an das Vorwissen der Benutzer einher:

1. Affordance (Aufforderungscharakter)
2. soziabilisiertes Wissen
3. anwendungsspezifisches Wissen vom gleichen Gebiet
4. anwendungsspezifisches Wissen von einem anderen Gebiet
5. Metapher (auch als Analogien oder Conceptual Blending bezeichnet)

Um einen direkten Zusammenhang zwischen einer Eingabe und einer Rückmeldung herstellen zu können, sollte die Rückmeldung in einem Zeitfenster von maximal 100 ms nach der Eingabe erfolgen.

Bei stationären Touchscreensystemen muss bei der Positionierung des Touchscreens, darauf geachtet werden, dass er sowohl im Sichtfeld als auch im Reichraum des Benutzers bzw. ggf. auch mehrerer gleichzeitiger Benutzer (vgl. Abschnitt 2.4) liegt. Die dazu nötigen Abmessungen können je nach Benutzergruppe variieren, so dass die jeweiligen anthropometrischen Daten der Benutzergruppe für eine angemessene Positionierung heranzuziehen sind. Die theoretischen Grundlagen zur Biomechanik weisen auf eine Dauer der Berührung zwischen Fingerkuppe und Touchscreen von mindestens 80 ms und für eine Eingabe mittels Tippen hin, wobei der Mittelwert der Berührungsdauer bei 169 ms liegt. Die Belastung des Hand-Arm-Systems durch Haltungsarbeit bei der Touchscreeninteraktion betrug für das 50. Perzentil männlich 9,75 N. In der computergestützten Analyse konnte gezeigt werden, dass diese Kraft hauptsächlich vom Deltamuskel aufgebracht wird. Für diesen Muskel entspricht die berechnete Kraft einem Anteil von 4,5 % der möglichen Maximalkraft. In der empirischen Untersuchung der Biomechanik bei der Touchscreeninteraktion (vgl. Unterabschnitt 4.5.3) ließen sich keine Erkenntnisse zur touchscreeninduzierten Ermüdung des Hand-Arm-Systems oder deren Einfluss auf die Interaktion gewinnen, so dass den Empfehlungen der DIN EN ISO 9241-420 zu folgen ist. Diese schlägt eine maximale Interaktionsdauer von drei Minuten bei einer anschließenden Pause der gleichen Dauer vor. Die Beobachtung der Interaktion mit Touchscreens im Arbeitsumfeld ergab in zwei exemplarischen Anwendungsfällen, dass im Mittel zwischen 29 und 41 Prozent der produktiven Arbeitszeit von Kassenspersonal mit einem touchscreenbasierten Kassensystem interagiert wurde (vgl. Unterabschnitt 4.2.3).

Aus diesen Erkenntnissen zu den Aspekten der Perzeption, Kognition und Biomechanik des Subsystems Mensch ergaben sich die folgenden Gestaltungsempfehlungen für Touchscreensysteme:

### Perzeption

1. Zur optimalen Lesbarkeit sollte schriftliche Information so gestaltet sein, dass ein Sehwinkel von 20 Winkelminuten ausgenutzt wird (TG; DIN 5340).
2. Die Farbcodierung von Informationen sollte lediglich innerhalb eines Sehwinkelbereichs von  $\pm 15$  Grad erfolgen (TG; Dix et al. 2004, Schenk & Rigoll 2010).
3. Schriftliche Informationen sollten nicht in der Farbe blau dargestellt werden (TG; Dix et al. 2004).

4. In Abhängigkeit der Benutzergruppe ist einer Farbcodierung in den Farben rot und grün zu vermeiden oder eine Unterscheidbarkeit durch ergänzende Maßnahmen abzusichern (TG; Dix et al. 2004).
5. Künstlich erzeugte haptische Rückmeldungen sollten bei der Interaktionsform Tippen bereits innerhalb der ersten 80 ms nach der Eingabe spürbar sein: im Mittel 169 ms Zeit, mindestens jedoch 80 ms (TG; Seeger et al. 2015).
6. Haptisch wahrnehmbare Rückmeldungen sollten einen minimalen räumlichen Abstand von 2 mm nicht unterschreiten, um unterscheidbar zu sein (TG; Sommer 1995).
7. Haptische Rückmeldungen sollten einen Druck von  $0,31 \text{ mg mm}^{-2}$  erzeugen, um wahrnehmbar zu sein (TG; Kunsch & Kunsch 2007).
8. Vibrotaktile Rückmeldungen sind bis zu einer Frequenz bis 1000 Hz möglich (TG; Shimoga 1992).
9. Kinästhetische Rückmeldungen sollten einen Frequenzbereich von 10 bis 30 Hz nutzen (TG; DIN EN ISO 9241-910).
10. Zur Vermeidung intersensorischer Konkurrenz sollten die Informationen aller gleichzeitig genutzten Sinnesmodalitäten konsistent sein (TG; Jones & Sarter 2008, Schönhammer 2009).
11. Die Blickzuwendung zum Touchscreen sollte durch den Einsatz künstlicher haptischer Rückmeldungen reduziert werden (EU; Abschnitt 4.6).
12. Die Effizienz der Touchscreeninteraktion sollte durch den Einsatz künstlicher haptischer Rückmeldungen erhöht werden (EU; Abschnitt 4.6).

### Kognition

13. Gleichzeitig wahrzunehmende Informationseinheiten („Chunks“) sollten eine Anzahl von  $7 \pm 2$  nicht überschreiten (TG; Miller 1956).
14. Um einen Chunk im Langzeitgedächtnis fixieren zu können, sollte dem Benutzer dazu eine Dauer von fünf bis zehn Sekunden eingeräumt werden (TG; Simon 1974).

15. Die Benutzungsschnittstelle sollte so gestaltet werden, dass das vom Benutzer vorausgesetzte Wissen folgender Priorisierung entspricht: Affordance (1), soziabilisiertes Wissen (2), anwendungsspezifisches Wissen vom gleichen Gebiet (3), anwendungsspezifisches Wissen von einem anderen Gebiet (4), Metapher (5) (TG; Blackler & Hurtienne 2007)
16. Rückmeldungen sollten dem Benutzer innerhalb der ersten 100 ms nach einer Interaktion präsentiert werden (TG; MIL-STD-1472G).

### Biomechanik

17. Stationäre Touchscreens sollten sowohl im Sichtfeld als auch im Reichraum des Benutzer positioniert sein (TG; VDI/VDE 3850-3).
18. Für die Positionierung eines stationären Touchscreens sollten die jeweiligen anthropometrischen Daten der Benutzergruppe als Bemessungsgrundlage herangezogen werden (TG; Helander 2006).
19. Eine ausschließliche Touchscreeninteraktion sollte nicht länger als drei Minuten andauern, gefolgt von einer Pause gleicher Dauer ((TG; DIN EN ISO 9241-420), vgl. Abschnitt 4.5).
20. Bei einer anteiligen Touchscreeninteraktion kann die zulässige Interaktionsdauer entsprechend verlängert werden (EU; Unterabschnitt 4.2.3 und Abschnitt 4.5).

Ordnet man die für das Subsystem Mensch formulierten Gestaltungsempfehlungen 1 bis 20 dem Basismodell für Touchscreensysteme zu, ergibt sich Abbildung 5.2.

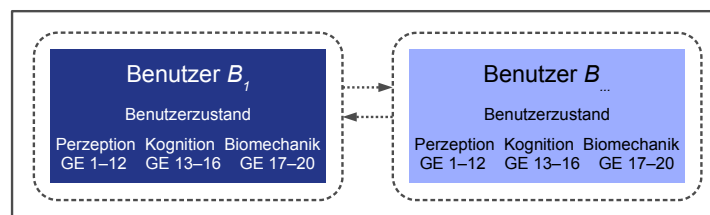


Abbildung 5.2: Gestaltungsempfehlungen des Subsystems Mensch im Basismodell für Touchscreensysteme

## 5.2 Gestaltungsempfehlungen des Subsystems Maschine

In Richtung der Benutzungsschnittstelle wirken beim Subsystem Maschine in erster Linie die interaktionsbeeinflussenden Faktoren der Rückmeldungen. Zu den Rückmel-

dungen zählt neben der Bilderzeugung (vgl. Abschnitt 3.1) auch eine ggf. vorhandene künstliche haptische Rückmeldung (vgl. Abschnitt 3.3 und Abschnitt 4.6). Für die Benutzereingaben ist die Berührungserfassung (vgl. Abschnitt 3.2) zuständig, die anschließend von der Softwareplattform (vgl. Abschnitt 3.4) verarbeitet werden.

Im Rahmen der Analyse von technischen Realisierungen der Bilderzeugung konnten folgende interaktionsbeeinflussende Faktoren identifiziert werden: Leuchtdichte und Kontrast, räumliche Auflösung, Bildrate, Farbwiedergabe und Betrachtungswinkel (vgl. Abschnitt 3.1). Bei diesen Punkten ist bei der Auswahl eines Systems generell auf möglichst hohe Werte zu achten. Entsprechend des Nutzungskontextes eines konkreten Touchscreensystems sind ggf. bei einzelnen Punkten Einschränkungen des Wertebereichs sinnvoll. So benötigt z. B. die Anzeige eines Geldautomaten aus Sicherheitsgründen einen stark eingeschränkten Betrachtungswinkel oder ein eBook-Reader lediglich eine niedrige Bildrate und ggf. eine auf Graustufen eingeschränkte Farbwiedergabe.

Eine Analyse der technischen Möglichkeiten zur Erzeugung künstlicher Rückmeldungen ergab die Beurteilungskriterien Wahrnehmungsmodalität, zeitliche Auflösung, Intensität, Intensitätsauflösung und räumliche Auflösung (vgl. Abschnitt 3.3). Bei der Gestaltung und Umsetzung eines Touchscreensystems ist die multimodale Umsetzung von Rückmeldungen empfehlenswert. Die zeitliche Auflösung des Systems sollte möglichst so hoch sein, dass der vom Menschen wahrnehmbare Auflösung vollständig abgedeckt wird. Für die Intensität, die das technische System erzeugen kann, empfiehlt sich eine Orientierung an der Absolutschwelle und der Schmerzgrenze der menschlichen Wahrnehmung für die jeweilige Wahrnehmungsmodalität. Die Intensitätsauflösung des Systems zur Erzeugung künstlicher Rückmeldungen sollte wenigstens die einfache Differenzschwelle der jeweils angesprochenen Wahrnehmungsmodalität erreichen, wobei sich eine feinere Abstufung bei entsprechender Ansteuerung nicht negativ auswirkt. Auch für die räumliche Auflösung von künstlichen Rückmeldungen geben die Leistungsgrenzen der menschlichen Wahrnehmung die Grenzen vor. Diese sind abhängig von der angesprochenen Sinnesmodalität. Für den Tastsinn ist ein sinnvolles Maß durch die Zweipunktschwelle bei ca. 2 mm begründet.

Die technischen Realisierungen zur Berührungserfassung unterscheiden sich hinsichtlich optischer Darstellungsqualität, Parallaxenfehler, Kalibrierung, Eingabemittel, Anzahl erfassbarer Berührungen, Ghosting, Drag-and-drop-Eignung und der Beeinträchtigung durch Verschmutzung (vgl. Abschnitt 3.2). Bei der Auswahl einer Technologie zur Berührungserfassung ist eine hohe optische Darstellungsqualität zu bevorzugen, wodurch Systeme, die mehrere zusätzliche und zudem dickere Schichten vor der elektronischen Anzeige zur Berührungserfassung benötigen, zu vermeiden sind. Durch dieses Auswahlkriterium verringert sich gleichzeitig die Anfälligkeit des



Touchscreens für Parallaxenfehler. Empfehlenswert sind zudem Technologien, die keine Kalibrierung benötigen, keine besonderen Anforderungen an das Eingabemittel stellen und möglichst mehr als eine Berührung gleichzeitig erfassen können. Die Technologie sollte nicht anfällig für Ghosting sein und sich für die Eingabe mittels Drag-and-drop eignen. Da eine Verschmutzung des Touchscreens durch die Interaktion nicht zu vermeiden ist, sollte die Technologie so gewählt werden, dass die Verschmutzung die Berührungserfassung nicht beeinträchtigt.

Für die Analyse der verschiedenen Softwareplattformen mit integrierter Touchscreenunterstützung wurden die Punkte Rückmeldungen, Bedienelemente, Assistenzfunktionen, Interaktionsformen, Benutzermodell und Dialogsystem als Beurteilungskriterien herangezogen (vgl. Abschnitt 3.4). Die Softwareplattform sollte Rückmeldungen in Form von Animationen, Benachrichtigungen, Klängen und Vibration unterstützen. Die berührungsempfindliche Fläche von Bedienelementen sollten eine Kantenlänge oder einen Durchmesser von mindestens 7,2 mm aufweisen; die sichtbare Fläche darf kleiner sein. Die Softwareplattform sollte Assistenzfunktionen für Autokorrektur, Autovervollständigung und dynamische berührungsempfindliche Schaltflächengröße beinhalten. Die von einer Softwareplattform zu ermöglichenden Interaktionsformen umfassen mindestens Eingaben mit einem oder zwei Fingern, wobei die Eingaben sowohl mittels visueller Bedienelemente als auch in Form von Gesten erfolgen können, bei denen ein Bedienelement als solches nicht explizit erkennbar ist. Die empirische Untersuchung der Interaktionsformen (vgl. Abschnitt 4.1) hat gezeigt, dass Bedienelemente wie Slider, die bei der Interaktion Präzision erfordern, bei der Gebrauchstauglichkeit eher schlechter abschneiden, als Tippeingaben auf Buttons oder Gesten ohne explizites Bedienelement. Das Benutzermodell der Softwareplattform sollte mindestens Einstellungen für eine Sprachausgabe, die Dauer zeitkritischer Eingabeformen und sofern technisch nötig die Kalibrierung des Touchscreens vorhalten. Das Dialogsystem einer Softwareplattform sollte den Grundsätzen der Dialoggestaltung (vgl. Unterabschnitt 2.6.3) entsprechen.

Die Erkenntnissen zum Subsystem Maschine lassen sich zu folgenden Gestaltungsempfehlungen für Touchscreensysteme zusammenfassen:

### **Rückmeldung**

21. Bei Auswahl der elektronischen Anzeige sollte auf eine hohe Leuchtdichte und einen hohen Kontrast geachtet werden (LA; Abschnitt 3.1).

22. Bei Auswahl der elektronischen Anzeige sollte auf eine hohe räumliche Auflösung geachtet werden (LA; Abschnitt 3.1).
23. Bei Auswahl der elektronischen Anzeige sollte auf eine hohe Bildrate geachtet werden (LA; Abschnitt 3.1).
24. Bei Auswahl der elektronischen Anzeige sollte auf eine umfangreiche Farbwiedergabe geachtet werden (LA; Abschnitt 3.1).
25. Bei Auswahl der elektronischen Anzeige sollte auf einen großen Betrachtungswinkel geachtet werden (LA; Abschnitt 3.1).
26. Rückmeldungen sollten simultan mehrere Wahrnehmungsmodalitäten ansprechen (TG; Ferris & Sarter 2008, Jones & Sarter 2008).
27. Die zeitliche Auflösung einer Rückmeldung sollte der Leistungsfähigkeit der menschlichen Wahrnehmung für die jeweilige Wahrnehmungsmodalität entsprechen (TG; Sherman & Craig 2002).
28. Die räumliche Auflösung einer Rückmeldung sollte der Leistungsfähigkeit der menschlichen Wahrnehmung für die jeweilige Wahrnehmungsmodalität entsprechen (TG; Sherman & Craig 2002).
29. Die Intensität einer Rückmeldung sollte zwischen Absolutschwelle und Schmerzgrenze der menschlichen Wahrnehmung für die jeweilige Wahrnehmungsmodalität liegen (TG; Schmidt & Lang 2007, Goldstein 2010b).
30. Die Intensitätsauflösung des Systems zur Erzeugung künstlicher Rückmeldungen sollte wenigstens die einfache Differenzschwelle der jeweils angesprochenen Wahrnehmungsmodalität erreichen (TG; Schmidt & Lang 2007, Goldstein 2010b).

### **Berührungserfassung**

31. Bei Auswahl der Technologie zur Berührungserfassung sollte auf eine hohe optische Darstellungsqualität geachtet werden (LA; Abschnitt 3.2).
32. Bei Auswahl der Technologie zur Berührungserfassung sollte auf eine geringe Schichtdicke vor der elektronischen Anzeige und damit auf die Anfälligkeit für Parallaxenfehler geachtet werden (LA; Abschnitt 3.2).
33. Bei Auswahl der Technologie zur Berührungserfassung sollte eine Technologie bevorzugt werden, die keine Kalibrierung erfordert (LA; Abschnitt 3.2).

34. Bei Auswahl der Technologie zur Berührungserfassung sollte eine Technologie bevorzugt werden, die keine speziellen Anforderungen an das Eingabemittel hat und z. B. problemlos mit Handschuhen funktioniert (LA; Abschnitt 3.2).
35. Bei Auswahl der Technologie zur Berührungserfassung sollte eine Technologie bevorzugt werden, die mehr als eine Berührung gleichzeitig erfassen kann (LA; Abschnitt 3.2).
36. Bei Auswahl der Technologie zur Berührungserfassung sollte eine Technologie bevorzugt werden, die nicht anfällig für Ghosting ist (LA; Abschnitt 3.2).
37. Bei Auswahl der Technologie zur Berührungserfassung sollte eine Technologie bevorzugt werden, die für Eingaben mittels Drag-and-drop bzw. Ziehen geeignet ist (LA; Abschnitt 3.2).
38. Bei Auswahl der Technologie zur Berührungserfassung sollte eine Technologie bevorzugt werden, bei der die Berührungserfassung nicht durch Verschmutzung beeinträchtigt wird (LA; Abschnitt 3.2).

### Softwareplattform

39. Die berührungsempfindliche Fläche von Bedienelementen sollte mindestens eine Kantenlänge oder einen Durchmesser von 7,2 mm aufweisen; die sichtbare Fläche darf kleiner sein (LA; Abschnitt 3.4).
40. Die Assistenzfunktionen sollten eine Autokorrektur, eine Autovervollständigung und dynamische berührungsempfindliche Schaltflächengrößen beinhalten (LA; Abschnitt 3.4).
41. Als Interaktionsform sollten mindestens Eingaben mit einem oder zwei Fingern in Form von Tippen oder Gesten möglich sein (LA; Abschnitt 3.4).
42. Die Interaktion mittels Tippen und das Ausführen von Gesten ohne sichtbares Bedienelement sollten bei geeigneten Aufgaben (z. B. Blättern und Zoomen) gegenüber einem Slider bevorzugt werden (EU; Abschnitt 4.1).
43. Das Benutzermodell sollte mindestens Einstellungen für eine Sprachausgabe, die Dauer zeitkritische Eingabeformen und sofern technisch nötig die Kalibrierung Touchscreens vorhalten (LA; Abschnitt 3.4).
44. Das Dialogsystem sollte den Grundsätzen der Dialoggestaltung entsprechen (TG; DIN EN ISO 9241-110, Schlick et al. 2010, Zühlke 2012)

Ordnet man die für das Subsystem Maschine formulierten Gestaltungsempfehlungen 21 bis 44 dem Basismodell für Touchscreensysteme zu, ergibt sich Abbildung 5.3.

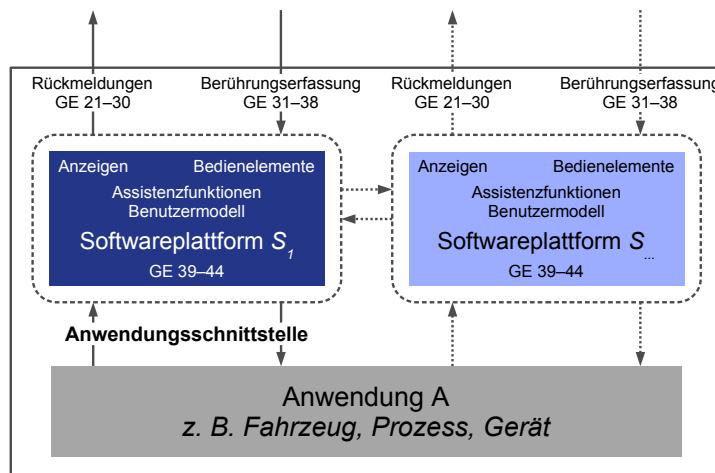


Abbildung 5.3: Gestaltungsempfehlungen des Subsystems Maschine im Basismodell für Touchscreensysteme

## 5.3 Verwendung der Gestaltungsempfehlungen im Gestaltungsprozess

Um die Gestaltungsempfehlungen und das Basismodell für Touchscreensysteme (Abbildung 5.4 auf S. 200) gezielt anwenden zu können, wurden sie in die einzelnen Phasen des menschenzentrierten Gestaltungsprozess (Abbildung 5.5 auf S. 200) integriert. Dies war notwendig, da die im Rahmen dieser Arbeit zusammengetragenen Gestaltungsempfehlungen nicht die alleinige Grundlage für die Gestaltung eines Touchscreensystems bilden, sondern immer vor dem Hintergrund des systemspezifischen Nutzungskontextes (vgl. Unterabschnitt 2.6.2) zu sehen sind.

Der Nutzungskontext beinhaltet die Eigenschaften des Benutzers, der Umwelt sowie die zu erfüllende Aufgabe und deckt damit im Basismodell für Touchscreensysteme die Punkte Benutzerzustand, Umwelt (Ort  $O_1$ , Ort  $O_2$ , Störungen Umwelteinflüsse) und Aufgabe (definiertes Ziel, Input) ab.

In der nächsten Phase des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses werden auf Basis des Nutzungskontextes die Nutzungsanforderungen festgelegt. Die daraus resultierenden Anforderungen können mit den Gestaltungsempfehlungen des ganzheitlichen Gestaltungsansatzes für Touchscreensysteme in Konflikt stehen. Als Beispiele wurden bereits in Abschnitt 5.2 ein eingeschränkter Betrachtungswinkel für Geldautomaten

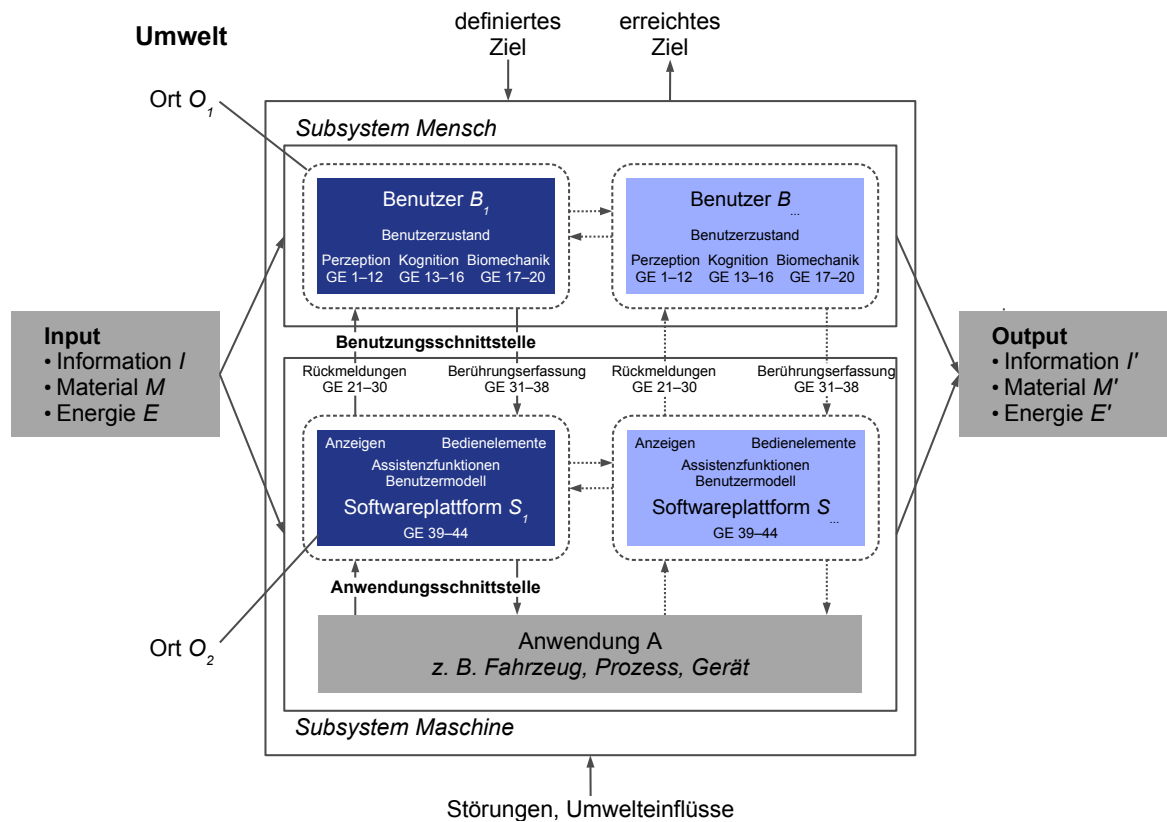


Abbildung 5.4: Gestaltungsempfehlungen im Basismodell für Touchscreensysteme

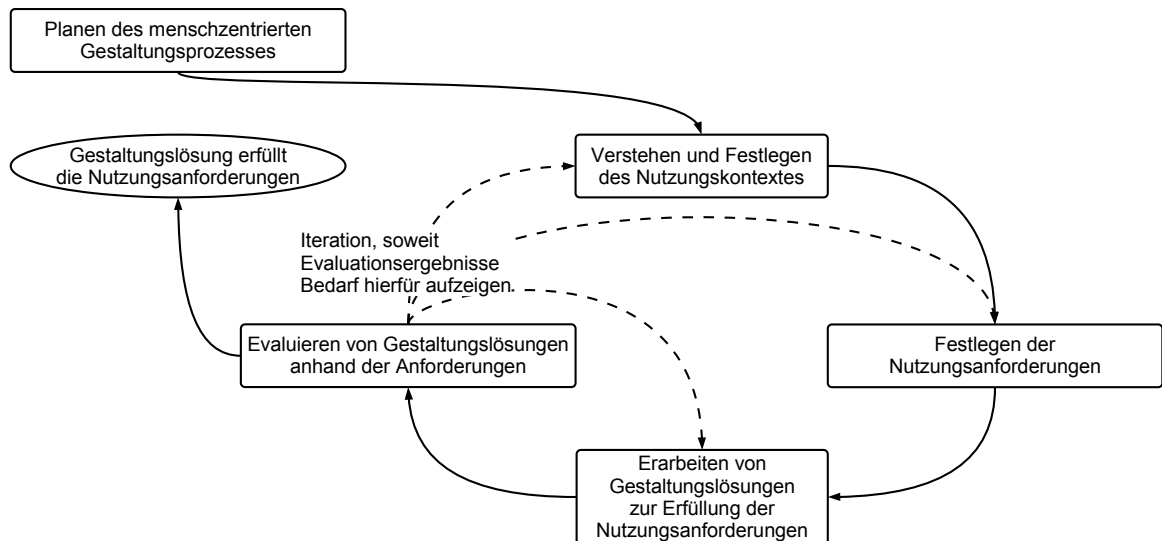


Abbildung 5.5: Menschenzentrierter Gestaltungsprozess (DIN EN ISO 9241-210, S. 15)

oder eine niedrige Bildrate sowie die Beschränkung der Farbwiedergabe auf Graustufen für einen eBook-Reader genannt. In diesem Fall sind die Anforderungen aus dem Nutzungskontext höher zu priorisieren als die Gestaltungsempfehlungen.

Der Hauptanwendungsbereich des ganzheitlichen Gestaltungsansatzes ist die Phase der Erarbeitung von Gestaltungslösungen. Hier können neben den Gestaltungsempfehlungen auch die Ergebnisse der Literaturanalyse der technologischen Realisierungsmöglichkeiten (vgl. Abschnitt 3.5) als Unterstützung bei der technologischen Realisierung herangezogen werden. Die erarbeiteten Tabellen zu den verschiedenen Technologien der Bilderzeugung, Berührungserfassung, Rückmeldungen und Softwareplattformen lassen sich durch Hinzufügen von entsprechenden Feldern für die Beurteilung und Gewichtung der einzelnen Kriterien zu einer Entscheidungsmatrix erweitern.

Bei der Evaluierung der Gestaltungslösung im letzten Schritt einer Iteration des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses stehen zahlreiche etablierte Methoden zur Verfügung. In dieser Phase kann auf eine modellbasierte Evaluierung zurückgegriffen werden, bei der die Gestaltungslösungen eines Touchscreensystems auf Konformität mit den erarbeiteten Gestaltungsempfehlungen geprüft werden.

## 5.4 Erprobung der Gestaltungsempfehlungen in der Praxis

Der ganzheitliche Gestaltungsansatz für Touchscreensysteme wurde bereits an einem Anwendungsbeispiel getestet. Die Möglichkeit dazu bot ein Projekt zwischen dem Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik der Universität Kassel, dem Institut für Industriedesign der Hochschule Darmstadt und den beiden Firmen Plug'n Charge GmbH und SEM-Schnellladung Elektromobilität GmbH & Co. KG. Das Projekt „Entwicklung von massentauglichen AC- und DC-Ladestationen für Elektromobile“ (HA-Projekt-Nr.: 279/11-24) wurde im Rahmen der Hessen ModellProjekte aus Mitteln der „Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz“ (LOEWE), Förderlinie 3: KMU-Verbundvorhaben vom Hessischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst gefördert. Einzelaspekte des Projektes wurden in Domhardt & Schmidt (2012b) und Domhardt & Schmidt (2013c) veröffentlicht.

Die Entwicklung der Ladestationen erfolgte nach dem menschenzentrierten Gestaltungsansatz, um nicht nur technische Funktionalität und die Einhaltung der Sicherheitsstandards, sondern insbesondere die geforderte Massentauglichkeit zu gewährleisten. Es wurde entsprechend des Prozesses mit der Modellierung des Nutzungskontextes begonnen (Vorgehen und Ergebnisse s. Domhardt & Schmidt 2012b). Die aus dem

Nutzungskontext abgeleiteten Anforderungen wurden um die Gestaltungsempfehlungen des ganzheitlichen Gestaltungsansatzes für Touchscreensysteme ergänzt. Beim Umsetzen der Gestaltungslösungen erfolgte die Auswahl eines den Anforderungen entsprechenden Touchscreens nach den Erkenntnissen der Literaturanalyse der technologischen Realisierungsmöglichkeiten (GE 31 – GE 38, vgl. Abschnitt 3.2). Die systematische Auswahl ermöglichte eine objektive Entscheidung für einen Touchscreen mit Surface Acoustic Wave-Technologie (SAW). Den entsprechenden Gestaltungsempfehlungen zu Leuchtdichte, Auflösung, Bildrate, Farbwiedergabe und Betrachtungswinkel (GE 21 – GE 25) wurden bei der Auswahl ebenso berücksichtigt. Die konzipierte Benutzungsschnittstelle der Ladestation umfasste eine multimodale und mehrsprachige Informationsausgabe, eine direkte Interaktionsmöglichkeit mittels Touchscreen sowie animierte Anleitungen zur Unterstützung des Benutzers (vgl. Abbildung 5.6).

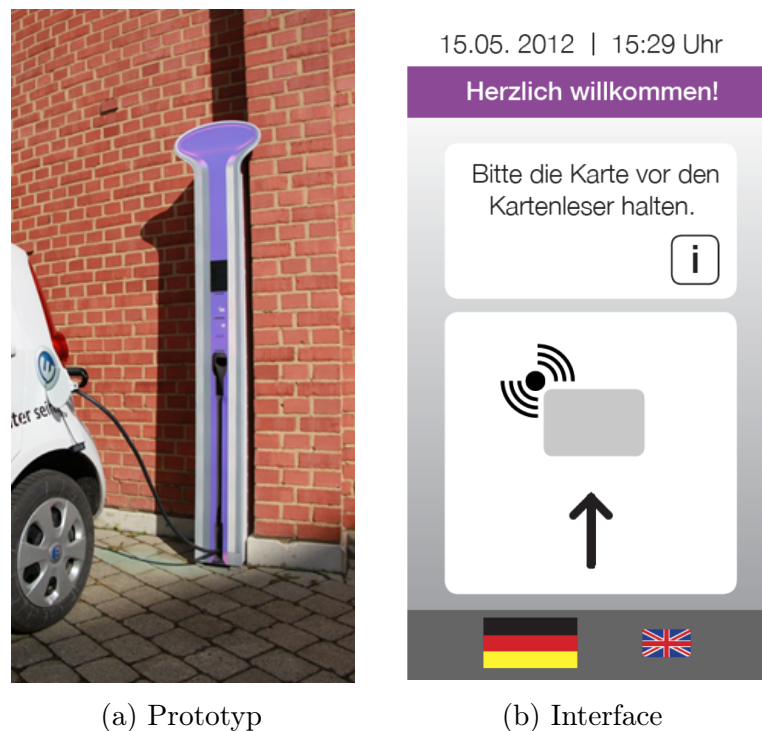


Abbildung 5.6: Prototyp der Ladestation für Elektromobile

Bei der Gestaltung der Benutzungsschnittstelle wurden mehrere Gestaltungsempfehlungen des ganzheitlichen Gestaltungsansatzes für Touchscreensysteme berücksichtigt. Die Festlegung des Schriftgrades der Anzeige stellte aufgrund des variablen Nutzungskontextes eine Herausforderung dar. So sollte die Anzeige der Ladestation bereits aus dem Auto lesbar sein, selbst wenn sich die Ladestation am Ende einer Parklücke befindet. Der Betrachtungsabstand betrug dabei fünf Meter. Für die

Festlegung des Schriftgrades waren die Grundlagen der Perzeption (GE 1, GE 2), typografische Grundlagen und technische Randbedingungen zu berücksichtigen. Die daraus resultierende Formel (Gleichung 5.1) für den ergonomischen Schriftgrad  $h_e$  in Abhängigkeit des Betrachtungsabstandes  $a$  wurde im Rahmen von Domhardt & Schmidt (2013a) hergeleitet. Die drei enthaltenen Konstanten ergeben sich aus den ergonomischen Grundlagen ( $k_E$ ,  $\alpha$  – Sichtfeld [°],  $\beta$  – Sehwinkel [°], vgl. GE 1), den technischen Grundlagen der gewählten Anzeige und Softwareplattform ( $k_T$ ,  $n_{Av}$  – vertikale Anzeigenauflösung [px],  $h_A$  – Anzeighöhe [mm],  $\rho_{OS}$  – Punktdichte des Betriebssystems [pt/mm]) sowie den Eigenschaften der Schriftart ( $k_S$ ,  $f_R$  – Rastermaß,  $h_{xt}$  – typografische x-Höhe). Aus der Herleitung resultierte ein Schriftgrad von  $h_e = 150$  pt für die Schriftart Verdana auf einer Anzeige mit einer vertikalen Auflösung von  $n_{Av} = 768$  px und einer Anzeighöhe von  $h_A = 228$  mm und Microsoft Windows als Softwareplattform ( $\rho_{OS} = 96$  ppi). Sollte die gleiche Buchstabenhöhe mit der Schriftart Times New Roman erreicht werden, wäre ein Schriftgrad von 183 Punkt notwendig. Eine schriftartunabhängige Berechnung nach DIN 32975 anhand der gewünschten Buchstabenhöhe in Millimetern ergab lediglich einen Schriftgrad von 132 Punkt. Die Berichtigung der DIN 32975 aus dem Jahr 2012 wurde bei der Berechnung berücksichtigt.

$$\begin{aligned}
 h_e &= a \cdot k_E \cdot k_T \cdot k_S \\
 &\text{mit} \\
 k_E &= 2 \cdot \tan\left(\frac{\beta}{2}\right), \quad k_T = \frac{n_{Av}}{h_A} \cdot \rho_{OS}, \quad k_S = \frac{f_R}{h_{xt}} \cdot \frac{72,72 \text{ pt}}{25,4 \text{ mm}} \\
 &\text{für alle} \\
 \frac{b_A}{2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} &\leq a \leq \frac{h_A}{4} \cdot \tan\left(\frac{\beta}{2}\right)
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Die Farbgestaltung der grafischen Benutzungsschnittstelle erfolgte gemäß GE 3 und GE 4. Da gemäß den Anforderungen keine künstliche haptische Rückmeldung gefordert war, konnten die GE 5 bis GE 12 unberücksichtigt bleiben. Hinsichtlich der Kognition konnten alle Gestaltungsempfehlungen berücksichtigt werden (GE 13 bis GE 16).

Bei der Positionierung des Touchscreens wurden die Empfehlungen zur Biomechanik angewendet, so dass der Touchscreen sowohl für das 5. Perzentil weiblich als auch für das 95. Perzentil männlich im Reichraum und im Sichtfeld lag (GE 17, GE 18). Die Interaktion mit dem System war auf eine sehr kurze Dauer ausgelegt, so dass die Empfehlungen zu maximalen Interaktionsdauer eingehalten wurden (GE 19, GE 20). Die Rückmeldungen des Systems wurden visuell und auditiv umgesetzt (GE 26), wobei die zeitliche Auflösung der Rückmeldung so gestaltet war, dass der Benutzer



eine Veränderung nachvollziehen konnte (GE 27). Für die visuellen Rückmeldungen wurden z. B. beim Wechsel der Ansicht die gesamte Displayfläche genutzt, um einen möglichst intensiven visuellen Reiz zu erzeugen (GE 28, GE 29). Die Reizschwelle wurde durch die erzeugten Rückmeldungen sowohl für die visuelle als auch die auditive Wahrnehmungsmodalität überschritten (GE 30).

Bei der Umsetzung der grafischen Benutzungsschnittstelle wurde auf Microsoft Windows als Softwareplattform zurückgegriffen. Die Abmessungen der Bedienelemente übertrafen die Empfehlung (GE 39). Auf Assistenzfunktionen konnte aufgrund der wenigen Bedienelemente verzichtet werden, so dass GE 40 unberücksichtigt bleiben konnte. Die Interaktionsform wurde auf das Tippen mit einem Finger begrenzt (GE 41, GE 42). Das Benutzermodell umfasste die Einstellung der Sprache des Benutzers (GE 43). Das Dialogsystem der Benutzungsschnittstelle war nach den Grundsätzen der Dialoggestaltung aufgebaut (GE 44).

Bereits Zwischenergebnisse der „Entwicklung von massentauglichen AC- und DC-Ladestationen für Elektromobile“ wurden regelmäßig anhand der Gestaltungsempfehlungen evaluiert, so dass der menschenzentrierte Gestaltungsprozess für einzelne Bestandteile der Ladestation mehrfach durchlaufen wurde. Durch die systematische Anwendung der Gestaltungsempfehlungen für Touchscreensysteme konnte letztendlich mittels nutzerbasierter Evaluation des Prototyps die Massentauglichkeit der konzipierten Ladestation nachgewiesen werden (Details s. Domhardt & Schmidt 2013c).

## 5.5 Diskussion

Die Gestaltungsempfehlungen für Touchscreensysteme lassen es oft nicht zu, dass eine Softwareanwendung eigene Bedienelemente und Rückmeldungen an der Benutzungsschnittstelle zur Verfügung stellt, ohne auf die entsprechenden Funktionalitäten der verwendeten Softwareplattform zurückzugreifen. Dies stellt den Optimalfall dar, der jedoch in der Realität nicht oft anzutreffen ist. Während Apple Anwendungen den Zugang zum App-Store schon oft verweigert hat, wenn diese eigens gestaltete Bedienelemente und Interaktionsformen mitbringen, wird dies von Google oder Microsoft weniger strikt gehandhabt. Das Ergebnis sind Anwendungen, die ein anderes Aussehen und Interaktionsverhalten zeigen als das übrige System. Durch diese Inkonsistenzen werden die mentalen Modelle der Benutzer missachtet. Einzig bei Touchscreensystemen, die einem einzigen Zweck dienen, wie z. B. Geldautomaten, Kassensysteme oder Ladesäulen, sind vom Systemstandard abweichende Bedienelemente oder ein alternatives Dialogsystem akzeptabel, da die Abweichungen von den Benutzern nicht als Inkonsistenzen wahrgenommen werden können. Dennoch

ist auch bei solchen Touchscreensystemen darauf zu achten, dass der Benutzer die ihm bekannten Interaktionsformen zur Eingabe anwenden kann. Die bekanntesten Interaktionsformen lassen sich anhand der Gemeinsamkeiten aus den Ergebnissen der Literaturanalyse der technologischen Realisierungsmöglichkeiten der Softwareplattformen ableiten und umfassen neben dem Tippen und Ziehen auch die Gesten zum Blättern, Zoomen und Rotieren (vgl. Abschnitt 3.4 und Tabelle 3.11).

Die in der Untersuchung zur Biomechanik beobachteten Verschiebungen im Frequenzspektrum des EMG-Signals (vgl. Abschnitt 4.5) sind lediglich als Tendenzen zu werten. Dennoch wurde aus diesen Tendenzen eine Gestaltungsempfehlung abgeleitet (s. GE 19), die jedoch den schlimmsten anzunehmenden Fall darstellt. Durch die geringen Effekte und das verwendete Studiendesign konnten keine Aussagen über den Einfluss von Erholungspausen auf die Muskelermüdung getroffen werden.

Die natürlichen Benutzungsschnittstellen, zu denen auch Touchscreens zugeordnet werden, sind bei genauer Betrachtung weniger natürlich als der Name impliziert, denn die Interaktion mittels Berührung, Sprache oder Gesten basiert jeweils auf gelernten Konventionen (Norman 2010), auch wenn der Lernaufwand so gering ist (Greenstein 1997), dass zum Beispiel nach Holzinger (2003) auch ein Kind die Interaktion mit einem Touchscreen erlernen kann. Dennoch kann die Touchscreeninteraktion als intuitive Interaktion bezeichnet werden, denn die beiden etablierten Modelle intuitiver Interaktion beinhalten die unbewusste Anwendung bereits vorhandenen Wissens (Blackler & Hurtienne 2007).

Das Gesetz von Fitts (1954) wird in dieser Arbeit wie in vielen anderen Gebieten der Mensch-Maschine-Interaktion als Untersuchungsmittel genutzt (MacKenzie 1992). Obwohl zahlreiche weitere mathematische Formulierungen zum Gesetz von Fitts für unterschiedliche Anwendungsfälle existieren (für eine Übersicht s. Bützler et al. 2012), hat sich die Formulierung von MacKenzie & Buxton (1992) als allgemeingültige normative Grundlage (siehe z. B. DIN EN ISO 9241-410) mit ausreichender Genauigkeit (vgl. Bützler et al. 2012) etabliert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Zeigeaufgabe nach Fitts als standardisierte Aufgabe der Touchscreeninteraktion verwendet. Die auf diese Weise registrierten Berührungen wurden zur Synchronisation der zusätzlichen Datenkanäle (z. B. Beschleunigung und EMG) verwendet. Eine statistische Auswertung von Bewegungsdauer, Schwierigkeitsgrad und Fehlerrate fand nicht statt, da das Gesetz von Fitts und dessen Grenzen nicht unumstritten sind. Neben der Schwierigkeit, bei kleinen Bildschirmen einen ausreichend großen Schwierigkeitsgrad zu erreichen, ist die gestenbasierte Interaktion an Touchscreens mittels Wischen, Zoomen oder Rotieren nicht durch das Gesetz von Fitts abbildbar da die Formel nur für schnelle gezielte Bewegungen gilt (Soukoreff & MacKenzie 2004). Bei der Gesteninteraktion ist allerdings kein explizites Ziel zu treffen sondern der gesamte Touchscreen kann an jeder beliebigen Stelle zur Eingabe genutzt werden.

Eine Studie zum Gesetz von Fitts bei der Gesteninteraktion mit Touchscreens ist nach Zhao et al. (2014) bisher nicht bekannt. Ebenso ist unklar ist die Anwendung der Formel bei Suchaufgaben, die mehrfaches Scollen oder Zoomen zur Erreichung eines Ziels erfordern, dass zu Beginn evtl. gar nicht im dargestellten Bereich des Bildschirms ist (Zhao et al. 2014). Zudem konnte nach Soukoreff & MacKenzie (2004) kein psychomotorisches Modell gefunden werden, mit dem sich das Gesetz von Fitts erklären lässt. Bei den Versuchen den y-Achsenabschnitt zu erklären, der sich aus der Regressionsgeraden ergibt ( $MT \neq 0$  bei  $ID = 0$ , vgl. Gleichung 2.2), konnte zwischen verschiedenen Erklärungsversuchen kein wissenschaftlicher Konsens gefunden werden (Soukoreff & MacKenzie 2004).

Die Komplexität der Rezeptorstrukturen der Haut sorgt dafür, dass die Histologie und Zytologie der taktilen Wahrnehmung nach wie vor Gegenstand der Forschung ist (Kern 2009, Lumpkin et al. 2010) und die Rolle einzelner Rezeptoren bei der taktilen Wahrnehmung gelegentlich im Gegensatz zur etablierten Lehrmeinung in Frage gestellt wird, z. B. Meissnerschen Körperchen (Paré et al. 2001) und Merkel-Zellen (Lumpkin et al. 2010). Die physiologischen und neurologischen Abläufe bei der Wahrnehmung von mechanischen Reizen, wie Vibration, Dehnung und Druck, sind auch heute noch nicht endgültig geklärt (Lumpkin et al. 2010, Choi & Kuchenbecker 2012).

Die simultane Raumschwelle wird als Leistungsmaß der räumlichen Auflösung aufgrund neurophysiologischer Erkenntnisse von Craig & Johnson (2000) kritisiert, aber ein von den selben Autoren vorhergesagtes neues valides Maß der räumlichen Auflösung wurde bisher nicht verwirklicht. Die seltenen Literaturangaben zur Leistungsfähigkeit der haptischen Wahrnehmung enthalten keine Angaben über Umfang und Demografie der Stichprobe, z. B. DIN EN ISO 9241-910 und Schandry (2011) sowie sämtliche von Jones & Sarter (2008) analysierten Quellen. Dies ist umso kritischer, da die Leistungsfähigkeit der taktilen Wahrnehmung von der Fingergröße und damit auch vom Geschlecht abhängig ist (Peters et al. 2009). Zusätzlich lässt sich ab dem 30. Lebensjahr eine Abnahme der Anzahl der funktionierenden Tastkörperchen pro Quadratmillimeter Körperoberfläche feststellen, so dass man im Alter von einer verminderten Leistungsfähigkeit des Tastsinns ausgehen kann (Saup 1993). Doch obwohl nach Saup (1993) nur 25 Prozent der alten Menschen von einer stark verminderten taktilen Sensitivität betroffen sind, die zudem ihre Ursache nicht in altersbedingten Veränderungen, sondern in Erkrankungen hat, ist der negative Einfluss des Alters auf die Leistungsfähigkeit der haptische Wahrnehmung dennoch nachweisbar (Petrov et al. 2013).

Obwohl die Idee zur Nutzung der haptischen Wahrnehmung als Kommunikationskanal seit den 50er Jahren bekannt ist (Jones & Sarter 2008), weist die Fachliteratur nach wie vor entscheidende Lücken auf, wenn es um die Dimensionierung von Aktoren für

haptische Rückmeldungen geht. Eine Ursache dafür ist die teils fragwürdige Datenlage. So verweisen sowohl wissenschaftliche Arbeiten (z. B. Doerrer 2003) und gängige Fachbücher (z. B. Kern 2009) bei Angaben zur Leistungsfähigkeit der menschlichen haptischen Wahrnehmung auf empirische Untersuchungen mit nur sehr wenigen Teilnehmern (z. B.  $n = 3$  bei Tan et al. 1994). Zudem wurden die von Tan et al. (1994) ermittelten Werte zumindest von O'Malley & Gupta (2008) falsch übernommen. Während die Originalquelle eine mittlere Steifigkeit von  $K = 242 \text{ N cm}^{-1}$  aufweist (Tan et al. 1994, S. 356), wird dieselbe Quelle mit einem Wert von  $K = 25 \text{ N m}^{-1}$  zitiert (O'Malley & Gupta 2008, S. 34), was einem Fehler von drei Zehnerpotenzen entspricht. Erste Ansätze für ein systematisches Vorgehen bei der Entwicklung von Systemen mit künstlicher haptischer Rückmeldung wie z. B. von Challis & Edwards (2001) oder Hale & Stanney (2004) sind bisher nicht etabliert. Tabellen mit geschlechts- und perzentilspezifischen Werten für die Parameter der haptischen Wahrnehmung sind bisher nicht in den jüngsten Normen zum Thema enthalten (z. B. DIN EN ISO 9241-910, DIN EN ISO 9241-920). Während der „logische Raum“ in DIN EN ISO 9241-910 als Gestaltungsmöglichkeit haptischer Rückmeldung genannt wird, finden sich weder an dieser Stelle noch in der entsprechenden Fachliteratur (z. B. Avizzano et al. 2008) Hinweise zu dessen Gestaltung. Aktuelle Publikationen weisen auf diesen Mangel hin, z. B. Obrist et al. (2013). Durch diese dürftige Datenlage wird die konsistente Gestaltung künstlicher haptischer Rückmeldungen erschwert. Unerwünschte Wahrnehmungseffekte, verursacht durch intersensorische Konkurrenz (vgl. Unterabschnitt 2.5.1), lassen sich aktuell bei der Nutzung künstlicher haptischer Rückmeldungen kaum ausschließen.

Das theoretische Konzept der mentalen Modelle (Unterabschnitt 2.5.2) wird als Grundlage von Denk- und Entscheidungsprozessen kritisch mit anderen Denkkonzepten wie Deduktionsregeln und Wahrscheinlichkeiten verglichen (Johnson-Laird 2004). Ebenso umstritten ist die Chunking-Hypothese von Miller (1956), die besagt, dass der Umfang der Kurzzeitgedächtnisspanne  $7 \pm 2$  Chunks beträgt. Der Inhalt eines Chunks wird dabei von Miller (1956) als unbedeutend für das Kurzzeitgedächtnis angesehen. In neueren Arbeiten wird allerdings vermutet, dass die Spanne des Kurzzeitgedächtnisses von der Art der aufgenommenen Information abhängig ist (Baddeley 1994, Cowan 2000). Zudem scheint die bewältigbare Anzahl an Chunks abhängig vom Alter zu sein, wobei im Alter die Komplexität eines Chunks weiterhin keinen Einfluss hat (Gilchrist et al. 2008). Bisher haben die kritisierenden Autoren die von Miller (1956) vorgeschlagene Anzahl an Chunks in verschiedenen Stufen nach unten korrigiert. Auf eine einheitliche Anzahl bzw. in Abhängig von der Informationsart mehrere Werte wurde sich bisher nicht geeinigt. Aus diesem Grund wurde für die betroffene Gestaltungsempfehlung (GE 13) die Anzahl nach Miller (1956) beibehalten aber die Gestaltungsempfehlung so formuliert, dass dieser Wert als Obergrenze zu verstehen ist.

In dieser Arbeit wurden neben den realen Körperabmessungen von Probanden auch anthropometrische Daten verwendet (vgl. Abschnitt 4.4). Hierzu mussten unterschiedliche Quellen herangezogen werden (DIN 33402-2, z. B. DOD-HDBK-743A, Dassault Systèmes 2014), da keine verfügbare Datenquelle alle notwendigen Maße enthielt. Neben den Populationen dürften sich daher auch die Messverfahren zur Erhebung der Daten unterscheiden (Gebhardt et al. 2009), so dass die Vergleichbarkeit der Daten prinzipiell nicht gegeben ist. Das Ausmaß des daraus resultierenden Fehlers lässt sich nicht bestimmen, wodurch sich die erzielten Ergebnisse lediglich qualitativ beurteilen lassen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Ziel verfolgt, einen ganzheitlichen Gestaltungsansatz zu erarbeiten, der die Besonderheiten der Touchscreeninteraktion umfassend berücksichtigt. Als Lösungsansatz wurde ein Modell eines interaktiven Systems mit den Besonderheiten eines Touchscreens und der Interaktion des Benutzers mit demselben konkretisiert. Durch die Ergänzung touchscreenspezifischer Gestaltungsempfehlungen sollte ein umfassender und praktisch anwendbarer Gestaltungsansatz für Touchscreensysteme geschaffen werden.

Um dies zu erreichen, wurden in einem ersten Schritt die theoretische Grundlagen recherchiert. Aus der Recherche zur Interaktion mit Touchscreensystemen resultierten die charakteristischen Eigenschaften und Bestandteile eines Touchscreensystems (vgl. Abschnitt 2.4). Bereits frühzeitig konnte in einem Vergleich von insgesamt sechs verschiedenen Modellen für interaktive Systeme das *erweiterte Modell eines Mensch-Maschine-Systems* als geeignete Basis für Touchscreensysteme identifiziert und entsprechend konkretisiert werden (vgl. Abschnitt 2.2). Das daraus entstandene Basismodell für Touchscreensysteme teilt sich in das Subsystem Mensch, die Benutzungsschnittstelle und das Subsystem Maschine und enthält alle charakteristischen Bestandteile eines Touchscreensystems.

Diese Aufteilung des Basismodells für Touchscreensysteme ermöglichte ebenso systematisch die Darlegung der theoretischen Grundlagen der Touchscreeninteraktion wie die Identifizierung des Forschungsbedarfs. Die an der Touchscreeninteraktion beteiligten Wahrnehmungsmodalitäten des Menschen wurden ebenso in Aufbau, Funktion und Leistungsfähigkeit dargelegt wie die kognitiven Prozesse und die Biomechanik. Ebenso beinhalten die theoretischen Grundlagen die methodischen Grundlagen und allgemeine Empfehlungen zur Gestaltung interaktiver Systeme (vgl. Abschnitt 2.6). Die anhand der dargelegten theoretischen Grundlagen identifizierten Wissenslücken wurden zusammengefasst und daraus konkrete Forschungsfragen abgeleitet. Diese Forschungsfragen umfassten den Einfluss unterschiedlicher technologischer Realisierungsmöglichkeiten der Komponenten des Subsystems Maschine auf die Touchscreeninteraktion (1), die Gebrauchstauglichkeit touchscreenbasierter Interaktionsformen (2), die Dauer und Intensität der Touchscreeninteraktion im Arbeitsumfeld (3), die touchscreeninduzierte Ermüdung des Hand-Arm-Systems (4

und 5) und den Einfluss haptischer Rückmeldungen auf die Interaktion (6, vgl. Abschnitt 2.7). Um die Wissenslücken systematisch zu schließen, wurden entsprechende Analysen und empirische Studien konzipiert und durchgeführt.

So konnte zur Forschungsfrage 1 für jeden Bestandteil eines Touchscreensystems der Einfluss der Technologien auf die Interaktion durch jeweils eine eigene Analyse geklärt werden (vgl. Kapitel 3). Dazu wurden zuerst für die Bestandteile Bilderzeugung (vgl. Abschnitt 3.1), Berührungserfassung (vgl. Abschnitt 3.2), Rückmeldungen (vgl. Abschnitt 3.3) und Softwareplattformen (vgl. Abschnitt 3.4) jeweils spezifische interaktionsbeeinflussende Faktoren identifiziert. Anschließend wurden die unterschiedlichen technischen Realisierungen in Aufbau und Funktion mit Hilfe dieser Kriterien analysiert. Das Ergebnis umfasst zu jedem Bestandteil eine Tabelle mit einer Beurteilung der unterschiedlichen Technologien nach den spezifischen interaktionsbeeinflussenden Faktoren (vgl. Abschnitt 3.5). Diese Tabellen lassen sich sehr leicht zu Entscheidungsmatrizen erweitern und können so für eine gezielte Auswahl einer geeigneten Technologie entsprechend des jeweils vorliegenden Nutzungskontextes angewendet werden.

Die verbliebenen Forschungsfragen 2 bis 6 wurden im Rahmen empirischer Studien gezielt untersucht (vgl. Kapitel 4). Die daraus resultierenden Ergebnisse zeigen, dass im gewählten Versuchsdesign Tippeingaben auf Buttons bei stationären Touchscreensystemen effizienter waren als Slider oder Gesten und zudem die höchste Zufriedenstellung aufwiesen (vgl. Unterabschnitt 4.1.3). Im Arbeitsumfeld werden Touchscreens bereits im großen Maßstab in Form von Kassensystemen eingesetzt, wobei der in zwei Anwendungsfällen beobachtete Anteil der Touchscreeninteraktion während des Kassierens im Mittel zwischen 29 und 41 Prozent der Dauer des gesamten Kassiervorgangs umfasste (vgl. Unterabschnitt 4.2.3). In der explorativen Vorstudie zur Biomechanik konnten die Ermüdung des Hand-Arm-Systems durch die Touchscreeninteraktion nachvollzogen und Delta- sowie Trapezmuskel als beanspruchte Muskulatur anhand einer qualitativen Inhaltsanalyse identifiziert werden (vgl. Unterabschnitt 4.3.3). In der computergestützten Analyse der Biomechanik konnte die beanspruchte Muskulatur objektiv bestätigt werden. Für den statischen Zustand mit reiner Haltungsarbeit offenbarte die Analyse eine Belastung deutlich unterhalb der zulässigen Dauerlastgrenze, so dass eine Ermüdung der Muskulatur eigentlich ausgeschlossen war (vgl. Unterabschnitt 4.4.3). Dies widersprach den Beobachtungen aus der Vorstudie. Als Ursache für diesen Widerspruch wurden die dynamischen Anteile der Bewegungen bei der Touchscreeninteraktion vermutet. Daher wurde eine weitere Studie durchgeführt, bei der die Belastung durch die Touchscreeninteraktion direkt am beanspruchten Muskel mittels Elektromyografie erfasst wurde. Dabei ließen sich keine Erkenntnisse zur touchscreeninduzierten Ermüdung des Hand-Arm-Systems oder deren Einfluss auf die Interaktion gewinnen, so dass den Empfehlungen der DIN EN ISO 9241-420 zu folgen ist (vgl. Unterabschnitt 4.5.5). In der Studie

---

zur Untersuchung des Einflusses der künstlichen haptischen Rückmeldung ließ sich durch deren Einsatz die Blickzuwendung zur Anzeige signifikant verringern und die Effizienz der Interaktion signifikant verbessern (vgl. Unterabschnitt 4.6.3). Mit einer solchen Rückmeldung kann also die Blindbedienbarkeit von Touchscreens verbessert werden.

Zur Herleitung touchscreenspezifischer Gestaltungsempfehlungen (vgl. Kapitel 5) wurde auf die theoretischen Grundlagen (vgl. Kapitel 2), die Ergebnisse der Literaturanalyse der technologischen Realisierungsmöglichkeiten (vgl. Kapitel 3) und die Erkenntnisse der empirischen Untersuchungen der Touchscreeninteraktion zurückgegriffen. Die Gliederung des Basismodells für Touchscreensysteme ermöglichte die systematische Herleitung und Strukturierung der Gestaltungsempfehlungen. Die auf diesem Weg erarbeiteten Gestaltungsempfehlungen wurden mit dem Basismodell für Touchscreensysteme und dem menschenzentrierten Gestaltungsprozess (vgl. Unterabschnitt 2.6.1) zur gemeinsamen Verwendung bei der Gestaltung von Touchscreensystemen zusammengeführt (vgl. Abschnitt 5.3). Die Anwendbarkeit des so entstandenen Gestaltungsansatzes und der touchscreenspezifischen Gestaltungsempfehlungen konnte abschließend an einem Praxisbeispiel erfolgreich demonstriert werden (vgl. Abschnitt 5.4).

Die erarbeiteten Gestaltungsempfehlungen berücksichtigen die Besonderheiten der Touchscreentechnologien und Touchscreeninteraktion und ergänzt so die bestehenden allgemeinen Gestaltungsempfehlungen sowie die hersteller- und softwarespezifischen Design Guides um touchscreenspezifische Besonderheiten. Die Ergebnisse dieser Arbeit erleichtern damit sowohl die systematische Gestaltung als auch die formativen analytischen Evaluierung touchscreenbasierter Systeme im Rahmen des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses nach DIN EN ISO 9241-210.

Das Ziel dieser Arbeit konnte im Wesentlichen erreicht werden. Einzig die Forschungsfragen zur touchscreeninduzierten Ermüdung des Hand-Arm-Systems und daraus abgeleiteten Empfehlungen zur Dauer der Interaktion und notwendiger Erholungspausen konnte aus den bereits diskutierten Gründen (vgl. Unterabschnitt 4.5.4) nicht beantwortet werden. Dennoch bietet der erarbeitete ganzheitliche Gestaltungsansatz für Touchscreensysteme eine praxistaugliche Grundlage für eine systematische Gestaltung und Evaluierung entsprechender Systeme.

Da der sogenannte „Gorillaarm“ mit zunehmender Verbreitung von Touchscreens an klassischen Computerarbeitsplätzen vermehrt auftreten und damit zu gesundheitlichen Beschwerden der Arbeitnehmer führen dürfte, bieten sich hierzu weiterführende Studien an. Aufgrund dieses ergonomischen Problems kann allerdings angenommen werden, dass selbst im Fall der standardmäßigen Ausstattung von Arbeitsplätzen mit Touchscreens die klassischen Eingabegeräte nicht obsolet werden.



Die Wirksamkeit haptischer Rückmeldungen konnte zwar nachgewiesen werden, ist aber bisher kaum in kommerziellen Touchscreensystemen zu finden. Bevor die Benutzer davon profitieren können, stellt die flächendeckende Integration von entsprechenden elektromechanischen Systemen in Touchscreensysteme eine Herausforderung für die Gerätehersteller und Anbieter von Softwareplattformen dar. Der in Abschnitt 4.6 verwendete Prototyp eines haptischen Touchpads ist seit dem Jahr 2014 als Serienprodukt in einem Fahrzeug verfügbar (Continental 2014). Continental (2015) hat auf Basis dieser Technologie auch einen Touchscreen mit aktiver haptischer Rückmeldung entwickelt, der im Jahr 2017 für Fahrzeughersteller zur Verfügung stehen soll. Fahrzeughersteller können auch auf einen vibrotaktilen Touchscreen von Bosch (2016) zurückgreifen. Dieser war bei Abgabe der Arbeit in keinem Serienfahrzeug zu finden. Die von Immersion (2012) für Systementwickler unter der Bezeichnung „TouchSense“ angebotene Hardware zur Erweiterung von Touchscreens um haptische Rückmeldungen war bei Abgabe dieser Arbeit bereits nicht mehr verfügbar. Produkte, die diese Technologie nutzen, sind nur noch bei wenigen Anbietern erhältlich (z. B. Densitron Technologies 2016). Unter dem Namen „TouchSense“ bietet Immersion (2016) nur noch Software für mobile Geräte zur Erzeugung haptischer Rückmeldungen an.

Die neuen drucksensitiven Touchscreens ermöglichen neue Interaktionsformen, die bisher für die Benutzer unbekannt waren und noch wenig erforscht sind. Aufgrund der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Touchscreeninteraktion, der intuitiven Interaktion, der flexiblen Gestaltungsmöglichkeiten der Benutzungsschnittstelle und der einfachen Integration der benötigten Hardwarekomponenten bei der Systementwicklung werden Touchscreens weiterhin für die schnelle und einfache Interaktion mit technischen Systemen die erste Wahl sein.

# Literatur

ABOWD, G. D. ; BEALE, R.: Users, systems and interfaces – a unifying framework for interaction. In: DIAPER, D. ; HAMMOND, N. (Hrsg.): *People and Computers VI: Usability Now: Proceedings of the HCI '91 Conference (Edinburgh 1991)*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991, S. 73–87

ADVANCED REALTIME TRACKING (Hrsg.): *ARTTRACK2*. 6. Juni 2013. URL: <http://web.archive.org/web/20130606024820/http://www.ar-tracking.com:80/products/tracking-systems/arttrack-system/arttrack2> (besucht am 11.02.2018)

AFFECTIVA (Hrsg.): *Q-Sensor 2.0 Datasheet*. 13. Apr. 2012. URL: <http://web.archive.org/web/20120526135140/http://www.affectiva.com:80/assets/affectiva-qsensor-datasheet.pdf> (besucht am 11.02.2018)

AHLSTRÖM, B. ; LENMAN, S. ; MARMOLIN, T.: Overcoming touchscreen user fatigue by workplace design. In: WIXON, D. R. (Hrsg.): *Posters and Short Talks of the 1992 SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Monterey 1992)*. CHI '92. New York: ACM, 1992, S. 101–102

ALLEN, R. B.: Mental Models and User Models. In: HELANDER, M. ; LANDAUER, T. K. ; PRABHU, P. V. (Hrsg.): *Handbook of Human-Computer Interaction*. 2. Aufl. Amsterdam: Elsevier, 1997. Kap. 3, S. 49–63

AMAZON (Hrsg.): *Der neue Kindle Paperwhite*. 29. Aug. 2014. URL: <http://www.amazon.de/dp/B00JG8GBDM> (besucht am 29.08.2014)

AMENT, W. ; BONGA, G. J. J. ; HOF, A. L. ; VERKERKE, G. J.: EMG median power frequency in an exhausting exercise. In: *Journal of Electromyography and Kinesiology* 3 (1993) Nr. 4, S. 214–220

AMUNDSON, K.: Electrophoretic Displays. In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 3. Berlin: Springer, 2012. Kap. 8.1.1, S. 1699–1713

ANDERSON, J. R.: *Cognitive Psychology and its Implications*. 7. Aufl. New York: Worth, 2009

- APPLE (Hrsg.): *iOS Human Interface Guidelines*. 10. Nov. 2015. URL: <https://developer.apple.com/library/ios/documentation/UserExperience/Conceptual/MobileHIG/> (besucht am 10.11.2015)
- APPLE (Hrsg.): *iPhone 6S – Technische Daten*. 10. Nov. 2015. URL: <http://www.apple.com/at/iphone-6s/specs/> (besucht am 10.11.2015)
- ASUS (Hrsg.): *ET2011EGT – Specifications*. 20. Nov. 2015. URL: <http://www.asus.com/AllinOne-PCs/ET2011EGT/specifications/> (besucht am 20.11.2015)
- AVIZZANO, C. A. ; FRISOLI, A. ; BERGAMASCO, M.: Design guidelines for generating force feedback on fingertips using haptic interfaces. In: GRUNWALD, M. (Hrsg.): *Human Haptic Perception – Basics and Applications*. Basel: Birkhäuser, 2008. Kap. 32, S. 393–410
- AXIS COMMUNICATIONS AB (Hrsg.): *Axis 214 PTZ Netzwerkkamera*. 16. Juni 2013. URL: [http://www.axis.com/de/products/cam\\_214/](http://www.axis.com/de/products/cam_214/) (besucht am 16.06.2013)
- BABER, C.: *Beyond the Desktop – Designing and Using Interaction Devices*. San Diego: Academic Press, 1997
- BADDELEY, A.: The magical number seven – Still magic after all these years?. In: *Psychological Review* (1994)
- BADTKE, G. ; BITTMANN, F. ; BÖHMER, D.: *Lehrbuch der Sportmedizin*. 4. Aufl. Stuttgart: UTB, 1999
- BALLMER, S.: *CES 2010: A Transforming Trend – The Natural User Interface*. 8. Jan. 2010. URL: [http://www.huffingtonpost.com/steve-ballmer/ces-2010-a-transforming-t\\_b\\_416598.html?](http://www.huffingtonpost.com/steve-ballmer/ces-2010-a-transforming-t_b_416598.html?) (besucht am 07.10.2013)
- BANTER, B.: Touch Screens and Touch Surfaces are Enriched by Haptic Force-Feedback. In: *Information Display* (2010) Nr. 3, S. 26–30
- BASMAJIAN, J. V. ; DE LUCA, C. J.: *Muscles alive – their function revealed by electromyography*. 5. Aufl. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins, 1985
- BAU, O. ; POUPYREV, I. ; ISRAR, A. ; HARRISON, C.: TeslaTouch – electrovibration for touch surfaces. In: PERLIN, K. ; CZERWINSKI, M. ; MILLER, R. (Hrsg.): *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology (New York 2010)*. UIST '10. New York: ACM, 2010, S. 283–292
- BAUER, J. ; EBERT, A.: Virtual Buttons for Eyes-Free Interaction – A Study. In: ABASCAL, J. ; BARBOSA, S. ; FETTER, M. ; GROSS, T. ; PALANQUE, P. ; WINCKLER, M. (Hrsg.): *Human-Computer Interaction — INTERACT 2015 – Proceedings Part I (Bamberg 2015)*. Bd. 9296. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2015, S. 47–54

- BECK, T. W. ; STOCK, M. S. ; DEFREITAS, J. M.: Shifts in EMG spectral power during fatiguing dynamic contractions. In: *Muscle & Nerve* 50 (2014) Nr. 1, S. 95–102
- BECK, T. W. ; YE, X. ; WAGES, N. P.: Local muscle endurance is associated with fatigue-based changes in electromyographic spectral properties, but not with conduction velocity. In: *Journal of Electromyography and Kinesiology* 25 (2015) Nr. 3, S. 451–456
- BEDERSON, B. B. ; BOLTMAN, A.: Does Animation Help Users Build Mental Maps of Spatial Information?. In: KEIM, D. ; WILLS, G. (Hrsg.): *INFOVIS '99 – Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (San Francisco 1999)*. Washington: IEEE, 1999, S. 28–35
- BI, X. ; GROSSMAN, T. ; MATEJKA, J. ; FITZMAURICE, G.: Magic Desk – Bringing Multi-Touch Surfaces into Desktop Work. In: TAN, D. ; FITZPATRICK, G. ; GUTWIN, C. ; BEGOLE, B. ; KELLOGG, W. A. (Hrsg.): *CHI '11 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Vancouver 2011)*. New York: ACM, 2011, S. 2511–2520
- BIEDERMAN, I.: Recognition-by-Components – A Theory of Human Image Understanding. In: *Psychological Review* 94 (1987) Nr. 2, S. 115–147
- BIO-PAC SYSTEMS (Hrsg.): *BioPac BioNomadix 2CH Wireless EMG Amplifier – BN-EMG2*. 16. Juni 2013. URL: <http://www.biopac.com/BioNomadix-2Ch-Wireless-EMG> (besucht am 16.06.2013)
- BIO-PAC SYSTEMS (Hrsg.): *BioPac BioNomadix Accelerometer Amplifier – BN-ACCL3*. 16. Juni 2013. URL: <http://www.biopac.com/BioNomadix-Wireless-Accelerometer> (besucht am 16.06.2013)
- BIO-PAC SYSTEMS (Hrsg.): *BioPac MP150 Data Acquisition System*. 16. Juni 2013. URL: <http://www.biopac.com/data-acquisition-analysis-system-mp150-system-windows> (besucht am 16.06.2013)
- BLACKLER, A. L. ; HURTIENNE, J.: Towards a unified view of intuitive interaction : definitions, models and tools across the world. In: *MMI-Interaktiv* 13 (2007), S. 36–54. URL: <http://eprints.qut.edu.au/19116/>
- BLANKENBACH, K.: Ambient Light. In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 4. Berlin: Springer, 2012. Kap. 11.3.4, S. 2383–2413
- BLANKENBACH, K.: Display Technology-Dependent Issues. In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 4. Berlin: Springer, 2012. Kap. 11.4.1, S. 2417–2426
- BLANKENBACH, K.: Temporal Effects. In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 4. Berlin: Springer, 2012. Kap. 11.3.2, S. 2345–2365

BLANKENBACH, K.: Viewing Angle. In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 4. Berlin: Springer, 2012. Kap. 11.3.3, S. 2367–2381

BLATTNER, A. ; BENGLER, K. ; HAMBERGER, W.: Interaktionsarten eines Touchpads mit haptischer Rückmeldung zur Bedienung eines Fahrerinformationssystems. In: VDI/VDE-GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK (Hrsg.): *6. Fachtagung USEWARE 2012: Mensch-Maschine-Interaktion (Kaiserslautern 2012)*. Bd. 2179. VDI-Berichte. Düsseldorf: VDI, 2012, S. 219–228

BLATTNER, A. ; SPIESS, R. ; BENGLER, K. ; HAMBERGER, W.: Sichere Gestaltung des Fahrer-Arbeitsplatzes durch effiziente und intuitive Bedienung eines Fahrerinformationssystems via Touchpad mit haptischer Rückmeldung. In: GESELLSCHAFT FÜR ARBEITSWISSENSCHAFT E. V. (Hrsg.): *Gestaltung nachhaltiger Arbeitssysteme: 58. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Kassel 2012)*. Dortmund: GfA-Press, 2012, S. 273–277

BLOJ, M. ; HEDRICH, M.: Color Perception. In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 1. Berlin: Springer, 2012. Kap. 2.2.6, S. 171–178

BOETZER, J. ; RAHIMI, M. ; VOGT, M. ; WENDT, P. ; K.V.LUCK: Gestenbasierte Interaktion mit Hilfe von Multitouch und Motiontracking. In: CLEVE, J. (Hrsg.): *Proceedings der 6. Wismarer Wirtschaftsinformatiktage*. WIWITA 2008. Wismar: Hochschule Wismar, 2008, S. 38–49. URL: <http://users.informatik.haw-hamburg.de/~ubicomp/arbeiten/papers/WIWITA2008.pdf>

BONATO, P. ; ROY, S. H. ; KNAFLITZ, M. ; DE LUCA, C. J.: Time-frequency parameters of the surface myoelectric signal for assessing muscle fatigue during cyclic dynamic contractions. In: *Biomedical Engineering* 48 (2001) Nr. 7, S. 745–753

BORG, G. A. V.: Psychophysical bases of perceived exertion. In: *Medicine & Science in Sports & Exercise* 14 (1982) Nr. 5, S. 377–381

BORNSCHEIN, J. ; PRESCHER, D. ; SCHMIDT, M. ; WEBER, G.: Nicht-visuelle Interaktion auf berührungsempfindlichen Displays. In: SCHLEGEL, T.: *Multi-Touch – Interaktion durch Berührung*. Berlin: Springer, 2013. Kap. 15, S. 319–338

BORTZ, J. ; DÖRING, N.: *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. 4. Aufl. Heidelberg: Springer, 2006

BOSCH (Hrsg.): *neoSense is the touchscreen you can sense*. 31. März 2016. URL: <http://www.bosch-mobility-solutions.de/de/produkte-und-services/nutzfahrzeuge/human-machine-interface/anzeigesysteme/neosense/> (besucht am 11.02.2018)

- BOYD, G.: LCD Backlights. In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 3. Berlin: Springer, 2012. Kap. 7.5.1, S. 1609–1623
- BRAGDON, A. ; NELSON, E. ; LI, Y. ; HINCKLEY, K.: Experimental analysis of touch-screen gesture designs in mobile environments. In: TAN, D. ; FITZPATRICK, G. ; GUTWIN, C. ; BEGOLE, B. ; KELLOGG, W. A. (Hrsg.): *CHI '11 – Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Vancouver 2011)*. New York: ACM, 2011, S. 403–412
- BRECHER, C. ; KOLSTER, D. ; HERFS, W.: Audio-Tactile Feedback Mechanisms for Multi-Touch HMI Panels of Production Engineering Systems. In: *International Journal of Automation Technology* 6 (2012) Nr. 3, S. 369–376
- BROOKE, J.: SUS – A quick and dirty usability scale. In: JORDAN, P. W. ; THOMAS, B. ; WEERDMEESTER, B. A. ; MCCLELLAND, I. (Hrsg.): *Usability evaluation in industry*. London: Taylor und Francis, 1996, S. 189–193
- BUBB, H. ; SCHMIDTKE, H.: Analyse der Systemstruktur. In: SCHMIDTKE, H. (Hrsg.): *Lehrbuch der Ergonomie*. 2. Aufl. München: Hanser, 1981, S. 263–285
- BULL, G. ; BULL, G.: Looking At Display Technologies. In: *Learning & Leading with Technology* 32 (2005) Nr. 6, S. 40–43
- BURGESS-LIMERICK, R. ; PLOOY, A. ; ANKRUM, D. R.: The effect of imposed and self-selected computer monitor height on posture and gaze angle. In: *Clinical Biomechanics* 13 (1998) Nr. 8, S. 584–592
- BURNETT, G. E. ; PORTER, J. M.: Ubiquitous computing within cars – designing controls for non-visual use. In: *Human-Computer Studies* 55 (2001) Nr. 4, S. 521–531
- BUSINESS WIRE (Hrsg.): *E Ink Announces Advanced Color ePaper*. 24. Mai 2016. URL: <http://www.businesswire.com/news/home/20160524006209/en/Ink-Announces-Advanced-Color-ePaper-Breakthrough-Technology> (besucht am 25.05.2016)
- BÜTZLER, J. ; VETTER, S. ; JOCHEMS, N. ; SCHLICK, C. M.: Bivariate pointing movements on large touch screens – Investigating the validity of a refined Fitts' Law. In: *Work* (2012) Nr. 41, S. 3526–3532
- BUXTON, W.: A three-state model of graphical input. In: *Proceedings of the IFIP TC13 Third International Conference on Human-Computer Interaction*. INTERACT '90. Amsterdam: North-Holland Publishing Co., 1990, S. 449–456
- CAMPENHAUSEN, C. von: *Die Sinne des Menschen. Einführung in die Psychophysik der Wahrnehmung*. 2. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme, 1993
- CANNONICAL (Hrsg.): *Ubuntu Mobile and Embedded Guide – Designing For Finger UIs*. 11. Nov. 2015. URL: <https://help.ubuntu.com/community/UMEGuide/DesigningForFingerUIs> (besucht am 11.11.2015)



CARLSON, N. R.: *Foundations Of Physiological Psychology*. 6. Aufl. Boston: Pearson, 2005

CARMODY, T.: *Why 'Gorilla Arm Syndrome' Rules Out Multitouch Notebook Displays*. 21. Okt. 2010. URL: <http://www.wired.com/gadgetlab/2010/10/gorilla-arm-multitouch> (besucht am 07. 11. 2013)

CHALLIS, B. P. ; EDWARDS, A. D.: Design principles for tactile interaction. In: BREWSTER, S. ; MURRAY-SMITH, R. (Hrsg.): *Haptic Human-Computer Interaction*. Bd. 2058. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2001, S. 17–24

CHANG, R. ; WANG, F. ; YOU, P.: A Survey on the Development of Multi-touch Technology. In: LUO, Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 2010 Asia-Pacific Conference on Wearable Computing Systems (APWCS 2010)*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2010, S. 363–366

CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 1. Berlin: Springer, 2012

CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 3. Berlin: Springer, 2012

CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 4. Berlin: Springer, 2012

CHOI, S. ; KUCHENBECKER, K. J.: Vibrotactile Display – Perception, Technology, and Applications. In: *Proceedings of the IEEE* (2012) Nr. 99, S. 1–12

CHOURASIA, A. O. ; WIEGMANN, D. A. ; CHEN, K. B. ; IRWIN, C. B. ; SESTO, M. E.: Effect of Sitting or Standing on Touch Screen Performance and Touch Characteristics. In: *Human Factors* 55 (2013) Nr. 4, S. 789–802

CONTINENTAL (Hrsg.): *Daimler honors Continental for Touchpad in New Mercedes-Benz C-Class*. 28. Feb. 2014. URL: <https://www.continental-corporation.com/en/press/press-releases/2014-02-28-daimler-104496> (besucht am 11.02.2018)

CONTINENTAL (Hrsg.): *Mehr Sicherheit und Komfort im Auto – Continental präsentiert Touch-Display mit aktiver haptischer Rückmeldung*. 28. Mai 2015. URL: <https://www.continental-corporation.com/de/presse/pressemitteilungen/2015-05-28-innovative-search-haptics-103508> (besucht am 11.02.2018)

COOPER, A. ; REIMANN, R. ; CRONIN, D.: *About Face 3 – The Essentials of Interaction Design*. 3. Aufl. Indianapolis: Wiley, 2007

COURAGE, C. ; REDISH, J. ; WIXON, D.: Task Analysis. In: SEARS, A. ; JACKO, J. A. (Hrsg.): *The Human-Computer Interaction Handbook – Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications*. 2. Aufl. Human Factors and Ergonomics. New York: Lawrence Erlbaum, 2008. Kap. 48, S. 927–947

- COWAN, N.: The magical number 4 in short-term memory – A reconsideration of mental storage capacity. In: *Behavioral and Brain Sciences* (2000)
- CRAIG, J. C. ; JOHNSON, K. O.: The Two-Point Threshold – Not a Measure of Tactile Spatial Resolution. In: *Current Directions in Psychological Science* 9 (2000) Nr. 1, S. 29–32
- CRAIK, K.: *The Nature of Explanation*. Cambridge: University Press, 1943
- CZAJA, S. J. ; NAIR, S. N.: Human Factors Engineering and Systems Design. In: SALVENDY, G. (Hrsg.): *Handbook of Human Factors and Ergonomics*. 4. Aufl. Hoboken: Wiley, 2012. Kap. 2, S. 38–56
- DAHLM, M.: *Grundlagen der Mensch-Computer-Interaktion*. München: Pearson Studium, 2006
- DASSAULT SYSTÈMES (Hrsg.): *3D-CAD-Konstruktionssoftware – CATIA*. 7. Feb. 2014. URL: <http://www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/> (besucht am 07.02.2014)
- DAVIES, M. R. ; REISMAN, S. S. : Time frequency analysis of the electromyogram during fatigue. In: MASI, J. ; DAVIS, R. ; FOX, M. ; PEURA, R. (Hrsg.): *Proceedings of the 20th Annual Northeast Bioengineering Conference (Springfield 1994)*. IEEE, 1994, S. 93–95
- DENSITRON TECHNOLOGIES (Hrsg.): *DensiTouch Haptic Touch Screen Displays*. 31. März 2016. URL: [http://www.densitron.com/displays/haptic\\_touch\\_screen.aspx](http://www.densitron.com/displays/haptic_touch_screen.aspx) (besucht am 31.03.2016)
- DESSOIR, M.: Über den Hautsinn. In: *Archiv für Anatomie und Physiologie, Physiologische Abteilung* (1892), S. 175–339
- DEUTSCHE BAHN (Hrsg.): *Automaten*. 13. März 2016. URL: [http://www.db-vertrieb.com/db\\_vertrieb/view/leistungen/vertriebskanaele/automat.shtml](http://www.db-vertrieb.com/db_vertrieb/view/leistungen/vertriebskanaele/automat.shtml) (besucht am 13.03.2016)
- DIFFRIENT, N. ; TILLEY, A. R. ; BARDAGJY, J. C.: *Humanscale – a portfolio of information*. 2. Aufl. Cambridge: MIT Press, 1978
- DILLING, P.: Nur Augen für die Straße: Bedienung von Zusatzfunktionen in Autos soll sicherer und komfortabler werden. In: *Hessische/Niedersächsische Allgemeine* (28. Juni 2013)
- DIX, A. J. ; FINLAY, J. E. ; ABOWD, G. D. ; BEALE, R.: *Human-Computer Interaction*. 3. Aufl. Harlow: Pearson Education, 2004



DOERRER, C.: *Entwurf eines elektromechanischen Systems für flexibel konfigurierbare Eingabefelder mit haptischer Rückmeldung*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2003. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:tuda-tuprints-4351>

DOMHARDT, M. ; SCHMIDT, L.: Brain-Computer-Interface – Von der Spielesteuerung zur Mensch-Computer-Interaktion?. In: GESELLSCHAFT FÜR ARBEITSWISSENSCHAFT E. V. (Hrsg.): *Arbeit, Beschäftigungsfähigkeit und Produktivität im 21. Jahrhundert: 55. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Dortmund 2009)*. Dortmund, Deutschland: GfA-Press, 2009, S. 105–108

DOMHARDT, M. ; SCHMIDT, L.: Analyse technologieabhängiger Interaktionsmöglichkeiten bei berührungsempfindlichen Anzeigen. In: VDI/VDE-GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK (Hrsg.): *6. VDI-Fachtagung USEWARE 2012 – Mensch-Maschine-Interaktion (Kaiserslautern 2012)*. Bd. Nachtrag zu den VDI-Berichte 2179. Kaiserslautern, Deutschland: VDI, 2012, S. 1–11

DOMHARDT, M. ; SCHMIDT, L.: Leitfadengestützte Modellierung des Nutzungskontextes. In: GESELLSCHAFT FÜR ARBEITSWISSENSCHAFT E. V. (Hrsg.): *Gestaltung nachhaltiger Arbeitssysteme: 58. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Kassel 2012)*. Kassel, Deutschland: GfA-Press, 2012, S. 487–490

DOMHARDT, M. ; SCHMIDT, L.: Ergonomischer Schriftgrad für elektronische Anzeigen. In: SUSANNE MAASS UND RAINER MALAKA, S. B. und (Hrsg.): *Mensch & Computer 2013 – Interaktive Vielfalt (Bremen 2013)*. Bremen, Deutschland: Oldenbourg, 2013, S. 231–240. URL: <http://dl.mensch-und-computer.de:8080/handle/123456789/3320>

DOMHARDT, M. ; SCHMIDT, L.: Modellierung der Biomechanik des Hand-Arm-Komplexes für die Touchscreen-Interaktion. In: GESELLSCHAFT FÜR ARBEITSWISSENSCHAFT E. V. (Hrsg.): *Chancen durch Arbeits-, Produkt- und Systemgestaltung – Zukunftsfähigkeit für Produktions- und Dienstleistungsunternehmen: 59. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Krefeld 2013)*. Krefeld, Deutschland: GfA-Press, 2013, S. 229–232

DOMHARDT, M. ; SCHMIDT, L.: Nutzerbasierte Evaluation des Prototyps einer masentauglichen Ladestation für Elektromobile. In: GESELLSCHAFT FÜR ARBEITSWISSENSCHAFT E. V. (Hrsg.): *Chancen durch Arbeits-, Produkt- und Systemgestaltung – Zukunftsfähigkeit für Produktions- und Dienstleistungsunternehmen: 59. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Krefeld 2013)*. Krefeld, Deutschland: GfA-Press, 2013, S. 665–668

DOMHARDT, M. ; TUNCA, E. ; ZOLLER, I. ; LOTZ, P. ; SCHMIDT, L.: Evaluation eines haptischen Touchpads für die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. In: BRANDENBURG, E. ; DORIA, L. ; GROSS, A. ; GÜNZLER, T. ; SMIESZEK, H. (Hrsg.): *Grundlagen und*

*Anwendungen der Mensch-Maschine-Interaktion – 10. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme (Berlin 2013)*. Berlin, Deutschland: Universitätsverlag der TU Berlin, 2013, S. 9–18. URL: <http://opus4.kobv.de/opus4-tuberlin/frontdoor/index/index/docId/4289>

DOODLE (Hrsg.): *Doodle vereinfacht die Terminfindung*. 16. Juni 2013. URL: <http://www.doodle.com/> (besucht am 16.06.2013)

DOUGLAS, G. P. ; LANDIS-LEWIS, Z. ; HOCHHEISER, H.: Simplicity and usability – lessons from a touchscreen electronic medical record system in Malawi. In: *Interactions* 18 (2011) Nr. 6, S. 50–53

DUNN, O. J.: Multiple Comparisons among Means. In: *Journal of the American Statistical Association* 56 (1961) Nr. 293, S. 52–64

DUTKE, S.: *Mentale Modelle – Konstrukte des Wissens und Verstehens – kognitionspsychologische Grundlagen für die Software-Ergonomie*. Göttingen: Verlag für Angewandte Psychologie, 1994

EASON, K. D.: Ergonomic perspectives on advances in humancomputer interaction. In: *Ergonomics* 34 (1991) Nr. 6, S. 721–741

EATON, J. W. ; BATEMAN, D. ; HAUBERG, S. ; WEHBRING, R.: *GNU Octave version 4.0.0*. 2. Okt. 2015. URL: <https://www.gnu.org/software/octave/> (besucht am 02.10.2015)

EID, M. ; GOLLWITZER, M. ; SCHMITT, M.: *Statistik und Forschungsmethoden*. 2. Aufl. Weinheim: Beltz, 2011

ELO TOUCH SOLUTIONS (Hrsg.): *1541L 15-inch LCD Open-Frame Touchmonitor*. 24. Okt. 2013. URL: <http://www.elotouch.com/products/lcds/1541L/> (besucht am 24.10.2013)

ENOKA, R. M.: *Neuromechanics of human movement*. 4. Aufl. Champaign: Human Kinetics, 2008

EPIPHAN SYSTEMS (Hrsg.): *Epiphan VGA2USB*. 16. Juni 2013. URL: <http://www.epiphan.com/products/frame-grabbers/vga2usb/> (besucht am 16.06.2013)

FALLER, A. ; SCHÜNKE, M.: *Der Körper des Menschen – Grafiken für Unterricht und Vorlesung*. Stuttgart: Thieme, 2008

FAUCONNIER, G. ; TURNER, M.: *The Way We Think – Conceptual Blending and The Mind's Hidden Complexities*. New York: Basic Books, 2002

FAULHUBER, M.: *This is toolbox EMG Wavelet v1.00*. 16. Nov. 2012. URL: <http://www.univie.ac.at/nuhag-php/mmodule/download.php?id=37> (besucht am 02.10.2015)

- FAYTECH (Hrsg.): *Bedienungsanleitung Faytech 1210 BL*. 25. Aug. 2009. URL: <http://web.archive.org/web/20090920094021/http://www.faytech.de:80/downloads/manual/1012EDdownload20090825.pdf> (besucht am 11.02.2018)
- FERRIS, T. K. ; SARTER, N. B.: Cross-Modal Links Among Vision, Audition, and Touch in Complex Environments. In: *Human Factors* 50 (2008) Nr. 1, S. 17–26
- FISHER, J.: Defining the novice user. In: *Behaviour & Information Technology* 10 (1991) Nr. 5, S. 437–441
- FITTS, P. 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
- FLYNN, J. M. ; HOLMES, J. D. ; ANDREWS, D. M.: The effect of localized leg muscle fatigue on tibial impact acceleration. In: *Clinical Biomechanics* 19 (2004) Nr. 7, S. 726–732
- FREIVALDS, A.: *Biomechanics of the Upper Limbs – Mechanics, Modeling and Musculoskeletal Injuries*. 2. Aufl. Boca Raton: CRC Press, 2011
- FREIWALD, J. ; BAUMGART, C. ; KONRAD, P.: *Einführung in die Elektromyographie: Sport – Prävention – Rehabilitation*. Balingen: Spitta, 2007
- GALITZ, W. O.: *The Essential Guide to User Interface Design – An Introduction to GUI Design Principles and Techniques*. 3. Aufl. Indianapolis: Wiley, 2007
- GALLEY-TAYLOR, M. ; FERGUSON, A. ; HAYWARD, G.: Role of Standards in Design. In: KARWOWSKI, W. ; SOARES, M. M. ; STANTON, N. A. (Hrsg.): *Human Factors and Ergonomics in Consumer Product Design – Methods and Techniques*. Boca Raton: CRC Press, 2011. Kap. 8, S. 119–131
- GARHART, C. ; LAKSHMINARAYANAN, V.: Anatomy of the Eye. In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 1. Berlin: Springer, 2012. Kap. 2.1.1, S. 74–83
- GEBHARDT, H. J. ; SCHÄFER, A. ; LANG, K.-H. ; SCHULTETUS, W.: *Anthropometrische Daten in Normen*. KAN-Bericht 44. Bonn: Hartmann Satz + Druck /mignon Verlag, 2009
- GELDARD, F. A.: Some neglected possibilities of communication. In: *Science* 131 (1960) Nr. 3413, S. 1583–1588
- GERR, F. ; MARCUS, M. ; MONTEIL, C.: Epidemiology of musculoskeletal disorders among computer users – lesson learned from the role of posture and keyboard use. In: *Journal of Electromyography and Kinesiology* 14 (2004) Nr. 1, S. 25–31

- GESCHEIDER, G. A. ; WRIGHT, J. H. ; VERRILLO, R. T.: *Information-Processing Channels in the Tactile Sensory System – A Psychophysical and Physiological Analysis*. Scientific Psychology Series. New York: Taylor & Francis, 2009
- GESELLSCHAFT FÜR ARBEITSWISSENSCHAFT E.V. (Hrsg.): *Arbeit in komplexen Systemen – Digital, vernetzt, human?!: 62. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Aachen 2016)*. Dortmund: GfA-Press, 2016
- GIBSON, J. J.: The Theory of Affordances. In: SHAW, R. ; BRANSFORD, J. (Hrsg.): *Perceiving, Acting, and Knowing*. New York: Lawrence Erlbaum, 1977. Kap. 3, S. 67–82
- GILCHRIST, A. L. ; COWAN, N. ; NAVEH-BENJAMIN, M.: Working memory capacity for spoken sentences decreases with adult ageing: Recall of fewer but not smaller chunks in older adults. In: *Memory* 16 (2008) Nr. 7, S. 773–787
- GLEN SANFORD (Hrsg.): *Apple History – iPad*. 15. Juli 2015. URL: <http://apple-history.com/ipad> (besucht am 13.03.2016)
- GOLDSTEIN, E. B.: *Cognitive Psychology – Connecting Mind, Research and Everyday Experience*. 3. Aufl. Belmont: Wadsworth, 2010
- GOLDSTEIN, E. B.: *Sensation and Perception*. 8. Aufl. Belmont: Wadsworth, 2010
- GOODMAN, T.: Overview of the Photometric Characterisation of Visual Displays. In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 1. Berlin: Springer, 2012. Kap. 2.4.3, S. 243–255
- GOOGLE (Hrsg.): *Up and running with material design*. 10. Nov. 2015. URL: <http://developer.android.com/design/index.html> (besucht am 10.11.2015)
- GREENSTEIN, J. S.: Pointing Devices. In: HELANDER, M. ; LANDAUER, T. K. ; PRABHU, P. V. (Hrsg.): *Handbook of Human-Computer Interaction*. 2. Aufl. Amsterdam: Elsevier, 1997. Kap. 55, S. 1317–1348
- GRUNWALD, M. (Hrsg.): *Human Haptic Perception – Basics and Applications*. Basel: Birkhäuser, 2008
- HA, V. ; INKPEN, K. M. ; MANDRYK, R. L. ; WHALEN, T.: Direct intentions – the effects of input devices on collaboration around a tabletop display. In: FJELD, M. ; TAKATSUKA, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 1st IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (TableTop 2006)*. Adelaide: IEEE Computer Society, 2006
- HALE, K. S. ; STANNEY, K. M.: Deriving Haptic Design Guidelines from Human Physiological, Psychophysical, and Neurological Foundations. In: *Computer Graphics and Applications* 24 (2004) Nr. 2, S. 33–39

- HAN, J. Y.: Low-Cost Multi-Touch Sensing through Frustrated Total Internal Reflection. In: BAUDISCH, P. ; CZERWINSKI, M. ; OLSEN, D. (Hrsg.): *UIST '05 – Proceedings of the 18th annual ACM symposium*. User interface software and technology 429052. New York: ACM Press, 2005, S. 115–118
- HAN, J. Y.: Multi-touch interaction wall. In: FINNEGAN, J. ; CRAVEN, T. (Hrsg.): *ACM SIGGRAPH 2006 Emerging technologies (Boston 2006)*. New York: ACM, 2006, S. 115–118
- HART, S. G. ; STAVELAND, L. E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In: HANCOCK, P. A. ; MESHKATI, N. (Hrsg.): *Human mental workload*. Advances in Psychology. Amsterdam: North Holland, 1988, S. 139–183
- HARTSON, R. ; PYLA, P. S.: *The UX Book – Process and Guidelines for Ensuring a Quality User Experience*. Amsterdam: Morgan Kaufman, 2012
- HEER, J. ; ROBERTSON, G. G.: Animated Transitions in Statistical Data Graphics. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 13 (2007) Nr. 6, S. 1240–1247
- HEIKENFELD, J. ; DRZAIC, P. ; YEO, J.-S. ; KOCH, T.: Review Paper: A critical review of the present and future prospects for electronic paper. In: *Journal of the Society for Information Display* 19 (2011) Nr. 2, S. 129
- HEINECKE, A. M.: *Mensch-Computer-Interaktion*. VERALTET Nachfolger Heinecke2012. München: Hanser, 2004
- HEINECKE, A. M.: *Mensch-Computer-Interaktion – Basiswissen für Entwickler und Gestalter*. 2. Aufl. Heidelberg: Springer, 2012
- HEISE MEDIEN (Hrsg.): *Analysten – Touchscreen-PCs auf dem Vormarsch*. 27. Nov. 2013. URL: <http://heise.de/-2054949> (besucht am 14.03.2016)
- HELANDER, M.: *A Guide to Human Factors and Ergonomics*. 2. Aufl. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006
- HELANDER, M. ; LANDAUER, T. K. ; PRABHU, P. V. (Hrsg.): *Handbook of Human-Computer Interaction*. 2. Aufl. Amsterdam: Elsevier, 1997
- HENRY, A.: *Taska – Rich To-Do Lists for the iPad*. 5. Aug. 2010. URL: <http://appscout.pcmag.com/apple-ios-iphone-ipad-ipod/269638-taska-rich-to-do-lists-for-the-ipad> (besucht am 25.05.2014)
- HERCZEG, M.: *Interaktionsdesign – Gestaltung interaktiver und multimedialer Systeme*. München [u.a.]: Oldenbourg, 2006
- HERCZEG, M.: *Software-Ergonomie – Theorien, Modelle und Kriterien für gebrauchstaugliche interaktive Computersysteme*. 3. Aufl. München: Oldenbourg, 2009

- HICK, W. E.: On the rate of gain of information. In: *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 4 (1952) Nr. 1, S. 11–26
- HILL, D. R. ; GRIEB, C.: Substitution for a restricted visual channel in multimodal computer-human dialogue. In: *Systems, Man and Cybernetics* 18 (1988) Nr. 2, S. 285–304
- HOGGAN, E. ; BREWSTER, S. A. ; JOHNSTON, J.: Investigating the Effectiveness of Tactile Feedback for Mobile Touchscreens. In: BURNETT, M. ; CONSTABILE, M. F. ; CATARCI, T. ; RUYTER, B. de ; TAN, D. ; CZERWINSKI, M. ; LUND, A. (Hrsg.): *CHI '08: Proceedings of the 26th annual SIGCHI conference on Human factors in computing systems (Florenz 2008)*. New York: ACM, 2008, S. 1573–1582
- HOLFELDER, W. ; HEHMANN, D.: A networked multimedia retrieval management system for distributed kiosk applications. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the International Conference on Multimedia Computing and Systems (Boston 1994)*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 1994, S. 342–351
- HOLTZBLATT, K. ; WENDELL, J. B. ; WOOD, S.: *Rapid Contextual Design – A How-to Guide to Key Techniques for User-Centered Design*. Amsterdam: Morgan Kaufman, 2004
- HOLZINGER, A.: Finger Instead of Mouse – Touch Screens as a Means of Enhancing Universal Access. In: CARBONELL, N. ; STEPHANIDIS, C. (Hrsg.): *Universal Access Theoretical Perspectives, Practice, and Experience*. Bd. 2615. Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer, 2003, S. 387–397
- HUDSON, S. E. ; STASKO, J. T.: Animation Support in a User Interface Toolkit – Flexible, Robust, and Reusable Abstractions. In: HUDSON, S. ; PAUSCH, R. ; ZANDEN, B. V. ; FOLEY, J. (Hrsg.): *UIST '93 – Proceedings of the 6th annual ACM symposium on User interface software and technology (Atlanta 1993)*. New York: ACM Press, 1993, S. 57–67
- IDC RESEARCH (Hrsg.): *Smartphone OS Market Share, 2015 Q2*. 9. Nov. 2015. URL: <http://www.idc.com/prodserv/smartphone-os-market-share.jsp> (besucht am 09.11.2015)
- IDEUM (Hrsg.): *Colossus Multitouch Table*. 28. Nov. 2015. URL: <http://ideum.com/touch-tables/colossus/> (besucht am 28.11.2015)
- IMMERSION (Hrsg.): *TouchSense Haptic (Tactile) Feedback Technology*. 26. Nov. 2012. URL: <http://web.archive.org/web/20121126100058/http://www.immersion.com:80/products/touchsense-tactile-feedback/> (besucht am 11.02.2018)
- IMMERSION (Hrsg.): *Immersion's TouchSense products*. 31. März 2016. URL: <http://www.immersion.com/technology/#products> (besucht am 31.03.2016)



- JARAUSCH, W.: Multitouch – die Einsatz-Szenarien. In: *Computer & Automation* 10 (2010), S. 32–34
- JOHANNSEN, G.: *Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin: Springer, 1993
- JOHNSON-LAIRD, P. N.: The history of mental models. In: *Psychology of reasoning: Theoretical and historical perspectives* (2004) Nr. 8, S. 179–212
- JOHNSON, E. A.: Touch Displays – A Programmed Man-Machine Interface. In: *Ergonomics* 10 (1967) Nr. 2, S. 271–277
- JONES, L. A. ; SARTER, N. B.: Tactile Displays – Guidance for Their Design and Application. In: *Human Factors* 50 (2008) Nr. 1, S. 90–111
- JOOP, B. ; ZIEGLER, J.: A framework for context-based adaptation (for collaboration). In: BALOIAN, N. ; LUTHER, W. ; SÖFFKER, D. ; URANO, Y. (Hrsg.): *Interface and Interaction Design for Learning and Simulation Environments*. Berlin: Logos, 2010, S. 110–122
- KAMEN, G. ; GABRIEL, D.: *Essentials of Electromyography*. Champaign: Human Kinetics, 2010
- KARLIN, S.: Tactus Technology – this CES darling adds tactile feedback to virtual keyborads. In: *Spectrum* 50 (2013) Nr. 4, S. 23
- KARRER, K. ; GLASER, C. ; CLEMENS, C. ; BRUDER, C.: Technikaffinität erfassen — der Fragebogen TA-EG. In: LICHTENSTEIN, A. ; STÖSSEL, C. ; CLEMENS, C. (Hrsg.): *Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 22, Mensch-Maschine-Systeme 28. Technische Universität Berlin – Zentrum Mensch-Maschine-Systeme. Düsseldorf: VDI, 2009, S. 196–201. URL: <http://www.tu-berlin.de/fileadmin/f25/dokumente/8BWMS/13.3-Karrer.pdf>
- KARWOWSKI, W. (Hrsg.): *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors*. 2. Aufl. Bd. 1. Boca Raton: CRC Press, 2006
- KAUER, M. ; SCHREIBER, M. ; HAKULI, S. ; BRUDER, R.: Taktil oder akustisch? Der Einfluss der Akustik auf die Wahrnehmung der taktilen Rückmeldung bei taktilen Touchscreens. In: LICHTENSTEIN, A. ; STÖSSEL, C. ; CLEMENS, C. (Hrsg.): *Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 22, Mensch-Maschine-Systeme 28. Technische Universität Berlin – Zentrum Mensch-Maschine-Systeme. Düsseldorf: VDI, 2009, S. 148–152
- KELLERER, J. P.: *Untersuchung zur Auswahl von Eingabeelementen für Großflächen-displays in Flugzeugcockpits*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2010. URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2172/>
- KENT, J.: The New Front Office. A Whole New View For Joint Strike Fighter Pilots. In: *Code One* 21 (2006) Nr. 2. URL: [http://www.codeonemagazine.com/article.html?item\\_id=35](http://www.codeonemagazine.com/article.html?item_id=35)

- KEREN, G.: Between- or Within-Subjects Design – A Methodological Dilemma. In: KEREN, G. ; LEWIS, C. (Hrsg.): *Handbook for Data Analysis in the Behavioral Sciences – Methodological Issues*. New York: Psychology Press, 1993. Kap. 8, S. 257–272
- KERN, T. A. (Hrsg.): *Engineering Haptic Devices – A Beginner’s Guide for Engineers*. Dordrecht: Springer, 2009
- KIM, S.-C. ; ISRAR, A. ; POUPYREV, I.: Tactile Rendering of 3D Features on Touch Surfaces. In: IZADI, S. ; QUIGLEY, A. ; POUPYREV, I. ; IGARASHI, T. (Hrsg.): *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (St. Andrews 2013)*. UIST ’13. New York: ACM, 2013, S. 531–538
- KIN, K. ; AGRAWALA, M. ; DEROSE, T.: Determining the benefits of direct-touch, bimanual, and multifinger input on a multitouch workstation. In: GOOCH, A. ; TORY, M. (Hrsg.): *Proceedings of Graphics Interface 2009 (Kelowna 2009)*. GI ’09. Toronto: Canadian Information Processing Society, 2009, S. 119–124. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1555880.1555910>
- KLINKE, R.: Hören und Sprechen – Kommunikation des Menschen. In: KLINKE, R. ; PAPE, H.-C. ; KURTZ, A. ; SILBERNAGL, S. (Hrsg.): *Physiologie*. 6. Aufl. Stuttgart: Thieme, 2010. Kap. 19, S. 676–693
- KLINKE, R. ; PAPE, H.-C. ; KURTZ, A. ; SILBERNAGL, S. (Hrsg.): *Physiologie*. 6. Aufl. Stuttgart: Thieme, 2010
- KOFFKA, K.: *Principles of Gestalt Psychology*. 1. Aufl. London: Lund Humphries, 1936
- KORTUM, P. (Hrsg.): *HCI Beyond the GUI – Design for Haptic, Speech, Olfactory, and Other Nontraditional Interfaces*. Amsterdam: Morgan Kaufman, 2008
- KRUEGER, M. W. ; GIONFRIDDO, T. ; HINRICHSSEN, K.: VIDEOPLACE – an artificial reality. In: BORMAN, L. ; SMITH, R. (Hrsg.): *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (San Francisco 1985)*. CHI ’85. New York: ACM, 1985, S. 35–40
- KUNSCH, K. ; KUNSCH, S.: *Der Mensch in Zahlen*. 3. Aufl. Heidelberg: Spektrum, 2007
- KUPA, E. J. ; ROY, S. H. ; KANDARIAN, S. C. ; DE LUCA, C. J.: Effects of muscle fiber type and size on EMG median frequency and conduction velocity. In: *Journal of Applied Physiology* 79 (1995) Nr. 1, S. 23–32
- LAKOFF, G. ; JOHNSON, M.: *Metaphors We Live By*. Chicago: University of Chicago Press, 1980
- LAKOFF, G. ; JOHNSON, M.: The Metaphorical Structure of the Human Conceptual System. In: *Cognitive Science* 4 (1981) Nr. 2, S. 195–208



- LANDAU, S. ; WELLS, L.: Merging Tactile Sensory Input and Audio Data by Means of The Talking Tactile Tablet. In: OAKLEY, I. ; O'MODHRAN, S. ; NEWELL, F. (Hrsg.): *Proceedings EuroHaptics (Dublin 2003)*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2003, S. 414–418
- LANG, M.: Usability Engineering. In: *Informationstechnik und Technische Informatik* 44 (2002) Nr. 3, S. 3–4
- LAUFS, U. ; BLOCK, M. ; LINK, J. ; ARDILIO, A. ; SCHULLER, A. ; BIERKANDT, J.: *Studie Multi-Touch*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), 2010
- LENSEN, K.-M. H.: In-Plane Electrophoretic Displays. In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 3. Berlin: Springer, 2012. Kap. 8.1.2, S. 1715–1729
- LEWIS, C.: *Using the "Thinking-aloud" Method in Cognitive Interface Design*. Research Report RC 9265. IBM Thomas J. Watson Research Center, 1982
- LICHTENSTEIN, A. ; STÖSSEL, C. ; CLEMENS, C. (Hrsg.): *Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 22, Mensch-Maschine-Systeme 28. Technische Universität Berlin – Zentrum Mensch-Maschine-Systeme. Düsseldorf: VDI, 2009
- LIN, C.-J. ; WUA, C.: Reactions, accuracy and response complexity of numerical typing on touch screens. In: *Ergonomics* 56 (2013) Nr. 5, S. 818–831
- LIPPERT, H. ; HERBOLD, D. ; LIPPERT-BURMESTER, W.: *Anatomie – Text und Atlas*. 9. Aufl. München: Urban & Fischer, 2010
- LOGITECH (Hrsg.): *QuickCam Pro 9000*. 29. März 2016. URL: [http://support.logitech.com/de\\_de/product/quickcam-pro-9000](http://support.logitech.com/de_de/product/quickcam-pro-9000) (besucht am 29.03.2016)
- LOOMIS, J. M.: Tactile pattern perception. In: *Perception* 10 (1981), S. 5–27
- LUHMANN, H. J.: Sensomotorische Systeme – Körperhaltung und Bewegung. In: KLINKE, R. ; PAPE, H.-C. ; KURTZ, A. ; SILBERNAGL, S. (Hrsg.): *Physiologie*. 6. Aufl. Stuttgart: Thieme, 2010. Kap. 23, S. 758–798
- LUMITA (Hrsg.): *Projectors in Business & Education – The Contrast Ratio of a Digital Projector in a Classroom or Business Environment is Irrelevant*. Madison: Labs Report, 2. Okt. 2007. URL: <http://www.3lcd.com/download/default.aspx?ref=/download/ProjectorsinBusinessandEducation.pdf>
- LUMPKIN, E. A. ; MARSHALL, K. L. ; NELSON, A. M.: The cell biology of touch. In: *The Journal of Cell Biology* 191 (2010) Nr. 2, S. 237–248

- LUNDSTRÖM, C. ; RYDELL, T. ; FORSELL, C. ; PERSSON, A. ; YNNERMAN, A.: Multi-Touch Table System for Medical Visualization – Application to Orthopedic Surgery Planning. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 17 (2011) Nr. 12, S. 1775–1784
- MA, R.: Organic Light Emitting Diodes (OLEDs). In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 2. Berlin: Springer, 2012. Kap. 6.6.1, S. 1209–1222
- MACEFIELD, R.: How To Specify the Participant Group Size for Usability Studies – A Practitioner’s Guide. In: *Journal of Usability Studies* 5 (2009) Nr. 1, S. 34–45
- MACKENZIE, I. S.: Fitts’ law as a research and design tool in human-computer interaction. In: *Human-Computer Interaction* 7 (1992) Nr. 1, S. 91–139
- MACKENZIE, I. S. ; BUXTON, W.: Extending Fitts’ law to two-dimensional tasks. In: BAUERSFELD, P. ; BENNETT, J. ; LYNCH, G. (Hrsg.): *CHI ’92: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Monterey 1992)*. Monterey: ACM, 1992, S. 219–226
- MANNONEN, P. ; NIEMINEN, M. P.: Design Perspectives: Sampling User Research for Concept Development. In: HARRIS, D. (Hrsg.): *EPCE 2007: Proceedings of the 7th International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics (Beijing 2007)*. Berlin: Springer, 2007, S. 108–117
- MARCADET, A.: *XMLReader – Objective-C XML reader based on NSXMLParser*. 6. Aug. 2014. URL: <https://github.com/amarcadet/XMLReader> (besucht am 11.10.2014)
- MARÉES, H. de: *Sportphysiologie*. 9. Aufl. Köln: Sportverlag Strauß, 2003
- MATTES, S.: *The Lane Change Task as a tool for driver distraction evaluation*. 9. Okt. 2003. URL: <http://apps.usd.edu/coglab/schieber/ppt/MATTES2003-powerpoint.pdf> (besucht am 16.11.2015)
- MAYHEW, D. J.: Requirements specifications within the Usability Engineering Lifecycle. In: SEARS, A. ; JACKO, J. A. (Hrsg.): *The Human-Computer Interaction Handbook – Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications*. 2. Aufl. Human Factors and Ergonomics. New York: Lawrence Erlbaum, 2008. Kap. 47, S. 917–926
- MAYRING, P.: *Qualitative Inhaltsanalyse – Grundlagen und Techniken*. 11. Aufl. Weinheim: Beltz, 2010
- MELKUS, A.: Haptic-Touchtechnologie. In: *Open Automation* 3 (2011), S. 6. URL: [http://www.openautomation.de/files/o10321zk\\_touchtechnologien\\_pf.pdf](http://www.openautomation.de/files/o10321zk_touchtechnologien_pf.pdf)
- MERLETTI, R.: Standards for Reporting EMG data. In: *Journal of Electromyography and Kinesiology* 9 (1999) Nr. 1, S. 3–4

MERLETTI, R. ; CONTE, L. R. L.: Surface EMG signal processing during isometric contractions. In: *Journal of Electromyography and Kinesiology* 7 (1997) Nr. 4, S. 241–250

MERLETTI, R. ; FARINA, D. ; GAZZONI, M. ; SCHIERONI, M. P.: Effect of age on muscle functions investigated with surface electromyography. In: *Muscle Nerve* 25 (2002) Nr. 1, S. 65–76

MESSLINGER, K.: Somatoviszzerale Sensibilität. In: KLINKE, R. ; PAPE, H.-C. ; KURTZ, A. ; SILBERNAGL, S. (Hrsg.): *Physiologie*. 6. Aufl. Stuttgart: Thieme, 2010. Kap. 18, S. 644–673

MICROSOFT (Hrsg.): *Windows 8 User experience guidelines*. 26. Okt. 2012. URL: [http://download.microsoft.com/download/C/0/A/C0AEFOCC-B969-406D-989A-4CDAFDBB3F3C/Win8\\_UXG\\_GA.pdf](http://download.microsoft.com/download/C/0/A/C0AEFOCC-B969-406D-989A-4CDAFDBB3F3C/Win8_UXG_GA.pdf) (besucht am 22.03.2014)

MICROSOFT (Hrsg.): *Microsoft Rebound TouchScreen Game for Windows 7*. 16. Juni 2013. URL: <http://www.kodyaz.com/touchscreen/microsoft-rebound-windows-7-touch-screen-games.aspx> (besucht am 11.02.2018)

MICROSOFT (Hrsg.): *Was beinhaltet das Microsoft Touch Pack für Windows 7?* 16. Juni 2013. URL: <https://www.microsoft.com/de-at/download/details.aspx?id=17368> (besucht am 11.02.2018)

MICROSOFT (Hrsg.): *Adaptive and interactive toast notifications for Windows 10*. 2. Juli 2015. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/uwp/design/shell/tiles-and-notifications/adaptive-interactive-toasts> (besucht am 10.02.2018)

MICROSOFT (Hrsg.): *How-to guides for Windows 10 apps*. 10. Nov. 2015. URL: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/apps/mt244352.aspx> (besucht am 10.11.2015)

MICROSOFT (Hrsg.): *Richtlinien für UWP-Apps*. 10. Nov. 2015. URL: <https://msdn.microsoft.com/library/windows/apps/hh465424.aspx> (besucht am 10.11.2015)

MICROSOFT (Hrsg.): *Was ist eine Universal Windows-App?* 10. Nov. 2015. URL: <https://msdn.microsoft.com/de-de/library/windows/apps/dn726767.aspx> (besucht am 10.11.2015)

MILLER, G. A.: The Magical Number Seven, Plus or Minus Two – Some Limits on Our Capacity for Processing Information. In: *Psychological Review* 63 (1956) Nr. 2, S. 81–97

MORENO, R.: Optimising Learning from Animations by Minimising Cognitive Load – Cognitive and Affective Consequences of Signalling and Segmentation Methods. In: *Applied Cognitive Psychology* 21 (2007) Nr. 6, S. 765–781

MÖRIKE, K. D. ; BETZ, E. ; MERGENTHALER, W.: *Biologie des Menschen*. 15. Aufl. Wiebelsheim: Quelle & Meyer, 2001

MÜLLER-LIMMROTH, W.: Sinnesorgane. In: SCHMIDTKE, H. (Hrsg.): *Ergonomie*. 3. Aufl. München: Hanser, 1993, S. 27–47

MÜLLER, T.: Sehschärfe junger Erwachsener – Bestimmung des Visus nach DIN EN ISO 8596. In: GESELLSCHAFT FÜR ARBEITSWISSENSCHAFT E. V. (Hrsg.): *Mensch, Technik, Organisation – Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess: 59. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Chemnitz 2011)*. Dortmund: GfA-Press, 2011, S. 339–343

MÜLLER, W. ; FRINGS, S.: *Tier- und Humanphysiologie – Eine Einführung*. 4. Aufl. Berlin: Springer, 2009

NANOTIPS (Hrsg.): *Turn your ordinary gloves into a touch screen glove*. 29. Juni 2014. URL: <http://www.nanotipgloves.com> (besucht am 29.06.2014)

NARUMI, T. ; NISHIZAKA, S. ; KAJINAMI, T. ; TANIKAWA, T. ; HIROSE, M.: Augmented Reality Flavors – Gustatory Display Based on Edible Marker and Cross-modal Interaction. In: TAN, D. ; FITZPATRICK, G. ; GUTWIN, C. ; BEGOLE, B. ; KELLOGG, W. A. (Hrsg.): *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Vancouver 2011)*. New York: ACM, 2011, S. 93–102

NASA (Hrsg.): *Human Integration Design Handbook (HIDH)*. Bd. SP-2010-3407. Washington: National Aeronautics und Space Administration, 2010

NICHOLS, S. J. V.: New Interfaces at the Touch of a Fingertip. In: *Computers* 40 (2007) Nr. 8, S. 12–15

NOLDUS (Hrsg.): *Media Recorder – Video recording technology*. 29. März 2016. URL: <http://www.noldus.com/media-recorder/video-recording-technology> (besucht am 29.03.2016)

NORMAN, D. A.: Stages and levels in human-machine interaction. In: *International Journal of Man-Machine Studies* 21 (1984) Nr. 4, S. 365–375

NORMAN, D. A.: *The Psychology Of Everyday Things*. 16. Aufl. London: Basic Books, 1988

NORMAN, D. A.: *The Design of Everyday Things*. New York: Doubleday, 1990

NORMAN, D. A.: Natural User Interfaces Are Not Natural. In: *Interactions* 17 (2010) Nr. 3, S. 6–10

O'MALLEY, M. K. ; GUPTA, A.: Haptic Interfaces. In: KORTUM, P. (Hrsg.): *HCI Beyond the GUI – Design for Haptic, Speech, Olfactory, and Other Nontraditional Interfaces*. Amsterdam: Morgan Kaufman, 2008. Kap. 2, S. 25–73

OBERQUELLE, H.: Benutzergerechte MCI in einer dynamischen Welt – Eine Gestaltungsaufgabe. In: HELLIGE, H. D. (Hrsg.): *Mensch-Computer-Interface – zur Geschichte und Zukunft der Computerbedienung*. Bielefeld: transcript, 2008, S. 157–172

OBRIST, M. ; SEAH, S. A. ; SUBRAMANIAN, S.: Talking about tactile experiences. In: MACKAY, W. E. ; BREWSTER, S. ; BØDKER, S. (Hrsg.): *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Paris 2013)*. CHI '13. Paris: ACM, 2013, S. 1659–1668

OLDFIELD, R. C.: The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. In: *Neuropsychologia* 9 (1971) Nr. 1, S. 97–113

ORDERMAN (Hrsg.): *Orderman Columbus*. 1. Juli 2014. URL: <http://web.archive.org/web/20140701131752/http://www.orderman.com/pc-kasse/orderman-columbus/produktuebersicht.html> (besucht am 11.02.2018)

ØSTERBERG, G.: *Topography of the Layer of Rods and Cones in the Human Retina*. Acta ophthalmologica. Supplementum 6. Kopenhagen: Nyt Nordisk Forlag Arnold Busck, 1935

PAPE, H.-C.: Integrative Funktionen des Gehirns. In: KLINKE, R. ; PAPE, H.-C. ; KURTZ, A. ; SILBERNAGL, S. (Hrsg.): *Physiologie*. 6. Aufl. Stuttgart: Thieme, 2010. Kap. 25, S. 816–847

PARÉ, M. ; ELDE, R. ; MAZURKIEWICZ, J. E. ; SMITH, A. M. ; RICE, F. L.: The Meissner Corpuscle Revised: A Multiafferented Mechanoreceptor with Nociceptor Immunochemical Properties. In: *The Journal of Neuroscience* 21 (2001) Nr. 18, S. 7236–7246. URL: <http://www.jneurosci.org/content/21/18/7236.abstract>

PATERNÒ, F.: *Model-based Design and Evaluation of Interactive Applications*. Applied computing. London: Springer, 2000

PATTERSON, D. A. ; HENNESSY, J. L.: *Computer Organization and Design – The Hardware/Software Interface*. 5. Aufl. Amsterdam: Morgan Kaufman, 2013

PENFIELD, W. ; RASMUSSEN, T.: *The Cerebral Cortex of Man – A Clinical Study of Localization of Function*. New York: The Macmillan Company, 1950

PERES, S. ; BEST, V. ; BROCK, D. ; SHINN-CUNNINGHAM, B. ; FRAUENBERGER, C. ; HERMANN, T. ; NEUHOFF, J. G. ; NICKERSON, L. V. ; STOCKMAN, T.: Auditory Interfaces. In: KORTUM, P. (Hrsg.): *HCI Beyond the GUI – Design for Haptic, Speech, Olfactory, and Other Nontraditional Interfaces*. Amsterdam: Morgan Kaufman, 2008. Kap. 5, S. 147–195

PETERS, R. M. ; HACKEMAN, E. ; GOLDBREICH, D.: Diminutive Digits Discern Delicate Details – Fingertip Size and the Sex Difference in Tactile Spatial Acuity. In: *The Journal of Neuroscience* 29 (2009) Nr. 50, S. 15756–15761

- PETROV, A. ; JANNY, B. ; MAIER, T.: Die moderne Ergonomie – auch altersgerecht? Die Auswirkungen des Alters auf die haptische Objektwahrnehmung. In: GESELLSCHAFT FÜR ARBEITSWISSENSCHAFT E. V. (Hrsg.): *Chancen durch Arbeits-, Produkt- und Systemgestaltung – Zukunftsfähigkeit für Produktions- und Dienstleistungsunternehmen: 59. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Krefeld 2013)*. Dortmund: GfA-Press, 2013, S. 657–660
- PHARES, R. ; FIHN, M.: Introduction to Touchscreen Technologies. In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 3. Berlin: Springer, 2012. Kap. 5.7.1, S. 935–974
- PHINYOMARK, A. ; THONGPANJA, S. ; HU, H. ; PHUKPATTARANONT, P. ; LIMSAKUL, C.: The Usefulness of Mean and Median Frequencies in Electromyography Analysis. In: NAIK, G. R. (Hrsg.): *Computational Intelligence in Electromyography Analysis – A Perspective on Current Applications and Future Challenges*. Rijeka: InTech, 2012
- PICKERING, J.: Touch-sensitive screens – the technologies and their application. In: *International Journal of Man-Machine Studies* 25 (1986) Nr. 3, S. 249–269
- PITTS, M. J. ; BURNETT, G. ; SKRYPCHUK, L. ; WELLINGS, T. ; ATTRIDGE, A. ; WILLIAMS, M. A.: Visual-haptic feedback interaction in automotive touchscreens. In: *Displays* 33 (2012) Nr. 1, S. 7–16
- PITTS, M. J. ; SKRYPCHUK, L. ; WELLINGS, T. ; ATTRIDGE, A. ; WILLIAMS, M. A.: Evaluating User Response to In-Car Haptic Feedback Touchscreens Using the Lane Change Test. In: *Advances in Human-Computer Interaction 2012* (2012), S. 1–13
- PITTS, M. J. ; SKRYPCHUK, L. ; WELLINGS, T. ; ATTRIDGE, A. ; WILLIAMS, M. A.: Evaluating User Response to In-Car Haptic Feedback Touchscreens Using the Lane Change Test. In: *Advances in Human-Computer Interaction 2012* (2012), S. 1–13
- PIXELCUT (Hrsg.): *The Ultimate Guide To iPhone Resolutions*. 10. Nov. 2015. URL: <http://www.paintcodeapp.com/news/ultimate-guide-to-iphone-resolutions> (besucht am 10.11.2015)
- PLAISANT, C. ; SEARS, A.: Touchscreen Interfaces for Alphanumeric Data Entry. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 36 (1992) Nr. 4, S. 293–297
- POGUE, D.: The Trouble with Touch Screens. In: *Scientific American* (2013) Nr. 308, S. 25
- POHL, K.: *Requirements Engineering – Grundlagen, Prinzipien, Techniken*. Heidelberg: Dpunkt, 2007
- PREECE, J. ; CAREY, T. ; ROGERS, Y. ; HOLLAND, S. ; SHARP, H. ; BENYON, D.: *Human-Computer Interaction*. Amsterdam: Addison-Wesley, 1994



- PROCTOR, R. W. ; VU, K.-P. L.: Selection and Control of Action. In: SALVENDY, G. (Hrsg.): *Handbook of Human Factors and Ergonomics*. 4. Aufl. Hoboken: Wiley, 2012. Kap. 4, S. 95–116
- PSCHYREMBEL, W. ; ARNOLD, U.: *Pschyrembel – Klinisches Wörterbuch 2014*. 265. Aufl. Berlin: de Gruyter, 2013
- RAFI (Hrsg.): *GLASSCAPE – High-Density Touchsensoren und Touchpads*. 22. Nov. 2013. URL: [http://www.rafi.de/fileadmin/user\\_upload/Unternehmen/Downloadcenter/Flyer-und-Broschueren/PDFs\\_deutsch/Uploads\\_nach\\_Aug-2017/Systeme/GLASSCAPE\\_HighDensity\\_DE\\_web\\_20170619.pdf](http://www.rafi.de/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Downloadcenter/Flyer-und-Broschueren/PDFs_deutsch/Uploads_nach_Aug-2017/Systeme/GLASSCAPE_HighDensity_DE_web_20170619.pdf) (besucht am 11.02.2018)
- RASMUSSEN, J.: Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* SMC-13 (1983) Nr. 3, S. 257–266
- REAZ, M. B. I. ; HUSSAIN, M. S. ; MOHD-YASIN, F.: Techniques of EMG signal analysis – detection, processing, classification and applications. In: *Biological Procedures Online* 8 (2006) Nr. 1, S. 11–35
- REETZ, A. ; GUTWIN, C. ; STACH, T. ; NACENTA, M. ; SUBRAMANIAN, S.: Superflick – a natural and efficient technique for long-distance object placement on digital tables. In: GUTWIN, C. ; MANN, S. (Hrsg.): *GI '06 – Proceedings of Graphics Interface (Quebec 2006)*. Toronto: Canadian Information Processing Society, 2006, S. 163–170. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1143106>
- ROGERS, W. A. ; FISK, A. D. ; MCLAUGHLIN, A. C. ; PAK, R.: Touch a Screen or Turn a Knob – Choosing the Best Device for the Job. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 47 (2005) Nr. 2, S. 271–288
- ROHMERT, W.: Ermittlung von Erholungspausen für statische Arbeit des Menschen. In: *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie einschließlich Arbeitsphysiologie* 18 (1960) Nr. 2, S. 123–164
- ROHMERT, W.: Grundlagen der technischen Arbeitsgestaltung. In: SCHMIDTKE, H. (Hrsg.): *Ergonomie*. 3. Aufl. München: Hanser, 1993. Kap. 6.4, S. 493–502
- ROHMERT, W. ; RUTENFRANZ, J. (Hrsg.): *Praktische Arbeitsphysiologie*. 3. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme, 1983
- ROTH, K. ; WILLIMCZIK, K.: *Bewegungswissenschaft*. Reinbek: Rowohlt-Taschenbuch-Verlag, 1999
- ROTH, V. ; TURNER, T.: Bezel swipe – conflict-free scrolling and multiple selection on mobile touch screen devices. In: OLSEN, D. R. ; ARTHUR, R. B. (Hrsg.): *CHI '09 – Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Boston 2009)*. New York: ACM, 2009, S. 1523–1526

- RSTUDIO (Hrsg.): *Download RStudio Desktop 0.99.485*. 6. Okt. 2015. URL: <https://www.rstudio.com/products/rstudio/download/> (besucht am 06.10.2015)
- RUDOLF, C.: *Handbuch Software-Ergonomie – Usability Engineering*. 2. Aufl. MatNr 670-095-361. Tübingen: Unfallkasse Post und Telekom, 2006. URL: <http://web.archive.org/web/20150512234204/http://www.ukpt.de/pages/dateien/software-ergonomie.pdf>
- RUFF, C. ; LAUFS, U.: Entwicklung von Multi-Touch-Anwendungen. In: SCHLEGEL, T.: *Multi-Touch – Interaktion durch Berührung*. Berlin: Springer, 2013. Kap. 8, S. 153–163
- SAFFER, D.: *Designing Gestural Interfaces*. Sebastopol: O'Reilly, 2008
- SALVENDY, G. (Hrsg.): *Handbook of Human Factors and Ergonomics*. 4. Aufl. Hoboken: Wiley, 2012
- SANDLER RESEARCH (Hrsg.): *Global Laptop Touchscreen Market 2015-2019*. 1. Apr. 2015. URL: <http://www.sandlerresearch.org/global-laptop-touch-screen-market-2015-2019.html> (besucht am 14.03.2016)
- SANTHANAM, R. ; WIEDENBECK, S.: Neither novice nor expert – the discretionary user of software. In: *International Journal of Man-Machine Studies* 38 (1993) Nr. 2, S. 201–229
- SAUP, W.: *Alter und Umwelt – eine Einführung in die ökologische Gerontologie*. Stuttgart: Kohlhammer, 1993
- SCHANDRY, R.: *Biologische Psychologie*. 3. Aufl. Weinheim: Beltz, 2011
- SCHAUB, F. ; SEIFERT, J. ; HONOLD, F. ; MÜLLER, M. ; RUKZIO, E. ; WEBER, M.: Broken display = broken interface: the impact of display damage on smartphone interaction. In: JONES, M. ; PALANQUE, P. ; SCHMIDT, A. ; GROSSMAN, T. (Hrsg.): *CHI '14 – Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Toronto 2014)*. New York: ACM Press, 2014, S. 2337–2346
- SCHEDLBAUER, M.: *Movement Time Evaluator (MTE)*. 22. Okt. 2011. URL: <https://mschedlbauer.weebly.com/mte.html> (besucht am 10.02.2018)
- SCHEDLBAUER, M. ; PASTEL, R. ; HEINES, J. M.: Effect of Posture on Target Acquisition with a Trackball and Touch Screen. In: LUŽAR-STIFFLER, V. ; DOBRIĆ, V. H. (Hrsg.): *ITI 2006 – Proceedings of the 28th International Conference on Information Technology Interfaces (Cavtat/Dubrovnik 2006)*. Zagreb: University Computing Centre SRCE, 2006, S. 257–262
- SCHENK, J. ; RIGOLL, G.: *Mensch-Maschine-Kommunikation*. Heidelberg: Springer, 2010



- SCHICKLER, M. ; REICHERT, M. ; PRYSS, R. ; SCHOBEL, J. ; SCHLEE, W. ; LANGGUTH, B.: *Entwicklung mobiler Apps – Konzepte, Anwendungsbausteine und Werkzeuge im Business und E-Health*. Springer Vieweg, 2015
- SCHLEGEL, T.: Einleitung – Warum Multi-Touch?. In: *Multi-Touch – Interaktion durch Berührung*. Berlin: Springer, 2013, S. 3–12
- SCHLEGEL, T.: *Multi-Touch – Interaktion durch Berührung*. Berlin: Springer, 2013
- SCHLICK, C. M. ; BRUDER, R. ; LUCZAK, H. (Hrsg.): *Arbeitswissenschaft*. 3. Aufl. Heidelberg: Springer, 2010
- SCHLICK, C. ; ZIEFLE, M. ; PARK, M. ; LUCZAK, H.: Visual Displays. In: SEARS, A. ; JACKO, J. A. (Hrsg.): *The Human-Computer Interaction Handbook – Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications*. 2. Aufl. Human Factors and Ergonomics. New York: Lawrence Erlbaum, 2009. Kap. 7.5.1, S. 201–227
- SCHMIDT, L. ; DOMHARDT, M.: Untersuchung des Neural Impulse Actuators als Brain-Computer-Interface. In: WELKE, S. ; KOLREP, H. ; RÖTTING, M. (Hrsg.): *Biophysiological Interfaces in der Mensch-Maschine-Interaktion – 1. Berliner Fachtagung (Berlin 2009)*. Bd. 30. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 22, Mensch-Maschine-Systeme. Berlin, Deutschland: VDI, 2009, S. 21–28
- SCHMIDT, R. F. ; LANG, F.: *Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie*. Berlin: Springer, 2007
- SCHMIDT, R. F. ; SCHAIBLE, H.-G. (Hrsg.): *Neuro- und Sinnesphysiologie*. 5. Aufl. Heidelberg: Springer, 2006
- SCHMIDTKE, H. (Hrsg.): *Handbuch der Ergonomie*. 2. Aufl. Bd. 1. Koblenz: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, 1989
- SCHMIDTKE, H. (Hrsg.): *Ergonomie*. 3. Aufl. München: Hanser, 1993
- SCHÖNHAMMER, R.: *Einführung in die Wahrnehmungspsychologie*. Wien: Facultas, 2009
- SCHÖNING, J. ; BRANDL, P. ; DAIBER, F. ; ECHTLER, F. ; HILLIGES, O. ; HOOK, J. ; LÖCHTEFELD, M. ; MOTAMED, N. ; MULLER, L. ; OLIVIER, P. ; ROTH, T. ; ZADOW, U. von: *Multi-Touch Surfaces: A Technical Guide*. Technical Report TUM-I0833. Technische Universität München, 2008
- SCHULTZ, K. L. ; BATTEN, D. M. ; SLUCHAK, T. J.: Optimal viewing angle for touch-screen displays – Is there such a thing?. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 22 (1998) Nr. 4-5, S. 343–350
- SCRATCHTAPE (Hrsg.): *Project Humunculus*. 30. Sep. 2008. URL: <http://www.scratchtape.it/illustration.html> (besucht am 25.03.2013)
- SEARS, A.: Improving touchscreen keyboards – design issues and a comparison with other devices. In: *Interacting with Computers* 3 (1991) Nr. 3, S. 253–269

- SEARS, A. ; JACKO, J. A. (Hrsg.): *The Human-Computer Interaction Handbook – Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications*. 2. Aufl. Human Factors and Ergonomics. New York: Lawrence Erlbaum, 2008
- SEARS, A. ; SHNEIDERMAN, B.: High precision touchscreens – design strategies and comparisons with a mouse. In: *International Journal of Man-Machine Studies* 34 (1991) Nr. 4, S. 593–613
- SEEGER, M. ; STEIN, T. ; BORYS, B.-B. ; SCHMIDT, L.: Die Berührungsdauer eines Button-Klicks bei stationären Touchscreens. In: DIEFENBACH, S. ; HENZE, N. ; PIELOT, M. (Hrsg.): *Mensch und Computer 2015 – Tagungsband (Stuttgart 2015)*. Berlin: de Gruyter, 2015, S. 243–252
- SEEGER, M. ; STEIN, T. ; BORYS, B.-B. ; SCHMIDT, L.: Untersuchung der typischen Fingerkräfte bei der Eingabe auf einer stationären Touchscreen-Oberfläche. In: GESELLSCHAFT FÜR ARBEITSWISSENSCHAFT E.V. (Hrsg.): *Arbeit in komplexen Systemen – Digital, vernetzt, human?!: 62. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Aachen 2016)*. Dortmund: GfA-Press, 2016. Kap. A.4.20, S. 1–6
- SEIKO EPSON (Hrsg.): *What is 3LCD? – Projector Structure*. 13. Sep. 2014. URL: <http://www.3lcd.com/explore/structure.aspx> (besucht am 13.09.2014)
- SHERMAN, W. R. ; CRAIG, A. B.: *Understanding virtual reality – Interface, application, and design*. San Francisco: Elsevier, 2002
- SHIMOGA, K. B.: Finger Force and Touch Feedback Issues in Dexterous Telemanipulation. In: WERNER, R. (Hrsg.): *Fourth Annual Conference on Intelligent Robotic Systems for Space Exploration (New York 1992)*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 1992, S. 159–178
- SHIN, G. ; ZHU, X.: Ergonomic issues associated with the use of touchscreen desktop PC. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 55 (2011) Nr. 1, S. 949–953
- SHNEIDERMAN, B.: Direct Manipulation – A Step Beyond Programming Languages. In: *Computer* 16 (1983) Nr. 8, S. 57–69
- SHNEIDERMAN, B.: Direct Manipulation – a step beyond programming languages. In: SHNEIDERMAN, B. (Hrsg.): *Sparks of innovation in human-computer interaction*. Human/computer interaction. Norwood: Ablex Pub. Co., 1993, S. 17–37
- SIGMATEK (Hrsg.): *Erhöhter Bedienkomfort – ETV Control Panel mit taktilem Touchscreen*. 1. Dez. 2010. URL: <http://www.sigmathek-automation.com/de/unternehmen/news-presse/aktuelle-news/etv-1941-control-panel-mit-taktilem-touchscreen/> (besucht am 27.02.2016)
- SIMON, H. A.: How Big Is a Chunk? By combining data from several experiments, a basic human memory unit can be identified and measured. In: *Science* 183 (1974) Nr. 4124, S. 482–488

SMART DISPLAY CONCEPT (Hrsg.): *SDC SF-D01 Standfuß für Touchscreen*. 5. Juni 2012. URL: <http://sdc-germany.com/download/Datenblatt/SDC-SF-D01.pdf> (besucht am 16.03.2016)

SMITH, C. U. M.: *Biology of sensory systems*. 2. Aufl. Chichester: Wiley, 2008

SMITH, S. G. ; SHERWOOD, B. A.: Educational uses of the PLATO computer system. In: *Science* 192 (1976) Nr. 4327, S. 344–352

SOMMER, K. (Hrsg.): *Der Mensch – Anatomie, Physiologie, Ontogenie*. 11. Aufl. Augsburg: Weltbild, 1995

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

STACHOWIAK, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer, 1973

STANTON, N. A. ; BABER, C.: Describing and Predicting Human Interaction with Technology. In: KARWOWSKI, W. (Hrsg.): *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors*. 2. Aufl. Bd. 1. Boca Raton: CRC Press, 2006. Kap. 222

STAPELKAMP, T.: *Screen- und Interfacedesign – Gestaltung und Usability für Hard- und Software*. Berlin: Springer, 2007

STEIN, T. ; SEEGER, M. ; SCHMIDT, L.: Die vibrotaktile Wahrnehmung des Menschen an einer ebenen Oberfläche. In: GESELLSCHAFT FÜR ARBEITSWISSENSCHAFT E.V. (Hrsg.): *Arbeit in komplexen Systemen – Digital, vernetzt, human?!: 62. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Aachen 2016)*. Dortmund: GfA-Press, 2016. Kap. A.4.24, S. 1–6

STONE, D. ; JARRETT, C. ; WOODROFFE, M. ; MINOCHA, S.: *User Interface Design and Evaluation*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2005

SUTTER, P. H. ; IATRIDIS, J. C. ; THAKOR, N. V.: Response to reflected-force feedback to fingers in teleoperations. In: RODRIGUEZ, G. ; SERAJI, H. (Hrsg.): *Proceedings of the NASA Conference on Space Telerobotics (Pasadena 1989)*. Bd. 4. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1989, S. 65–74. URL: <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19900020521>

TACTUS TECHNOLOGIES (Hrsg.): *Phorm – World's First Morphing Touchscreen Case*. 5. Nov. 2015. URL: <http://web.archive.org/web/20151105002105/http://www.getphorm.com> (besucht am 11.02.2018)

TACTUS TECHNOLOGY (Hrsg.): *Technology – How do the buttons work?* 4. Nov. 2015. URL: <http://tactustechnology.com/technology/> (besucht am 04.11.2015)

- TAN, H. Z. ; SRINIVASAN, M. A. ; EBERMAN, B. ; CHENG, B.: Human Factors for the Design of Force-Reflecting Haptic Interfaces. In: *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting (Chicago 1994)*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1994, S. 353–359
- TECHSMITH (Hrsg.): *Camtasia Studio*. 29. März 2016. URL: <https://www.techsmith.de/camtasia.html> (besucht am 29.03.2016)
- TESLA MOTORS (Hrsg.): *Model S*. 14. März 2016. URL: [https://www.teslamotors.com/de\\_DE/models?redirect=no](https://www.teslamotors.com/de_DE/models?redirect=no) (besucht am 14.03.2016)
- TEXAS INSTRUMENTS (Hrsg.): *DLP & MEMS – How DLP Technology Works*. 13. Sep. 2014. URL: <http://www.ti.com/lscs/ti/analog/dlp/how-dlp-works.page> (besucht am 13.09.2014)
- THE IMAGING SOURCE (Hrsg.): *DFK 21AU04*. 29. März 2016. URL: [http://www.theimagingsource.com/de\\_DE/products/cameras/usb-ccd-color/dfk21au04/](http://www.theimagingsource.com/de_DE/products/cameras/usb-ccd-color/dfk21au04/) (besucht am 29.03.2016)
- THE LIMESURVEY PROJECT TEAM (Hrsg.): *LimeSurvey – the open source survey application*. 16. Juni 2013. URL: <http://www.limesurvey.org> (besucht am 16.06.2013)
- THOMAS, C. ; BEVAN, N. (Hrsg.): *Usability context analysis – a practical guide*. Version 4.04. London: Serco Usability Services, 1996. URL: <http://hdl.handle.net/2134/2652>
- TILLMANN, B. N.: *Atlas der Anatomie des Menschen*. Berlin: Springer, 2005
- TIMPE, K.-P. ; KOLREP, H.: Das Mensch-Maschine-System als interdisziplinärer Gegenstand. In: TIMPE, K.-P. ; JÜRGENSOHN, T. ; KOLREP, H. (Hrsg.): *Mensch-Maschine-Systemtechnik – Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation*. 2. Aufl. Düsseldorf: Symposion Publishing, 2002, S. 9–40
- TOMTOM (Hrsg.): *TomTom GO 6100*. 13. März 2016. URL: [http://www.tomtom.com/de\\_de/drive/car/products/go-6100-europe/](http://www.tomtom.com/de_de/drive/car/products/go-6100-europe/) (besucht am 13.03.2016)
- TVERSKY, B. ; MORRISON, J. B. ; BERTANCOURT, M.: Animation: can it facilitate?. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 57 (4 2002), S. 247–262
- VANDENBERGHE, P.: Data Projectors. In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 4. Berlin: Springer, 2012. Kap. 10.3.3, S. 2135–2142
- VANDERHEIDEN, G.: Use of audio-haptic interface techniques to allow nonvisual access to touchscreen appliances. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 40 (1996) Nr. 24, S. 1266

- VIITASALO, J. H. T. ; KOMI, P. V.: Signal characteristics of EMG during fatigue. In: *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 37 (1977) Nr. 2, S. 111–121
- VILLAMOR, C. ; WILLIS, D. ; WROBLEWSKI, L.: *Touch Gesture Reference Guide*. 15. Apr. 2010. URL: <http://static.lukew.com/TouchGestureGuide.pdf> (besucht am 10.01.2013)
- VON TSCHARNER, V.: Intensity analysis in time-frequency space of surface myoelectric signals by wavelets of specified resolution. In: *Journal of Electromyography and Kinesiology* 10 (2000) Nr. 6, S. 433–445
- WALKER, G.: A Cornucopia of Touch Technology. In: *Information Display* 22 (2006) Nr. 12, S. 14–20. URL: <http://informationdisplay.org/IDArchive/2006/December/ACornucopiaofTouchTechnology.aspx>
- WALKER, G. ; FIHN, M.: LCD In-Cell Touch. In: *Information Display* 26 (2010) Nr. 3, S. 8–14. URL: [http://informationdisplay.org/Portals/InformationDisplay/IssuePDF/03\\_2010.PDF](http://informationdisplay.org/Portals/InformationDisplay/IssuePDF/03_2010.PDF)
- WEBER: De Tactu. In: WEBER, E. H.: *De pulsu, resorptione, auditu et tactu – Anationes anatomicae et physiologicae*. Leipzig: Köhler, 1834, S. 44–168
- WEISS, M. ; WACHARAMANOTHAM, C. ; VOELKER, S. ; BORCHERS, J.: FingerFlux – near-surface haptic feedback on tabletops. In: *UIST '11: Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology (Santa Barbara)*. New York: ACM, 2011, S. 615–620
- WESTLAND, S.: Color Communication. In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 1. Berlin: Springer, 2012. Kap. 2.2.1, S. 131–137
- WESTLAND, S.: The CIE System. In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 1. Berlin: Springer, 2012. Kap. 2.2.2, S. 139–146
- WESTLAND, S. ; CHEUNG, V.: RGB Systems. In: CHEN, J. ; CRANTON, W. ; FIHN, M. (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. Bd. 1. Berlin: Springer, 2012. Kap. 2.2.3, S. 147–153
- WICKENS, C. D. ; CARSWELL, C. M.: Information Processing. In: SALVENDY, G. (Hrsg.): *Handbook of Human Factors and Ergonomics*. 3. Aufl. Hoboken: Wiley, 2006. Kap. 5, S. 111–149
- WICKENS, C. D. ; LEE, J. ; LIU, Y. D. ; GORDON-BECKER, S. E.: *Introduction to Human Factors Engineering – Pearson New International Edition*. 2. Aufl. New Jersey: Pearson Education Limited, 2013

- WIEDEMANN, L. ; HAFTNER, T. ; POBATSCHNIG, B. ; FAULHUBER, M. ; REICHEL, M.: Qualitätsbetrachtung der Wavelet- und RMS Analyse in Abhängigkeit der Aufnahmefrequenz von EMG Signalen. In: BAUMGARTNER, C. ; MAYR, W. (Hrsg.): *Tagungsband zur ÖGBMT-Jahrestagung 2014 (Hall 2014)*. Bd. 4. UNIT – Lecture Notes in Biomedical Computer Science and Mechatronics. 2014, S. 19–20
- WIGDOR, D. ; PENN, G. ; RYALL, K. ; ESENTHER, A. ; SHEN, C.: Living with a Tabletop – Analysis and Observations of Long Term Office Use of a Multi-Touch Table. In: KELLENBERGER, P. (Hrsg.): *Second Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems – TABLETOP '07 (Newport 2007)*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2007, S. 60–67
- WIGDOR, D. ; WIXON, D.: *Brave NUI World – Designing Natural User Interfaces for Touch and Gesture*. Amsterdam: Morgan Kaufmann, 2011
- WILLIAMS, C. A. ; RATEL, S.: Definitions of Muscle Fatigue. In: *Human Muscle Fatigue*. London: Routledge Chapman & Hall, 2009, S. 3–16
- WILSON, J. R.: Mental Models. In: KARWOWSKI, W. (Hrsg.): *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors*. 2. Aufl. Bd. 1. Boca Raton: CRC Press, 2006, S. 493–496
- WINTER, D. A.: *Biomechanics and motor control of human movement*. 4. Aufl. Hoboken: Wiley, 2009
- WU, M. ; BALAKRISHNAN, R.: Multi-finger and whole hand gestural interaction techniques for multi-user tabletop displays. In: KONSTAN, J. A. (Hrsg.): *UIST '03 – Proceedings of the 16th annual ACM symposium on User interface software and technology (Vancouver 2003)*. New York: ACM, 2003, S. 193–202
- WU, S.-T. ; YANG, D.-K.: *Fundamentals of liquid crystal devices*. Chichester: John Wiley & Sons, 2006
- XU, S. ; BAILEY, K.: Design Touch Feedback for Blind Users. In: STEPHANIDIS, C. (Hrsg.): *HCI International 2013 - Posters' Extended Abstracts*. Bd. 373. Communications in Computer and Information Science. Berlin: Springer, 2013, S. 281–285
- YUAN, Y. ; ZHENG, W. ; DEGROOTE, M. G.: From stationary work support to mobile work support – a theoretical framework. In: BROOKES, W. ; LAWRENCE, E. ; LAWRENCE, E. ; CHANG, E. (Hrsg.): *International Conference on Mobile Business (Sydney 2005)*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2005, S. 315–321
- ZHAO, J. ; SOUKOREFF, R. W. ; REN, X. ; BALAKRISHNAN, R.: A model of scrolling on touch-sensitive displays. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 72 (2014) Nr. 12, S. 805–821

ZIEFLE, M.: *Lesen am Bildschirm*. Münster: Waxmann, 2002

ZÜHLKE, D.: *Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen – Useware-Engineering für technische Systeme*. 2. Aufl. Heidelberg: Springer, 2012

# Normen und Richtlinien

ANSI/HFES 100-2007: *Human Factors Engineering of Computer Workstations*. Nov. 2007

BGIA-Report 3/2008: *Ergonomische Anforderungen an Eingabemittel für Geräte der Informationstechnik*. Feb. 2008

BildscharbV: *Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit an Bildschirmgeräten (Bildschirmarbeitsverordnung - BildscharbV)*. Dez. 1996

DIN 5036-3: *Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien – Meßverfahren für lichttechnische und spektrale strahlungsphysikalische Kennzahlen*. Nov. 1979

DIN 5340: *Begriffe der physiologischen Optik*. Apr. 1998

DIN 32975: *Gestaltung visueller Informationen im öffentlichen Raum zur barrierefreien Nutzung*. Dez. 2009

DIN 32975: *Gestaltung visueller Informationen im öffentlichen Raum zur barrierefreien Nutzung – Berichtigung zu DIN 32975:2009-12*. Juli 2012

DIN 33402-2: *Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte*. Dez. 2005

DIN EN 894-1: *Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 1: Allgemeine Leitsätze für Benutzer-Interaktion mit Anzeigen und Stellteilen*. Jan. 2009

DIN EN 894-2: *Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 2: Anzeigen*. Feb. 2009

DIN EN ISO 7250-1: *Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung – Teil 1: Körpermaßdefinitionen und -messpunkte*. Juni 2010

DIN EN ISO 8596: *Augenoptik – Sehschärfepprüfung – Das Normsehzeichen und seine Darbietung*. Okt. 2009

DIN EN ISO 9241-5: *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 5: Anforderungen an Arbeitsplatzgestaltung und Körperhaltung*. Aug. 1999



- DIN EN ISO 9241-11: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte (Entwurf)*. Dez. 2015
- DIN EN ISO 9241-12: *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 12: Informationsdarstellung*. Aug. 2000
- DIN EN ISO 9241-13: *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 13: Benutzerführung*. Aug. 2000
- DIN EN ISO 9241-16: *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 16: Dialogführung mittels direkter Manipulation*. März 2000
- DIN EN ISO 9241-20: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 20: Leitlinien für die Zugänglichkeit der Geräte und Dienste in der Informations- und Kommunikationstechnologie*. Aug. 2009
- DIN EN ISO 9241-110: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung*. Sep. 2008
- DIN EN ISO 9241-210: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*. Jan. 2011
- DIN EN ISO 9241-302: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 302: Terminologie für elektronische optische Anzeigen*. Juni 2009
- DIN EN ISO 9241-303: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 303: Anforderungen an elektronische optische Anzeigen*. März 2012
- DIN EN ISO 9241-400: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 400: Grundsätze und Anforderungen für physikalische Eingabegeräte*. Mai 2007
- DIN EN ISO 9241-410: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 410: Gestaltungskriterien für physikalische Eingabegeräte*. Dez. 2012
- DIN EN ISO 9241-420: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 420: Auswahlverfahren für physikalische Eingabegeräte*. Okt. 2011
- DIN EN ISO 9241-910: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 910: Rahmen für die taktile und haptische Interaktion*. Nov. 2011
- DIN EN ISO 9241-920: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 920: Anleitung zu taktilen und haptischen Interaktionen (Entwurf)*. Dez. 2015
- DIN EN ISO 14915-1: *Software-Ergonomie für Multimedia-Benutzungsschnittstellen – Teil 1: Gestaltungsgrundsätze und Rahmenbedingungen*. Apr. 2003
- DIN EN ISO 15535: *Allgemeine Anforderungen an die Einrichtung anthropometrischer Datenbanken*. Jan. 2013
- DIN ISO 20282-1: *Einfachheit der Handhabung von Produkten des täglichen Gebrauchs – Teil 1: Gestaltungsanforderungen im Kontext von Anwendungs- und Benutzermerkmalen*. Okt. 2008

DOD-HDBK-743A: *Military Handbook – Anthropometry of US Military Personnel (Metric)*. Feb. 1991

ISO 26022: *Road vehicles – Ergonomic aspects of transport information and control systems – Simulated lane change test to assess in-vehicle secondary task demand*. Sep. 2010

MIL-STD-1472G: *Department of Defense Design Criteria Standard – Human Engineering*. Jan. 2012. URL: [http://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.aspx?ident\\_number=36903](http://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.aspx?ident_number=36903)

VDI 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Juni 2004

VDI/VDE 3850-2: *Gebrauchstaugliche Gestaltung von Benutzungsschnittstellen für technische Anlagen – Interaktionsgeräte für Bildschirme (Entwurf)*. Juli 2015

VDI/VDE 3850-3: *Gebrauchstaugliche Gestaltung von Benutzungsschnittstellen für technische Anlagen – Blatt 3: Merkmale, Gestaltung und Einsatzmöglichkeiten von Benutzungsschnittstellen mit Touchscreens*. Nov. 2015



# Anhang A – Versuchsanleitung der Vorstudie zur empirischen Untersuchung der Biomechanik



# Versuchsanleitung

---

## 1 Einleitung

Vielen Dank, dass Sie sich die Zeit für die Teilnahme an diesem Versuch nehmen. Zur Vorbereitung folgen einige Erklärungen. Bitte stellen Sie ihre Fragen gleich, wenn Ihnen etwas unklar ist.

### Untersuchungsgegenstand

Gegenstand dieser Untersuchung ist der empirische Nachweis der Ermüdung des Hand-Arm-Komplexes auf die Touchscreeninteraktion.

Im Rahmen dieses Versuchs soll mit Ihrer Hilfe ermittelt werden, nach welcher Zeit die ersten Ermüdungserscheinungen in der Hand-Arm-Region auftreten und in wie fern sie sich auf die Genauigkeit beim Treffen von Zielen auf dem Touchscreen auswirken.

### Ablauf

Der Versuch wird ca. 30 Minuten dauern und besteht aus folgenden Schritten:

1 Einleitung

2 Versuchsdurchführung

3 Fragebogen

### Datenschutz und Einverständniserklärung

Alle benötigten Daten werden anonym gespeichert und ausgewertet. Die Daten werden ausschließlich zu wissenschaftlichen Zwecken im Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik verwendet und nicht an Dritte weitergegeben.

## 2 Versuchsanleitung

Im folgenden Versuch sollen Sie Ziele auf einem Touchscreen mit dem Finger antippen. Bitte treffen Sie die Ziele so schnell und genau wie möglich! Zum Einstieg können Sie dies an zehn Zielen ausprobieren und sich passend positionieren. Bitte ändern Sie Ihre Körperhaltung während des Versuchs nicht!

### 3 Fragebogen

Bitte geben Sie Ihre Vorliebe in der Nutzung Ihrer Hände bei den folgenden Aktivitäten an, indem Sie die entsprechende Spalte ankreuzen (x)! Wo die Bevorzugung einer Hand so stark ist, dass Sie niemals die andere Hand verwenden würden, außer wenn Sie dazu gezwungen werden, kreuzen Sie die entsprechende Spalte bitte doppelt an (xx)! Wenn Sie bei einer Aktivität immer beide Hände gleichmäßig verwenden, kreuzen Sie beide Spalten an (x)! Einige der Aktivitäten benötigen beide Hände. In diesen Fällen ist der Teil der Aufgabe oder das Objekt, für welche die bevorzugte Hand angegeben werden soll, in Klammern angegeben. Bitte versuchen Sie alle Fragen zu beantworten und lassen Sie nur eine aus, wenn Sie keine Erfahrung mit dem Objekt oder der Aufgabe haben.

		Links	Rechts
1	Schreiben		
2	Zeichnen		
3	Werfen		
4	Schneiden		
5	Zahnbürste		
6	Messer (ohne Gabel)		
7	Löffel		
8	Besen (obere Hand)		
9	Streichholz anzünden (Streichholz)		
10	Schachtel öffnen (Deckel)		
	Gezählte x	LH=	RH=
	Summe	CT=RH+LH=	
	Differenz	D=RH-LH=	
	Ergebnis	(D/CT)·100=	

Datum und Uhrzeit des Versuchs:

Geschlecht:

Ellenbogenhöhe stehend:

Ich stimme der Verwendung des aufgezeichneten Videos zur Präsentation der Arbeit im Rahmen der Lehrveranstaltung zu:

ja: ☐      nein: ☐

Treiben Sie Sport, der speziell für die Arme beansprucht (z.B. Tischtennis, Rudern, Badminton, Tennis, ....)?

ja: ☐      nein: ☐

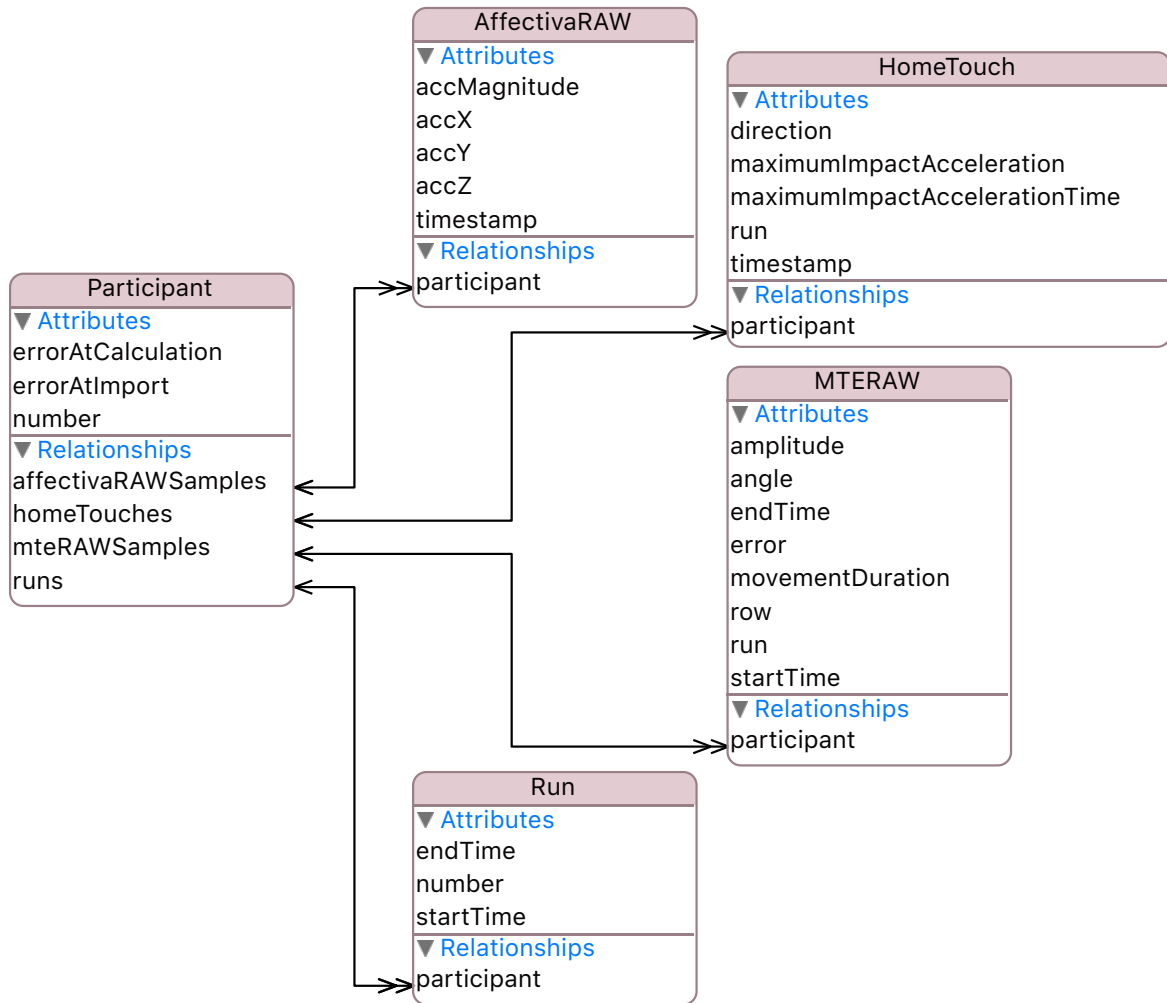
Kommentare:





## Anhang B – Datenbankmodell der Auswertesoftware zur empirischen Voruntersuchung der Biomechanik







## Anhang C – Auswertesoftware zur empirischen Voruntersuchung der Biomechanik



```

//
// AppDelegate.m
// diss-software
//
// Created by Michael Domhardt on 10.10.14.
// Copyright (c) 2014 Michael Domhardt. All rights reserved.
//

#import "AppDelegate.h"

// 3rd Party
#import "XMLReader.h"

// Core Data
#import "Participant.h"
#import "MTERAW.h"
#import "AfectivaRAW.h"
#import "Run.h"
#import "HomeTouch.h"

@interface AppDelegate ()

@property (weak) IBOutlet NSWindow *window;

@end

@implementation AppDelegate

#pragma mark - porperties

#pragma mark - apples default methods

- (void)applicationDidFinishLaunching:(NSNotification *)aNotification {
}

- (void)applicationWillTerminate:(NSNotification *)aNotification {
    // Insert code here to tear down your application
}

#pragma mark - Core Data stack

@synthesize persistentStoreCoordinator = _persistentStoreCoordinator;
@synthesize managedObjectModel = _managedObjectModel;
@synthesize managedObjectContext = _managedObjectContext;

- (NSURL *)applicationDocumentsDirectory {
    // The directory the application uses to store the Core Data store file.
    // This code uses a directory named
    // "self.edu.michaeldomhardt.diss_software" in the user's Application
    // Support directory.
    NSURL *appSupportURL = [[[NSFileManager defaultManager] URLsForDirectory:
        NSApplicationSupportDirectory inDomains:NSUserDomainMask] lastObject];
    return [appSupportURL
        URLByAppendingPathComponent:@"self.edu.michaeldomhardt.diss_software"]
    ;
}

- (NSManagedObjectContext *)managedObjectContext {
    // The managed object model for the application. It is a fatal error for

```



```

        the application not to be able to find and load its model.
    if (_managedObjectModel) {
        return _managedObjectModel;
    }

    NSURL *modelURL = [[NSBundle mainBundle] URLForResource:@"diss_software"
        withExtension:@"momd"];
    _managedObjectModel = [[NSManagedObjectModel alloc] initWithContentsOfURL:
        modelURL];
    return _managedObjectModel;
}

- (NSPersistentStoreCoordinator *)persistentStoreCoordinator {
    // The persistent store coordinator for the application. This
    // implementation creates and return a coordinator, having added the
    // store for the application to it. (The directory for the store is
    // created, if necessary.)
    if (_persistentStoreCoordinator) {
        return _persistentStoreCoordinator;
    }

    NSFileManager *fileManager = [NSFileManager defaultManager];
    NSURL *applicationDocumentsDirectory = [self applicationDocumentsDirectory
        ];
    BOOL shouldFail = NO;
    NSError *error = nil;
    NSString *failureReason = @"There was an error creating or loading the
        application's saved data.";

    // Make sure the application files directory is there
    NSDictionary *properties = [applicationDocumentsDirectory
        resourceValuesForKeys:[NSURLIsDirectoryKey] error:&error];
    if (properties) {
        if (![properties[NSURLIsDirectoryKey] boolValue]) {
            failureReason = [NSString stringWithFormat:@"Expected a folder to
                store application data, found a file (%@).",
                [applicationDocumentsDirectory path]];
            shouldFail = YES;
        }
    }
    else if ([error code] == NSFileReadNoSuchFileError) {
        error = nil;
        [fileManager createDirectoryAtPath:[applicationDocumentsDirectory path
            ] withIntermediateDirectories:YES attributes:nil error:&error];
    }

    if (!shouldFail && !error) {
        NSPersistentStoreCoordinator *coordinator =
            [[NSPersistentStoreCoordinator alloc] initWithManagedObjectModel:
                [self managedObjectModel]];
        NSURL *url = [applicationDocumentsDirectory
            URLByAppendingPathComponent:@"OSXCoreDataObjC.storedata"];

        NSDictionary *options = @{
            NSMigratePersistentStoresAutomaticallyOption : @(YES),
            NSInferMappingModelAutomaticallyOption :
                @(YES) };
        // uncomment to migrate the data model
        options = nil;

        if (![coordinator addPersistentStoreWithType:NSXMLStoreType

```

```

configuration:nil URL:url options:options error:&error]) {
    coordinator = nil;

    // Move Incompatible Store
    if ([fileManager fileExistsAtPath:[url path]]) {
        NSURL *corruptURL = [[self
            applicationIncompatibleStoresDirectory]
            URLByAppendingPathComponent:[self nameForIncompatibleStore
            ]];

        // Move Corrupt Store
        NSError *errorMoveStore = nil;
        [fileManager moveItemAtURL:url toURL:corruptURL error:&
            errorMoveStore];

        if (errorMoveStore) {
            NSLog(@" Warning: Unable to move corrupt store.");
        }
        else {
            // Create a new persistent store
            NSError *errorAddingStore = nil;
            if (![coordinator addPersistentStoreWithType:
                NSSQLiteStoreType
                    configuration:nil
                    URL:url
                    options:options
                    error:&
                    errorAddingStore]) {
                NSLog(@" Warning: Unable to create persistent store
                    after recovery. %@, %@", errorAddingStore,
                    errorAddingStore.localizedDescription);
            }
        }
        NSLog(@" Warning: New persistent store created due to corrupt
            old file");
    }

    _persistentStoreCoordinator = coordinator;
}

if (shouldFail || error) {
    // Report any error we got.
    NSMutableDictionary *dict = [NSMutableDictionary dictionary];
    dict[NSLocalizedStringKey] = @"Failed to initialize the
        application's saved data";
    dict[NSLocalizedStringFailureReasonKey] = failureReason;
    if (error) {
        dict[NSUnderlyingErrorKey] = error;
    }
    error = [NSError errorWithDomain:@"YOUR_ERROR_DOMAIN" code:9999
        userInfo:dict];
    [[NSApplication sharedApplication] presentError:error];
}

return _persistentStoreCoordinator;
}

- (NSManagedObjectContext *)managedObjectContext {
    // Returns the managed object context for the application (which is

```

```

        already bound to the persistent store coordinator for the
        application.)
    if (_managedObjectContext) {
        return _managedObjectContext;
    }

    NSPersistentStoreCoordinator *coordinator = [self
        persistentStoreCoordinator];
    if (!coordinator) {
        return nil;
    }
    _managedObjectContext = [[NSManagedObjectContext alloc] init];
    [_managedObjectContext setPersistentStoreCoordinator:coordinator];

    // implementation according to https://developer.apple.com/library/ios/documentation/Cocoa/Conceptual/CoreData/Articles/cdImporting.html
    [_managedObjectContext setUndoManager:nil]; // disable core data undo
        manager to save memory during import

    return _managedObjectContext;
}

#pragma mark - Core Data Saving and Undo support

- (void)saveAction:(id)sender {
    // Performs the save action for the application, which is to send the
    // save: message to the application's managed object context. Any
    // encountered errors are presented to the user.
    if (![self managedObjectContext] commitEditing) {
        NSLog(@"%@:%@ unable to commit editing before saving", [self class],
            NSStringFromSelector(_cmd));
    }

    NSError *error = nil;
    if ([self managedObjectContext] hasChanges) && ![self
        managedObjectContext] save:&error) {
        [[NSApplication sharedApplication] presentError:error];
    }

    // [self.managedObjectContext refreshObject:sender
        mergeChanges:NO];
    [self managedObjectContext] reset;
}

- (NSUndoManager *)windowWillReturnUndoManager:(NSWindow *)window {
    // Returns the NSUndoManager for the application. In this case, the
    // manager returned is that of the managed object context for the
    // application.
    return [self managedObjectContext] undoManager;
}

- (NSApplicationTerminateReply)applicationShouldTerminate:(NSApplication *)
    sender {
    // Save changes in the application's managed object context before the
    // application terminates.

    if (!_managedObjectContext) {
        return NSTerminateNow;
    }
}

```

```

if (![self managedObjectContext] commitEditing)) {
    NSLog(@"%@:%@ unable to commit editing to terminate", [self class],
        NSStringFromSelector(_cmd));
    return NSTerminateCancel;
}

if (![self managedObjectContext] hasChanges)) {
    return NSTerminateNow;
}

NSError *error = nil;
if (![self managedObjectContext] save:&error)) {

    // Customize this code block to include application-specific recovery
    steps.
    BOOL result = [sender presentError:error];
    if (result) {
        return NSTerminateCancel;
    }

    NSString *question = NSLocalizedString(@"Could not save changes while
        quitting. Quit anyway?", @"Quit without saves error question
        message");
    NSString *info = NSLocalizedString(@"Quitting now will lose any
        changes you have made since the last successful save", @"Quit
        without saves error question info");
    NSString *quitButton = NSLocalizedString(@"Quit anyway", @"Quit anyway
        button title");
    NSString *cancelButton = NSLocalizedString(@"Cancel", @"Cancel button
        title");
    NSAlert *alert = [[NSAlert alloc] init];
    [alert setMessageText:question];
    [alert setInformativeText:info];
    [alert addButtonWithTitle:quitButton];
    [alert addButtonWithTitle:cancelButton];

    NSInteger answer = [alert runModal];

    if (answer == NSAlertFirstButtonReturn) {
        return NSTerminateCancel;
    }
}

return NSTerminateNow;
}

#pragma mark - Core Data helper methods

- (NSURL *)applicationStoresDirectory {
    NSFileManager *fm = [NSFileManager defaultManager];
    NSURL *applicationApplicationSupportDirectory = [[fm URLsForDirectory:
        NSApplicationSupportDirectory inDomains:NSUserDomainMask] lastObject];
    NSURL *URL = [applicationApplicationSupportDirectory
        URLByAppendingPathComponent:@"Stores"];

    if (![fm fileExistsAtPath:[URL path]]) {
        NSError *error = nil;
        [fm createDirectoryAtURL:URL withIntermediateDirectories:YES
            attributes:nil error:&error];
    }
}

```

```

        if (error) {
            NSLog(@"Unable to create directory for data stores.");

            return nil;
        }
    }

    return URL;
}

- (NSURL *)applicationIncompatibleStoresDirectory {
    NSFileManager *fm = [NSFileManager defaultManager];
    NSURL *URL = [[self applicationStoresDirectory]
        URLByAppendingPathComponent:@"Incompatible"];

    if (![fm fileExistsAtPath:[URL path]]) {
        NSError *error = nil;
        [fm createDirectoryAtURL:URL withIntermediateDirectories:YES
            attributes:nil error:&error];

        if (error) {
            NSLog(@"Unable to create directory for corrupt data stores.");

            return nil;
        }
    }

    return URL;
}

- (NSString *)nameForIncompatibleStore {
    // Initialize Date Formatter
    NSDateFormatter *dateFormatter = [[NSDateFormatter alloc] init];

    // Configure Date Formatter
    [dateFormatter setFormatterBehavior:NSDateFormatterBehavior10_4];
    [dateFormatter setDateFormat:@"yyyy-MM-dd-HH-mm-ss"];

    return [NSString stringWithFormat:@"%s%@", OSXCOREDATAOBJC_STOREDATA,
        [dateFormatter stringFromDate:[NSDate date]]];
}

- (Participant *)fetchParticipantWithNumber:(int)participantNumber {
    Participant* result = nil;

    NSFetchRequest *fetchRequest = [NSFetchRequest
        fetchRequestWithEntityName:@"Participant"];
    fetchRequest.predicate = [NSPredicate predicateWithFormat:@"number == %@",
        [NSNumber numberWithInt:participantNumber]];
    fetchRequest.fetchLimit = 1;

    NSError *error = nil;
    NSArray *fetchedEntries = [[self managedObjectContext]
        executeFetchRequest:fetchRequest error:&error];

    if (!error) {
        if (fetchedEntries.count == 1) {
            if ([[fetchedEntries firstObject] isKindOfClass:[Participant class]]) {
                result = [fetchedEntries firstObject];
            }
        }
    }
}

```

```

        }
    }
}
else {
    NSLog(@" error in method %@ and class %@: %@, %@",
          NSStringFromSelector(_cmd), [self class], error, error.
          localizedDescription);
}

return result;
}

- (NSArray *) fetchObjectsOfEntity:(NSString*)entityName
  forParticipantWithNumber:(int)participantNumber sortedByKey:(NSString *)
  sortKey {
    NSArray *result = nil;

    NSFetchRequest *fetchRequest = [NSFetchRequest fetchRequestWithEntityName:
                                     entityName];
    fetchRequest.predicate = [NSPredicate
                             predicateWithFormat:@"participant.number == %@",
                             [NSNumber
                              numberWithInt:participantNumber]];
    fetchRequest.sortDescriptors = @[[[NSSortDescriptor alloc] initWithKey:
                                       sortKey
                                       ascending:YES
                                       ]]];

    NSError *error = nil;
    NSArray *fetchedObjects = [[self managedObjectContext]
                              executeFetchRequest:fetchRequest error:&error];

    if (!error && fetchedObjects && fetchedObjects.count > 0) {
        result = fetchedObjects;
    }
    else if (error){
        NSLog(@" error in method %@ and class %@: %@, %@",
              NSStringFromSelector(_cmd), [self class], error, error.
              localizedDescription);
    }
    else if (fetchedObjects.count == 0) {
        NSLog(@" warning in method %@ and class %@: found %lu results for
              entity %@ and sortKey %@", NSStringFromSelector(_cmd), [self class
              ], fetchedObjects.count, entityName, sortKey);
    }
    else {
        NSLog(@" warning in method %@ and class %@: No fetchedObject was
              returned but no error occured. Result %@ was returned.",
              NSStringFromSelector(_cmd), [self class], result);
    }

    return result;
}

- (NSArray *) fetchObjectsOfEntity:(NSString*)entityName
  forParticipantWithNumber:(int)participantNumber fromStartTime:(NSDate *)
  startTime toEndTime:(NSDate *)endTime sortedByKey:(NSString *)sortKey {
    NSArray *result = nil;

    NSFetchRequest *fetchRequest = [NSFetchRequest fetchRequestWithEntityName:
                                     entityName];

```

```

fetchRequest.predicate = [NSPredicate
    predicateWithFormat:@"(participant.number == %@) AND (timestamp >= %@)
    AND (timestamp <= %@)", [NSNumber numberWithInt:participantNumber],
    startTime, endTime];
fetchRequest.sortDescriptors = @[ [NSSortDescriptor alloc] initWithKey:
    sortKey
                                ascending:YES
                                ]];

NSError *error = nil;
NSArray *fetchedObjects = [[self managedObjectContext]
    executeFetchRequest:fetchRequest error:&error];

if (!error && fetchedObjects && fetchedObjects.count > 0) {
    result = fetchedObjects;
}
else if (error){
    NSLog(@" error in method %@ and class %@: %@, %@",
        NSStringFromSelector(_cmd), [self class], error, error.
        localizedDescription);
}
else if (fetchedObjects.count == 0) {
    NSLog(@" warning in method %@ and class %@: found %lu results for
    entity %@ in the time between %@ and %@", NSStringFromSelector
    (_cmd), [self class], fetchedObjects.count, entityName, startTime,
    endTime);
}
else {
    NSLog(@" warning in method %@ and class %@: No fetchedObject was
    returned but no error occurred. Result %@ was returned.",
    NSStringFromSelector(_cmd), [self class], result);
}

return result;
}

```

#pragma mark – Private Methods – Main Loop

```

/**
 * calling all import, calculation and export methods for one specific
 * participant
 *
 * @param participantNumber specific participant identification number,
 * derived from the chronologic order of study participation
 */
-(void)calcParticipant:(int)participantNumber {
    NSLog(@" running method %@@i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
        participantNumber, [self class]);

    self.numerTextField.enabled = NO;
    self.calcThisParticipantButton.enabled = NO;
    self.calcAllParticipantButton.enabled = NO;

    [self newParticipantWithNumber:participantNumber];

    [self addObservationDataFromMteToParticipantWithNumber:participantNumber];
    [self addAfectivaObservationsToParticipantWithNumber:participantNumber];

    [self calcHomeTouchesforParticipantWithNumber:participantNumber];
}

```

```

        [self calcMaximumImpactAccelerationsForParticipantWithNumber:
            participantNumber];

        [self exportHomeTouchesForParticipantWithNumber:participantNumber];

        // [self deleteParticipantWithNumber:participantNumber];

        self.numerTextField.enabled = YES;
        self.calcThisParticipantButton.enabled = YES;
        self.calcAllParticipantButton.enabled = YES;

        NSLog(@" participant %i complete", participantNumber);
    }

- (void) newParticipantWithNumber:(int)participantNumber {
    NSLog(@" running method %i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
        participantNumber, [self class]);

    if (![self fetchParticipantWithNumber:participantNumber]) {
        Participant* participant = [NSEntityDescription
            insertNewObjectForEntityForName:@"Participant"
            inManagedObjectContext:self.managedObjectContext];
        participant.number = [NSNumber numberWithInt:participantNumber];
        [self saveAction:participant];
    }
}

- (void) deleteParticipantWithNumber:(int)participantNumber {
    NSLog(@" running method %i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
        participantNumber, [self class]);

    [[self managedObjectContext] reset];

    Participant* participant = [self fetchParticipantWithNumber:
        participantNumber];

    if (participant) {
        [self.managedObjectContext deleteObject:participant];
        [self saveAction:nil];
    }
}

#pragma mark - Private Methods - Import

- (NSDictionary *)readXMLFileWithFilePath:(NSString *)filePath {
    // NSLog(@" running method '%@' in class '%@' with file path %@",
        NSStringFromSelector(_cmd), [self class], filePath);

    NSDictionary * result = [[NSDictionary alloc] init];

    NSData *databuffer;
    databuffer = [[NSFileManager defaultManager] contentsAtPath:filePath];

    NSError * error = nil;
    result = [XMLReader dictionaryWithXMLData:databuffer
        options:XMLReaderOptionsProcessNamespaces
        error:&error];
}

```



```

databuffer = nil;

if (error) {
    result = nil;
    NSLog(@" error in method %@ and class %@: %@, %@",
        NSStringFromSelector(_cmd), [self class], error, [error
        localizedDescription]);
}

return result;
}

- (void)addObservationDataFromMteToParticipantWithNumber:(int)
participantNumber {
    NSLog(@" running method %@@i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
        participantNumber, [self class]);

    NSArray *paths = NSSearchPathForDirectoriesInDomains(NSDesktopDirectory,
        NSUserDomainMask, YES);
    NSString *docDir = [paths objectAtIndex:0];
    NSString *folderPath = [[NSString alloc] init];

    if (participantNumber < 10) {
        folderPath = [NSString stringWithFormat:@"Diss/Statistik/
            BiomechanikVorstudie/01_RAW/MTE-runs/VP0%i/", participantNumber];
    }
    else {
        folderPath = [NSString stringWithFormat:@"Diss/Statistik/
            BiomechanikVorstudie/01_RAW/MTE-runs/VP%i/", participantNumber];
    }

    NSString *directoryPath = [docDir stringByAppendingPathComponent:
        folderPath];

    NSError * error = nil;
    NSArray * fileList = [[NSFileManager defaultManager]
        contentsOfDirectoryAtPath:directoryPath error:&error];

    NSMutableSet* mteRAWSamples = [[NSMutableSet alloc] init];
    NSMutableSet* runs = [[NSMutableSet alloc] init];

    if (!error) {
        fileList = [fileList sortedArrayUsingSelector:@selector(compare)];

        if ([fileList[0] isEqualToString:@"DS_Store"]) {
            fileList = [fileList subarrayWithRange:NSMakeRange(1, fileList.
                count-1)]; // remove .DS_Store entry
        }

        for (NSString * fileName in fileList) {
            NSInteger runNumber = [fileList indexOfObject:fileName] + 1;

            NSString * filePath = [NSString stringWithFormat:@"%s/%s",
                directoryPath, fileName];
            NSDictionary *mteDict = [self readXMLFileWithFilePath:filePath];

            if (mteDict) {
                NSArray * trialData = [[mteDict objectForKey:@"result"]
                    objectForKey:@"trials" objectForKey:@"trial"];
            }
        }
    }
}

```

```

Run* run = [NSEntityDescription
    insertNewObjectForEntityForName:@"Run"
    inManagedObjectContext:self.managedObjectContext];

for (NSDictionary *touchEvent in trialData) {
    NSInteger row = [trialData indexOfObject:touchEvent] + 1;

    MTERAW *mteRAWSample = [self
        mteObservationDataFromTouchEvent:touchEvent forRun:
        runNumber andRow:row];

    if (mteRAWSample) {
        [mteRAWSamples addObject:mteRAWSample];

        // detect MTE cycles
        if (row == 1){

            run.number = [NSNumber numberWithInt:runNumber
                ];
            run.startTime = mteRAWSample.startTime;

        }

        else if (run && (row == [trialData count])) {
            run.endTime = mteRAWSample.endTime;
        }

    }

    [runs addObject:run];
}
mteDict = nil;
}

Participant* participant = [self fetchParticipantWithNumber:
    participantNumber];

if (error) {
    participant.errorAtImport = [NSNumber numberWithBool:YES];
    NSLog(@" error in method %@ and class %@: %@, %@",
        NSStringFromSelector(_cmd), [self class], error, [error
        localizedDescription]);
}
else {
    [participant addMteRAWSamples:mteRAWSamples];
    [participant addRuns:runs];
}
[self saveAction:participant];
mteRAWSamples = nil;
runs = nil;
}

- (MTERAW *)mteObservationDataFromTouchEvent:(NSDictionary *)touchEvent
forRun:(NSInteger)run andRow:(NSInteger)row {
    MTERAW *mteRAWSample = [NSEntityDescription
        insertNewObjectForEntityForName:@"MTERAW" inManagedObjectContext:self.
        managedObjectContext];

    mteRAWSample.amplitude = [NSNumber numberWithInt:[touchEvent

```

```

        objectForKey:@"amplitude"] objectForKey:@"text"] integerValue]];
mteRAWSample.angle = [NSNumber numberWithInt: [[[touchEvent
    objectForKey:@"angle"] objectForKey:@"text"] integerValue]];
mteRAWSample.error = [NSNumber numberWithInt: [[[touchEvent
    objectForKey:@"num-errors"] objectForKey:@"text"] integerValue]];
mteRAWSample.movementDuration = [NSNumber numberWithInt: [[[touchEvent
    objectForKey:@"mt"] objectForKey:@"text"] integerValue]];
mteRAWSample.startTime = [NSDate dateWithTimeIntervalSince1970:
    [[[touchEvent objectForKey:@"acq-start-time"] objectForKey:@"text"]
    doubleValue]/1000];
mteRAWSample.endTime = [NSDate dateWithTimeIntervalSince1970: [[[touchEvent
    objectForKey:@"acq-end-time"] objectForKey:@"text"] doubleValue]/1000]
    ;

mteRAWSample.run = [NSNumber numberWithInt: run];
mteRAWSample.row = [NSNumber numberWithInt: row];

    return mteRAWSample;
}

- (void) addAfectivaObservationsToParticipantWithNumber:(int)
    participantNumber {
    NSLog(@"    running method %@@i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
        participantNumber, [self class]);

    NSArray* paths = NSSearchPathForDirectoriesInDomains(NSDesktopDirectory,
        NSUserDomainMask, YES);
    NSString* desktop = [paths objectAtIndex:0];
    NSString* folderPath = @"/Diss/Statistik/BiomechanikVorstudie/02_Data/
        AfectivaQSensor";
    NSString* directoryPath = [desktop stringByAppendingPathComponent:
        folderPath];
    NSString* fileName = [NSString stringWithFormat:@"VP0%i_Afectiva.csv",
        participantNumber];
    NSString *filePath = [directoryPath stringByAppendingPathComponent:
        [NSString stringWithFormat:@"%@", fileName]];

    NSError* error = nil;

    NSArray *linesOfText = [[NSString stringWithContentsOfFile:filePath
        encoding:
            NSUTF8StringEncoding
            error:&error]
        componentsSeparatedByString:@"\n"];

    NSMutableSet* samples = [[NSMutableSet alloc] init];

    int samplingRate = [self samplingRateFromString:linesOfText[4]];
    double durationPerSample = 1./samplingRate;

    NSDate* startTime = [self startTimeFromTimeLineString:linesOfText[5]];

    if (startTime && durationPerSample) {
        linesOfText = [linesOfText subarrayWithRange:NSMakeRange(8,
            linesOfText.count-8)]; //cut file header (lines 0 - 7)

        NSUInteger index = 0;

        for (NSString* textLine in linesOfText) {

```

```

AffectivaRAW* affectivaRAWSample = [self
    affectivaObservationDataFromFileRow:textLine];

if (affectivaRAWSample) {
    NSTimeInterval offset = index * durationPerSample;
    affectivaRAWSample.timestamp = [startTime
        dateByAddingTimeInterval:offset];
    [samples addObject:affectivaRAWSample];
    index ++;
}
else {
    NSInteger missingPosition = [linesOfText indexOfObject:
        textLine];
    NSInteger before = missingPosition - 1;
    NSInteger after = missingPosition + 1;

    if (before < 0) {
        before = 0;
        NSLog(@" warning in method %@ and class %@: Missing data
            in first line.", NSStringFromSelector(_cmd), [self
                class]);
    }

    if (after > linesOfText.count-1) {
        after = linesOfText.count-1;
        NSLog(@" warning in method %@ and class %@: Missing data
            in last line.", NSStringFromSelector(_cmd), [self
                class]);
    }

    NSLog(@" warning in method %@ and class %@: Missing data
        between line %@ and %@.", NSStringFromSelector(_cmd),
        [self class], linesOfText[before], linesOfText[after]);
}

}
}
else {
    NSMutableDictionary* details = [NSMutableDictionary dictionary];
    [details setValue:@"start time or duration per sample missing for
        AffectivaRAW object needed but missing" forKey:
        NSLocalizedDescriptionKey];
    // populate the error object with the details
    error = [NSError errorWithDomain:@"affectiva" code:200 userInfo:
        details];
}

Participant* participant = [self fetchParticipantWithNumber:
    participantNumber];

if (error) {
    participant.errorAtImport = [NSNumber numberWithBool:YES];
    NSLog(@" error in method %@ and class %@: %@, %@",
        NSStringFromSelector(_cmd), [self class], error, [error
            localizedDescription]);
}
else {
    [participant addAffectivaRAWSamples:samples];
}
}

```

```

        [self saveAction:participant];
    }

- (int) samplingRateFromString:(NSString *)string {
    int result = 0;

    NSArray* columns = [string componentsSeparatedByString:@" "];
    result = [columns[2] intValue];

    return result;
}

- (NSDate*) startTimeFromTimeLineString:(NSString *)timeLineString {
    NSDate* result = nil;

    NSArray* columns = [timeLineString componentsSeparatedByString:@" "];

    NSString* timeStampString = [NSString stringWithFormat:@"%d %d", columns[2], columns[3]];

    NSDateFormatter *dateFormatter = [[NSDateFormatter alloc] init];
    [dateFormatter setDateFormat:@"yyyy-MM-dd HH:mm:ss"];
    result = [dateFormatter dateFromString: timeStampString];

    return result;
}

- (AffectivaRAW *)affectivaObservationDataFromFileRow:(NSString*)fileRow {
    AffectivaRAW* affectivaRAWSample = nil;

    NSArray* columns = [fileRow componentsSeparatedByString:@","];

    if (columns.count < 6) {
        NSLog(@" warning in method %@ and class %@: File row %@ has %lu data entries.", NSStringFromSelector(_cmd), [self class], fileRow, columns.count);
    }
    else {
        affectivaRAWSample = [NSEntityDescription
            insertNewObjectForEntityForName:@"AffectivaRAW"
            inManagedObjectContext:self.managedObjectContext];

        affectivaRAWSample.accX = [self numberFromString:[columns
            objectAtIndex:2]];
        affectivaRAWSample.accY = [self numberFromString:[columns
            objectAtIndex:1]];
        affectivaRAWSample.accZ = [self numberFromString:[columns
            objectAtIndex:0]];

        double accX = fabs([self convertedNumber:affectivaRAWSample.accX]);
        double accY = fabs([self convertedNumber:affectivaRAWSample.accY]);
        double accZ = fabs([self convertedNumber:affectivaRAWSample.accZ]);

        double squareX = pow(accX, 2); //in [g]
        double squareY = pow(accY, 2); //in [g]
        double squareZ = pow(accZ, 2); //in [g]

        double sum = squareX + squareY + squareZ;
    }
}

```

```

        double magnitude = sqrt(sum); //in [g]

        affectivaRAWSample.accMagnitude = [NSNumber numberWithDouble:magnitude
            *9.81]; //in [m/s^2]
    }

    return affectivaRAWSample;
}

- (NSNumber *)numberFromString:(NSString *)string {
    NSNumber* result = [NSNumber numberWithDouble:0.0];

    if ([string doubleValue]) {
        result = [NSNumber numberWithDouble:[string doubleValue]];
    }
    else if ([string intValue]) {
        result = [NSNumber numberWithInt:[string intValue]];
    }
    // else {
    //     NSLog(@" warning in method %@ and class %@: Couldn't read
    //         number from '%@'. Used %@ instead.", NSStringFromSelector(_cmd), [self
    //         class], string, result);
    // }

    return result;
}

```

#pragma mark - Private Methods - Calculation

```

- (void)calcHomeTouchesforParticipantWithNumber:(int)participantNumber {
    NSLog(@" running method %@@i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
        participantNumber, [self class]);

    NSArray* mteTouches = [self fetchObjectsOfEntity:@"MTERAW"
        forParticipantWithNumber:participantNumber
        sortedByKey:@"startTime"];

    NSMutableArray* runs = [[NSMutableArray alloc] init];

    NSArray* runData = [self fetchObjectsOfEntity:@"Run"
        forParticipantWithNumber:participantNumber
        sortedByKey:@"number"];

    Run* lastRun = [runData lastObject];
    int runCount = [lastRun.number intValue];

    for (int runNumber = 1; runNumber <= runCount; runNumber++) {
        runs = [self addMTETouches:mteTouches ForRun:runNumber ToRuns:runs];
    }
    mteTouches = nil;

    NSMutableSet *homeTouches = [[NSMutableSet alloc] init];

    for (NSArray* runSamples in runs) {
        for (MTERAW *mteRAW in runSamples) {
            long objectIndex = [runSamples indexOfObject:mteRAW];

            if (objectIndex > 0 && [mteRAW.error intValue] == 0) {

```

```

        HomeTouch* homeTouch = [NSEntityDescription
            insertNewObjectForEntityForName:@"HomeTouch"

                                inManagedObjectContext:
                                self.managedObjectContext
                                ];

        homeTouch.run = mteRAW.run;
        homeTouch.timestamp = mteRAW.startTime;
        homeTouch.participant = mteRAW.participant;

        MTERAW* previousSample = [runSamples objectAtIndex:objectIndex
            -1];
        double angle = [self convertedNumber:previousSample.angle];
        [self.managedObjectContext refreshObject:previousSample
            mergeChanges:NO];

        homeTouch.direction = [NSNumber numberWithDouble:angle];

        [homeTouches addObject:homeTouch];
    }

    [self.managedObjectContext refreshObject:mteRAW mergeChanges:NO];
}

}

// Participant* participant = [self
    fetchParticipantWithNumber:participantNumber];
// [participant addHomeTouches:homeTouches];
[self saveAction:nil];
homeTouches = nil;
runs = nil;
}

- (NSMutableArray *)addMTETouches:(NSArray *)mteTouches ForRun:(int)runNumber
  ToRuns:(NSMutableArray *)runs {
    NSPredicate *predicate = [NSPredicate predicateWithFormat:@"run == %@",
        [NSNumber numberWithInt:runNumber]];
    NSArray* runSamples = [mteTouches filteredArrayUsingPredicate:predicate];

    if (runSamples.count > 0) {
        [runs addObject:runSamples];
        runSamples = nil;
    }

    return runs;
}

- (void)calcMaximumImpactAccelerationsForParticipantWithNumber:(int)
  participantNumber {
    NSLog(@" running method %@@i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
        participantNumber, [self class]);

    NSTimeInterval rmsInterval = 0.064;// in [s], sample duration @32Hz =
        0.03125s

    NSArray* homeTouches = [self fetchObjectsOfEntity:@"HomeTouch"
        forParticipantWithNumber:participantNumber

```

```

        sortedByKey:@"timestamp"];

for (HomeTouch* homeTouch in homeTouches) {
    NSArray* affectivaRAWSamples = [self
        fetchObjectsOfEntity:@"AffectivaRAW"
        forParticipantWithNumber:
            participantNumber
            fromStartTime:[homeTouch.
                timestamp
                dateByAddingTimeInterval:
                    -rmsInterval]
            toEndTime:[homeTouch.
                timestamp
                dateByAddingTimeInterval:
                    rmsInterval]

        sortedByKey:@"accMagnitude"];

    if (!affectivaRAWSamples || affectivaRAWSamples.count == 0) {
        NSLog(@" warning in method %@ and class %@: No Affectiva samples
            were found for homeTouch %@", NSStringFromSelector(_cmd),
            [self class], homeTouch);
    }
    else {
        AffectivaRAW* maxSample = [affectivaRAWSamples lastObject];

        homeTouch.maximumImpactAcceleration = maxSample.accMagnitude;
        homeTouch.maximumImpactAccelerationTime = maxSample.timestamp;
    }

    affectivaRAWSamples = nil;
}

[self saveAction:nil];
homeTouches = nil;
}

- (double) convertedNumber:(NSNumber *)number {
    double result = 0.0;

    if ([number doubleValue]) {
        result = [number doubleValue];
    } else if ([number intValue]) {
        result = (double)[number intValue];
    }
    // else {
    //     NSLog(@" warning in method %@ and class %@: Couldn't convert
    //         NSNumber '%@' to double. Used 0.0 instead.",
    //         NSStringFromSelector(_cmd), [self class], number);
    // }

    return result;
}

#pragma mark - Private Methods - Export

- (void) exportHomeTouchesForParticipantWithNumber:(int)participantNumber {
    NSLog(@" running method %@@i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
        participantNumber, [self class]);
}

```



```

NSArray* runs = [self fetchObjectsOfEntity:@"Run"
                  forParticipantWithNumber:participantNumber
                  sortedByKey:@"number"];
Run* firstRun = [runs firstObject];
NSDate* observationStartTime = firstRun.startTime;

NSMutableString *csvFileContent = [[NSMutableString alloc] init];
[csvFileContent
 appendString:@"participant,run,timestamp,maximumImpactAcceleration,max
             imumImpactAccelerationTime\n"];

NSArray* samples = [self fetchObjectsOfEntity:@"HomeTouch"
                      forParticipantWithNumber:participantNumber
                      sortedByKey:@"timestamp"];

for (HomeTouch *sample in samples) {
    NSMutableArray * csvLineElements = [[NSMutableArray alloc] init];

    [csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%i",
        participantNumber]];
    [csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%i", [sample.
        run intValue]]];
    [csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%f", [sample
        .timestamp timeIntervalSinceDate:observationStartTime]]];
    [csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%f", [self
        convertedNumber: sample.maximumImpactAcceleration]]];
    [csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%f", [sample
        .maximumImpactAccelerationTime timeIntervalSinceDate:
        observationStartTime]]];

    [self.managedObjectContext refreshObject:sample mergeChanges:NO];

    NSString * csvLine = [csvLineElements componentsJoinedByString: @","];
    ;
    [csvFileContent appendString:[NSString stringWithFormat:@"%s\n",
        csvLine]];
    csvLine = nil;
    csvLineElements = nil;
}
samples = nil;

NSArray *paths = NSSearchPathForDirectoriesInDomains(NSDesktopDirectory,
    NSUserDomainMask, YES);
NSString *docDir = [paths objectAtIndex:0];
NSString *folderPath = @"/Diss/Statistik/BiomechanikVorstudie/03_RESULTS/"
;
NSString *filename = [NSString stringWithFormat:@"HomeTouches_Participant
%i.csv", participantNumber];
NSString *filePath = [docDir stringByAppendingPathComponent:[NSString
    stringWithFormat:@"%s/%s", folderPath, filename]];

NSError *error = nil;
[csvFileContent writeToFile:filePath
                  atomically:YES
                  encoding:NSUTF8StringEncoding
                  error:&error];
csvFileContent = nil;

if (error) {

```

```

        NSLog(@" error during write %@: %@, %@", filename, error, error.
              localizedDescription);
    }
}

#pragma mark - IBActions

- (IBAction)calcThisParticipantButtonClicked:(id)sender {
    if ([self.numerTextField intValue]) {
        int participantNumber = [self.numerTextField intValue];

        if (participantNumber > 0 && participantNumber <= 9) {
            [self calcParticipant:participantNumber];
        }
    }
}

- (IBAction)calcAllParticipantButtonClicked:(id)sender {
    for (int participantNumber = 1; participantNumber <= 9; participantNumber++) {
        [self calcParticipant:participantNumber];
    }
}

- (IBAction)calcParticipantRangeButtonClicked:(id)sender {
    for (int participantNumber = [self.fromNumerTextField intValue];
        participantNumber <= [self.toNumerTextField intValue];
        participantNumber++) {
        [self calcParticipant:participantNumber];
    }
}

@end

```



## Anhang D – Inbetriebnahmeprotokoll zur empirischen Untersuchung der Biomechanik



# Ermüdung des Hand-Arm-Komplexes durch Touchscreeninteraktion

---

## *Inbetriebnahmeprotokoll*

0. generelle Vorbereitung
  - a. Beschleunigungs- und EMG-Sender laden
  - b. Wegweiser im Gebäude und Schild am Labor anbringen
  - c. Heizung im Vorbereitungsraum einschalten
  - d. Gardinen im Versuchslabor schließen
  - e. hintere Reihe Deckenleuchten im Labor ausschalten
  - f. Verbrauchsmaterial prüfen und auffüllen (Elektroden, Sandpapier, Alkohol, Tupfer, Süßigkeiten, Versuchspersonenerklärung)
  - g. zentrale Steckdosenleiste einschalten
1. Motion Tracking und Strom einschalten
  - a. Motion-Tracking-Kameras per Schalter einschalten
  - b. Motion-Tracking-Rechner einschalten
2. Rechner *Versuchsperson* starten
  - a. Login: Noldus, Passwort: Noldus
  - b. Programm „EloTouch-Tool“ starten
  - c. Programm „Microsoft Rebound“ starten
  - d. Programm „MTE“ starten
    - i. im Menü „Tools“ die Option „Launch Remote Server“ auswählen
3. Rechner *BioPac* starten
  - a. Login: Noldus, Passwort: Noldus
  - b. Programm „AcqKnowledge“ starten
4. Rechner *MediaRecorder* starten
  - a. Login: Noldus, Passwort: Noldus
  - b. USB-Dongle *MediaRecorder* anschließen
  - c. Programm „MediaRecorder“ starten
5. Rechner *Observer* starten
  - a. Login: Noldus, Passwort: Noldus
  - b. USB-Dongle *Observer* anschließen
  - c. Programm „A.R.T. DTrack2“ starten
    - i. in der Menüleiste die Option „Start“ auswählen
  - d. Programm „A.R.T. DTrack Recorder“ starten
  - e. Programm „The Observer XT 11“ starten

- i. neue Aufzeichnung entsprechend Abbildung 1 anlegen

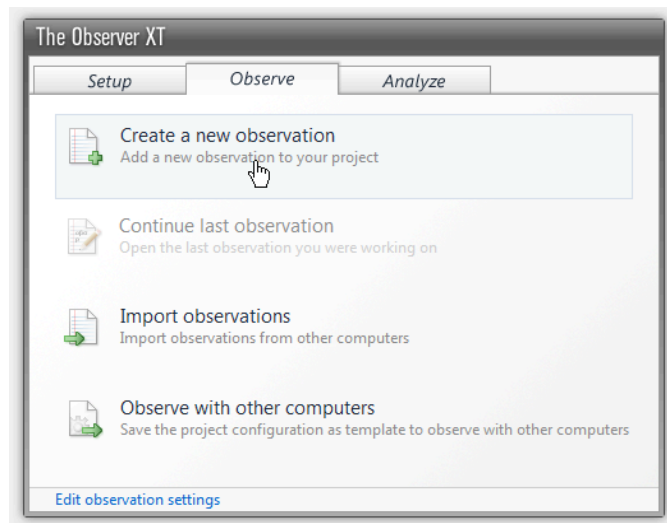


Abbildung 1: Neue Aufzeichnung in Observer starten

- f. Programm „MTE“ starten
  - i. im Menü „Experiment“ die Option „Run“ wählen
  - ii. Experiment entsprechend Abbildung 2 konfigurieren

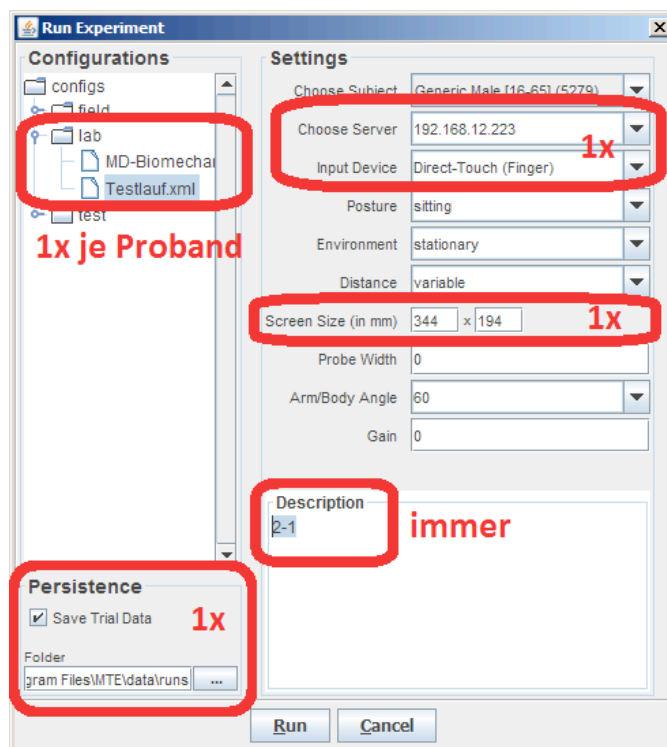


Abbildung 2: Konfiguration eines Experiments im Programm „MTE“

# Anhang E – Versuchspersonenerklärung zur empirischen Untersuchung der Biomechanik





# Ermüdung des Hand-Arm-Komplexes durch Touchscreeninteraktion

---

## *Versuchspersonenerklärung*

### Datenschutz und Ethik

Alle benötigten Daten werden anonym gespeichert und ausgewertet. Die Daten werden ausschließlich zu wissenschaftlichen Zwecken im Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik verwendet und nicht an Dritte weitergegeben. Die Teilnahme an der Untersuchung ist freiwillig und ein Abbruch ist jederzeit ohne Angabe von Gründen möglich.

### Einverständniserklärung

Ich habe den oben aufgeführten Text gelesen und verstanden. Offene Fragen habe ich durch Nachfragen geklärt.

Vorname: \_\_\_\_\_

Nachname: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_

### Zukünftige Versuche

Das Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik darf mich auch bei zukünftigen Terminen zur Versuchsteilnahme einladen.

☐ ja ☐ nein

Meine Kontaktinformationen lauten:

Telefon: \_\_\_\_\_

E-Mail: \_\_\_\_\_



## Anhang F – Ablaufprotokoll zur empirischen Untersuchung der Biomechanik



# Ermüdung des Hand-Arm-Komplexes durch Touchscreeninteraktion

---

## *Ablaufprotokoll*

0. Inbetriebnahme abschließen
1. Proband begrüßen
  - a. kurze Einführung
  - b. Versuchspersonenerklärung ausfüllen lassen
2. EMG-Elektroden anlegen
  - a. Elektrodenpositionen für Trapez- und Deltamuskel entsprechend der Händigkeit ertasten
  - b. Körperbehaarung an Klebestellen mit Rasierer entfernen
  - c. Klebestellen mit Sandpapier behandeln
  - d. Klebestellen mit Tupfer und Isopropanol entfetten
  - e. Elektroden aufkleben
3. Targets für das Motion Tracking anlegen
4. Beschleunigungssender anlegen
5. EMG-Sender anlegen
  - a. Kanal A mit Trapezmuskel verbinden
  - b. Kanal B mit Deltamuskel verbinden
  - c. Kabel mit Heftpflaster sichern
6. Stuhl und Tisch einstellen
7. Messung beginnen
  - a. Aufzeichnung im Programm „A.R.T. DTrack Recorder“ starten
  - b. Aufzeichnung im Programm „Noldus Observer“ starten
  - c. Experiment im Programm „MTE“ starten (Haken bei „Save Trial Data“ setzen!)
8. für Synchronisierung Klatschen
9. Übung zur EMG-Normalisierung durchführen
10. Touchscreen mit Programm „EloTouch-Tool“ kalibrieren
11. Versuch durchführen (Aufgaben mit den Programmen „MTE“ und „Microsoft Rebound“ im Wechsel)
12. Datenerfassung stoppen
  - a. Aufzeichnung im Programm „A.R.T. DTrack Recorder“ stoppen
  - b. Aufzeichnung im Programm „BioPac AcqKnowledge“ stoppen

13. Daten unter der Versuchspersonennummer sichern
  - a. im Programm „A.R.T. DTrack Recorder“ speichern
  - b. im Programm „BioPac AcqKnowledge“ speichern und als txt-Datei exportieren
  - c. Daten vom Programm „MTE“ in Unterordner verschieben
14. Beschleunigungssender abnehmen
15. EMG-Sender abnehmen
16. Targets für das Motion Tracking abnehmen
17. EMG-Elektroden abnehmen

## Anhang G – Auswertesoftware zur empirischen Untersuchung der Biomechanik





```

//
// AppDelegate.m
// diss-software
//
// Created by Michael Domhardt on 10.10.14.
// Copyright (c) 2014 Michael Domhardt. All rights reserved.
//

#import "AppDelegate.h"

// 3rd Party
#import "XMLReader.h"

// Model
#import "Participant.h"
#import "MTERAW.h"
#import "BiopacRAW.h"
#import "BiopacEMG.h"
#import "HomeTouch.h"

// Controller
#import "MDDemograficController.h"

@interface AppDelegate ()

@property (weak) IBOutlet NSWindow *window;
@property (strong, nonatomic) Participant* participant;
@property (strong, nonatomic) NSMutableSet* mteRAWSamples;
@property (strong, nonatomic) NSMutableSet* biopacRAWSamples;
@property (strong, nonatomic) NSMutableSet* biopacEMGSamples;
@property (strong, nonatomic) NSMutableSet* homeTouchSamples;

@end

@implementation AppDelegate

#pragma mark - porperties

#pragma mark - apples default methods

- (void)applicationDidFinishLaunching:(NSNotification *)aNotification {
}

- (void)applicationWillTerminate:(NSNotification *)aNotification {
    // Insert code here to tear down your application
}

#pragma mark - Private Methods - Main Loop

/**
 * calling all import, calculation and export methods for one specific
 * participant
 *
 * @param participantNumber specific participant identification number,
 * derived from the chronologic order of study participation
 */
- (void)calcParticipant:(int)participantNumber {
    NSLog(@" running method %@@i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
          participantNumber, [self class]);
}

```

```

self.numerTextField.enabled = NO;
self.calcThisParticipantButton.enabled = NO;
self.calcAllParticipantButton.enabled = NO;

[self newParticipantWithNumber:participantNumber];

[self addDemographicDataToParticipantWithNumber:participantNumber];
[self addObservationStartTimeForParticipantWithNumber:participantNumber];
[self addObservationDataFromMteToParticipantWithNumber:participantNumber];
[self addObservationDataFromBiopacToParticipantWithNumber:
    participantNumber];

[self calcMVCforParticipantWithNumber:participantNumber];
[self calcHomeTouchesforParticipantWithNumber:participantNumber];
[self calcMuscleActivationsForParticipantWithNumber:participantNumber];
[self calcMaximumImpactAccelerationsForParticipantWithNumber:
    participantNumber];

[self exportBiopacDataForParticipantWithNumber:participantNumber];
[self exportHomeTouchesForParticipantWithNumber:participantNumber];

self.numerTextField.enabled = YES;
self.calcThisParticipantButton.enabled = YES;
self.calcAllParticipantButton.enabled = YES;

NSLog(@" participant %i complete", participantNumber);
}

```

```

- (void) newParticipantWithNumber:(int)participantNumber {
    NSLog(@" running method %@@i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
        participantNumber, [self class]);

    if (!self.participant) {
        self.participant = [[Participant alloc] init];
    }
    else {
        self.participant.age = nil;
        self.participant.emgAmvc = nil;
        self.participant.emgBmvc = nil;
        self.participant.gender = nil;
        self.participant.handedness = nil;

        self.participant.observationEndTime = nil;
        self.participant.observationStartTime = nil;
        self.participant.run1End = nil;
        self.participant.run1Start = nil;
        self.participant.run2End = nil;
        self.participant.run2Start = nil;
        self.participant.run3End = nil;
        self.participant.run3Start = nil;
        self.participant.run4End = nil;
        self.participant.run4Start = nil;
        self.participant.run5End = nil;
        self.participant.run5Start = nil;
        self.participant.run6End = nil;
        self.participant.run6Start = nil;
        self.participant.errorAtImport = nil;
    }
}

```

```

        self.participant.errorAtCalculation = nil;
    }

    self.participant.number = [NSNumber numberWithInt:participantNumber];

    self.mteRAWSamples = [[NSMutableSet alloc] init];
    self.biopacRAWSamples = [[NSMutableSet alloc] init];
    self.biopacEMGSamples = [[NSMutableSet alloc] init];
    self.homeTouchSamples = [[NSMutableSet alloc] init];

    self.mteRAWSamples = nil;
    self.biopacRAWSamples = nil;
    self.biopacEMGSamples = nil;
    self.homeTouchSamples = nil;
}

#pragma mark - Private Methods - Import

- (void)addDemographicDataToParticipantWithNumber:(int)participantNumber {
    self.participant = [MDDemograficController
        addDemographicDataToParticipant:self.participant];
}

- (void) addObservationStartTimeForParticipantWithNumber:(int)
    participantNumber {
    NSLog(@" running method %@" in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
        participantNumber, [self class]);

    NSArray *paths = NSSearchPathForDirectoriesInDomains(NSDocumentDirectory,
        NSUserDomainMask, YES);
    NSString *docDir = [paths objectAtIndex:0];
    NSString *folderPath = @"Promotion/Biomechanik/05_Noldus/01_RAW/";
    NSString *fileName = [NSString
        stringWithFormat:@"MD_Biomechanik_v2013-04-09 - MD-Biomechanik %i.odx"
        , participantNumber];
    NSString *filePath = [docDir stringByAppendingPathComponent:[NSString
        stringWithFormat:@"%s", folderPath, fileName]];

    NSDictionary *observerDict = [self readXMLFileWithFilePath:filePath];

    NSDate* observationStartTime = nil;

    if (observerDict) {
        // get timestamps from dictionary
        NSString *observationStartTimeString = [[[[[observerDict
            objectForKey:@"NXMLINTERCHANGE"] objectForKey:@"OBS_OBSERVATIONS"]
            objectForKey:@"OBS_OBSERVATION"] objectForKey:@"OBS_EVENT_LOGS"]
            objectForKey:@"OBS_EVENT_LOG"] objectForKey:@"START_TIME"];

        // add time zone CEST
        observationStartTimeString = [NSString stringWithFormat:@"%s +0200",
            observationStartTimeString];

        NSDateFormatter *formatter = [[NSDateFormatter alloc] init];
        [formatter setDateFormat:@"%yyyy-MM-dd HH:mm:ss.SSS Z"];

        // set global observation times (includes milliseconds with 3 digits
        precision)
        observationStartTime = [formatter dateFromString:
            observationStartTimeString];
    }
}

```

```

    }

    if (observationStartTime) {
        self.participant.observationStartTime = observationStartTime;
    }
    else {
        self.participant.errorAtImport = [NSNumber numberWithBool:YES];
        NSLog(@" error in method %@ and class %@: Start time of Observation
              for participant with number %@ could not be found.",
              NSStringFromSelector(_cmd), [self class], self.participant.number)
        ;
    }
}

- (NSDictionary *)readXMLFileWithFilePath:(NSString *)filePath {
    // NSLog(@" running method '%@' in class '%@' with file path %@",
    //        NSStringFromSelector(_cmd), [self class], filePath);

    NSDictionary * result = [[NSDictionary alloc] init];

    NSData *databuffer;
    databuffer = [[NSFileManager defaultManager] contentsAtPath:filePath];

    NSError * error = nil;
    result = [XMLReader dictionaryForXMLData:databuffer
                                options:XMLReaderOptionsProcessNamespaces
                                error:&error];

    databuffer = nil;

    if (error) {
        result = nil;
        NSLog(@" error in method %@ and class %@: %@, %@",
              NSStringFromSelector(_cmd), [self class], error, [error
              localizedDescription]);
    }

    return result;
}

- (void)addObservationDataFromMteToParticipantWithNumber:(int)
    participantNumber {
    NSLog(@" running method %@@i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
          participantNumber, [self class]);

    NSArray *paths = NSSearchPathForDirectoriesInDomains(NSDocumentDirectory,
        NSUserDomainMask, YES);
    NSString *docDir = [paths objectAtIndex:0];
    NSString *folderPath = [[NSString alloc] init];

    if (participantNumber < 10) {
        folderPath = [NSString stringWithFormat:@"Promotion/Biomechanik/
        01_MTE/01_RAW/MTE-runs/VP0%i", participantNumber];
    }
    else {
        folderPath = [NSString stringWithFormat:@"Promotion/Biomechanik/
        01_MTE/01_RAW/MTE-runs/VP%i", participantNumber];
    }
}

```

```

NSString *directoryPath = [docDir stringByAppendingPathComponent:
    folderPath];

NSError * error = nil;
NSArray * fileList = [[NSFileManager defaultManager]
    contentsOfDirectoryAtPath:directoryPath error:&error];

NSMutableSet* mteRAWSamples = [[NSMutableSet alloc] init];

NSDate* run1Start = nil;
NSDate* run1End = nil;

NSDate* run2Start = nil;
NSDate* run2End = nil;

NSDate* run3Start = nil;
NSDate* run3End = nil;

NSDate* run4Start = nil;
NSDate* run4End = nil;

NSDate* run5Start = nil;
NSDate* run5End = nil;

NSDate* run6Start = nil;
NSDate* run6End = nil;

if (!error) {
    fileList = [fileList sortedArrayUsingSelector:@selector(compare)];

    for (NSString * fileName in fileList) {
        NSInteger run = [fileList indexOfObject:fileName] + 1;

        NSString * filePath = [NSString stringWithFormat:@"%s/%s",
            directoryPath, fileName];
        NSDictionary *mteDict = [self readXMLFileWithFilePath:filePath];

        if (mteDict) {
            NSArray * trialData = [[[mteDict objectForKey:@"result"]
                objectForKey:@"trials"] objectForKey:@"trial"];

            for (NSDictionary *touchEvent in trialData) {
                NSInteger row = [trialData indexOfObject:touchEvent] + 1;

                MTERAW *mteRAWSample = [self
                    mteObservationDataFromTouchEvent:touchEvent forRun:run
                    andRow:row];

                if (mteRAWSample) {
                    [mteRAWSamples addObject:mteRAWSample];

                    // detect MTE cycles
                    if (row == 1){
                        switch (run) {
                            case 1:
                                run1Start = mteRAWSample.startTime;
                                break;
                            case 2:
                                run2Start = mteRAWSample.startTime;
                                break;
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        case 3:
            run3Start = mteRAWSample.startTime;
            break;
        case 4:
            run4Start = mteRAWSample.startTime;
            break;
        case 5:
            run5Start = mteRAWSample.startTime;
            break;
        case 6:
            run6Start = mteRAWSample.startTime;
            break;
        default:
            NSLog(@" error: No matching case for
                value %ld in switch statement.", (long
                )run);
            break;
    }
}
else if (row == [trialData count]) {
    switch (run) {
        case 1:
            run1End = mteRAWSample.endTime;
            break;
        case 2:
            run2End = mteRAWSample.endTime;
            break;
        case 3:
            run3End = mteRAWSample.endTime;
            break;
        case 4:
            run4End = mteRAWSample.endTime;
            break;
        case 5:
            run5End = mteRAWSample.endTime;
            break;
        case 6:
            run6End = mteRAWSample.endTime;
            break;
        default:
            NSLog(@" error: No matching case for
                value %li in switch statement.", (long
                )run);
            break;
    }
}
}
}
}
}
mteDict = nil;
}
}

if (error) {
    self.participant.errorAtImport = [NSNumber numberWithBool:YES];
    NSLog(@" error in method %@ and class %@: %@, %@",
        NSStringFromSelector(_cmd), [self class], error, [error
        localizedDescription]);
}
else {

```

```

[self.mteRAWSamples addObjectsFromArray:[mteRAWSamples allObjects]];

if (run1Start && run1End) {
    self.participant.run1Start = run1Start;
    self.participant.run1End = run1End;
}

if (run2Start && run2End) {
    self.participant.run2Start = run2Start;
    self.participant.run2End = run2End;
}

if (run3Start && run3End) {
    self.participant.run3Start = run3Start;
    self.participant.run3End = run3End;
}

if (run4Start && run4End) {
    self.participant.run4Start = run4Start;
    self.participant.run4End = run4End;
}

if (run5Start && run5End) {
    self.participant.run5Start = run5Start;
    self.participant.run5End = run5End;
}

if (run6Start && run6End) {
    self.participant.run6Start = run6Start;
    self.participant.run6End = run6End;
}
}
}

- (MTERAW *)mteObservationDataFromTouchEvent:(NSDictionary *)touchEvent
forRun:(NSInteger)run andRow:(NSInteger)row {
    MTERAW *mteRAWSample = [[MTERAW alloc] init];

    mteRAWSample.amplitude = [NSNumber numberWithInt:[[[touchEvent
        objectForKey:@"amplitude"] objectForKey:@"text"] integerValue]];
    mteRAWSample.angle = [NSNumber numberWithInt:[[[touchEvent
        objectForKey:@"angle"] objectForKey:@"text"] integerValue]];
    mteRAWSample.error = [NSNumber numberWithInt:[[[touchEvent
        objectForKey:@"num-errors"] objectForKey:@"text"] integerValue]];
    mteRAWSample.movementDuration = [NSNumber numberWithInt:[[[touchEvent
        objectForKey:@"mt"] objectForKey:@"text"] integerValue]];
    mteRAWSample.startTime = [NSDate dateWithTimeIntervalSince1970:
        [[[touchEvent objectForKey:@"acq-start-time"] objectForKey:@"text"]
        doubleValue]/1000];
    mteRAWSample.endTime = [NSDate dateWithTimeIntervalSince1970:[[[touchEvent
        objectForKey:@"acq-end-time"] objectForKey:@"text"] doubleValue]/1000]
    ;

    mteRAWSample.run = [NSNumber numberWithInt: run];
    mteRAWSample.row = [NSNumber numberWithInt: row];

    return mteRAWSample;
}

- (void)addObservationDataFromBiopacToParticipantWithNumber:(int)

```



```

participantNumber {
NSLog(@" running method %i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
      participantNumber, [self class]);

NSArray *paths = NSSearchPathForDirectoriesInDomains(NSDocumentDirectory,
      NSUserDomainMask, YES);
NSString *docDir = [paths objectAtIndex:0];
NSString *folderPath = @"Promotion/Biomechanik/02_Biopac/02_Data/";

NSString * fileNameRAW = [[NSString alloc] init];
NSString * fileNameCalA = [[NSString alloc] init];
NSString * fileNameCalB = [[NSString alloc] init];

if (participantNumber < 10) {
    fileNameRAW = [NSString stringWithFormat:@"VP%i.txt",
      participantNumber];
    fileNameCalA = [NSString stringWithFormat:@"VP%i_Kal_A.txt",
      participantNumber];
    fileNameCalB = [NSString stringWithFormat:@"VP%i_Kal_B.txt",
      participantNumber];
}
else {
    fileNameRAW = [NSString stringWithFormat:@"VP%i.txt",
      participantNumber];
    fileNameCalA = [NSString stringWithFormat:@"VP%i_Kal_A.txt",
      participantNumber];
    fileNameCalB = [NSString stringWithFormat:@"VP%i_Kal_B.txt",
      participantNumber];
}

NSString *filePathRAW = [docDir stringByAppendingPathComponent:[NSString
      stringWithFormat:@"%i", folderPath, fileNameRAW]];
NSString *filePathCalA = [docDir stringByAppendingPathComponent:[NSString
      stringWithFormat:@"%i", folderPath, fileNameCalA]];
NSString *filePathCalB = [docDir stringByAppendingPathComponent:[NSString
      stringWithFormat:@"%i", folderPath, fileNameCalB]];

NSArray *filePaths = [NSArray arrayWithObjects:filePathRAW, filePathCalA,
      filePathCalB, nil];

for (NSString * filePath in filePaths) {
    NSError *error = nil;

    NSArray *linesOfText = [[NSString stringWithContentsOfFile:filePath
      encoding:
      NSUTF8StringEncoding
      error:&error]
      componentsSeparatedByString:@"\n"];

    if (!error) {
        NSString* fileContent = [linesOfText objectAtIndex:2];

        if ([fileContent containsString: @"6 channels"]) {
            NSLog(@" running method %i in class %@ importing BiopacRAW
      samples", NSStringFromSelector(_cmd), participantNumber,
      [self class]);

            //filter file content

```

```

NSArray* runs = [self filterBioPacRAWFileContent:linesOfText
                forParticipantWithNumber:participantNumber];
linesOfText = nil;

for (NSMutableArray* run in runs) {

    NSNumber* runNumber = [run firstObject];
    NSDate* runStartTime = nil;

    switch ([runNumber intValue]) {
        case 1:
            runStartTime = self.participant.run1Start;
            break;
        case 2:
            runStartTime = self.participant.run2Start;
            break;
        case 3:
            runStartTime = self.participant.run3Start;
            break;
        case 4:
            runStartTime = self.participant.run4Start;
            break;
        case 5:
            runStartTime = self.participant.run5Start;
            break;
        case 6:
            runStartTime = self.participant.run6Start;
            break;
        default:
            NSLog(@" warning in method %@ and class %@:
                  Could't resolve run number '%i'.",
                  NSStringFromSelector(_cmd), [self class],
                  [runNumber intValue]);
            break;
    }

    NSArray* biopacRows = [run lastObject];

    NSMutableSet* samples = [[NSMutableSet alloc] init];

    for (NSString *biopacRow in biopacRows) {
        BiopacRAW* biopacRAWSample = [self
            biopacObservationDataFromRAWRow:biopacRow];

        biopacRAWSample.timestamp = [runStartTime
            dateByAddingTimeInterval:((double)([biopacRows
            indexOfObject:biopacRow])/1000)];
        biopacRAWSample.run = runNumber;
        [samples addObject:biopacRAWSample];
    }

    [self.biopacRAWSamples addObjectsFromArray:[samples
        allObjects]];
}

NSLog(@" finished method %@%i in class %@ importing BiopacRAW
      samples", NSStringFromSelector(_cmd), participantNumber,
      [self class]);
}
else if ([fileContent containsString: @"2 channels"]) {

```

```

        NSLog(@" running method %@%i in class %@ importing BiopacEMG
        samples", NSStringFromSelector(_cmd), participantNumber,
        [self class]);
        NSMutableSet* samples = [[NSMutableSet alloc] init];

        fileContent = [linesOfText objectAtIndex:3];
        linesOfText = [linesOfText subarrayWithRange:NSMakeRange(9,
        linesOfText.count-9)];

        for (NSString *biopacRow in linesOfText) {
            BiopacEMG * biopacEMGSample = [self
            biopacObservationDataFromEMGRow:biopacRow
            withFileContent:fileContent];
            if (biopacEMGSample) {
                biopacEMGSample.relativeTime = [NSNumber
                numberWithInteger:[linesOfText indexOfObject:
                biopacRow]];
                [samples addObject:biopacEMGSample];
            }
        }

        [self.biopacEMGSamples addObjectsFromArray:[samples allObjects
        ]];

        NSLog(@" finished method %@%i in class %@ importing BiopacEMG
        samples", NSStringFromSelector(_cmd), participantNumber,
        [self class]);
    }
    else {
        NSLog(@" error in method %@ and class %@: No channel
        information found in file %@ and line %@.",
        NSStringFromSelector(_cmd), [self class], filePath,
        fileContent);
    }
}
else {
    self.participant.errorAtImport = [NSNumber numberWithBool:YES];
    NSLog(@" error in method %@ and class %@: %@, %@",
    NSStringFromSelector(_cmd), [self class], error, [error
    localizedDescription]);
}
}
}

- (BiopacEMG *)biopacObservationDataFromEMGRow:(NSString*)biopacRow
withFileContent:(NSString*)fileContent {
    NSArray* columns = [biopacRow componentsSeparatedByString:@","];

    NSNumber* relativeTime = [self numberFromString:[columns objectAtIndex:0]]
    ;

    if ([self convertedNumber:relativeTime] >= 0.0009) {
        BiopacEMG *biopacEMGSample = [[BiopacEMG alloc] init];
        biopacEMGSample.channel = fileContent;
        biopacEMGSample.absVoltage = [self numberFromString:[columns
        objectAtIndex:1]];
        biopacEMGSample.rmsVoltage = [self numberFromString:[columns
        objectAtIndex:2]];

        return biopacEMGSample;
    }
}

```

```

    }
    else {

        //      NSLog(@" warning in method %@ and class %@: Row '%@' was
        //      skipped.", NSStringFromSelector(_cmd), [self class], biopacRow);
        return nil;
    }
}

- (NSArray *)filterBioPacRAWFileContent:(NSArray *)fileContent
forParticipantWithNumber:(int)participantNumber {
    NSLog(@" running method %@%i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
        participantNumber, [self class]);

    NSMutableArray* result = [[NSMutableArray alloc] init];

    //cut file header (lines 0 - 17)
    fileContent = [fileContent subarrayWithRange:NSMakeRange(18, fileContent.
        count-18)];

    if (self.participant.run1Start && self.participant.run1End) {
        NSMutableArray* run = [[NSMutableArray alloc] init];
        [run addObject:@1];
        [run addObject:[self subArrayFrom:fileContent
            forRunStartTime:self.participant.run1Start
            toRunEndTime:self.participant.run1End
            andObservationStartTime:self.participant.
            observationStartTime]];
        [result addObject:run];
    }

    if (self.participant.run2Start && self.participant.run2End) {
        NSMutableArray* run = [[NSMutableArray alloc] init];
        [run addObject:@2];
        [run addObject:[self subArrayFrom:fileContent
            forRunStartTime:self.participant.run2Start
            toRunEndTime:self.participant.run2End
            andObservationStartTime:self.participant.
            observationStartTime]];
        [result addObject:run];
    }

    if (self.participant.run3Start && self.participant.run3End) {
        NSMutableArray* run = [[NSMutableArray alloc] init];
        [run addObject:@3];
        [run addObject:[self subArrayFrom:fileContent
            forRunStartTime:self.participant.run3Start
            toRunEndTime:self.participant.run3End
            andObservationStartTime:self.participant.
            observationStartTime]];
        [result addObject:run];
    }

    if (self.participant.run4Start && self.participant.run4End) {
        NSMutableArray* run = [[NSMutableArray alloc] init];
        [run addObject:@4];
        [run addObject:[self subArrayFrom:fileContent
            forRunStartTime:self.participant.run4Start
            toRunEndTime:self.participant.run4End
            andObservationStartTime:self.participant.

```

```

        observationStartTime]];
    [result addObject:run];
}

if (self.participant.run5Start && self.participant.run5End) {
    NSMutableArray* run = [[NSMutableArray alloc] init];
    [run addObject:@5];
    [run addObject:[self subArrayFrom:fileContent
                        forRunStartTime:self.participant.run5Start
                        toRunEndTime:self.participant.run5End
                        andObservationStartTime:self.participant.
                        observationStartTime]];
    [result addObject:run];
}

if (self.participant.run6Start && self.participant.run6End) {
    NSMutableArray* run = [[NSMutableArray alloc] init];
    [run addObject:@6];
    [run addObject:[self subArrayFrom:fileContent
                        forRunStartTime:self.participant.run6Start
                        toRunEndTime:self.participant.run6End
                        andObservationStartTime:self.participant.
                        observationStartTime]];
    [result addObject:run];
}

NSLog(@" finished method %@i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
      participantNumber, [self class]);

return result;
}

- (NSArray *) subArrayFrom:(NSArray *)fileContent forRunStartTime:(NSDate *)
runStartTime toRunEndTime:(NSDate *)runEndTime andObservationStartTime:
(NSDate *)observationStartTime {
    NSArray *result = [[NSArray alloc] init];

    NSTimeInterval relativeRunStartTime = [runStartTime timeIntervalSinceDate:
        observationStartTime]; // in [s]
    NSTimeInterval runDuration = [runEndTime timeIntervalSinceDate:
        runStartTime]; // in [s]

    NSUInteger runStartIndex = (NSUInteger)(relativeRunStartTime * 1000); //
        in [ms]
    NSUInteger runLength = (NSUInteger)(runDuration * 1000); // in [ms]

    if (runStartIndex+runLength > fileContent.count) {
        runLength = fileContent.count - runStartIndex - 1;
    }

    result = [fileContent subarrayWithRange:NSMakeRange(runStartIndex,
        runLength)];

    return result;
}

- (BiopacRAW *)biopacObservationDataFromRAWRow:(NSString*)biopacRow {
    BiopacRAW *biopacRAWSample = [[BiopacRAW alloc] init];

    NSArray* columns = [biopacRow componentsSeparatedByString:@","];

```

```

biopacRAWSample.accX = [self numberFromString:[columns objectAtIndex:1]];
biopacRAWSample.emgA = [self numberFromString:[columns objectAtIndex:2]];
biopacRAWSample.accY = [self numberFromString:[columns objectAtIndex:3]];
biopacRAWSample.accZ = [self numberFromString:[columns objectAtIndex:4]];
biopacRAWSample.emgB = [self numberFromString:[columns objectAtIndex:5]];
// unused [columns objectAtIndex:0] is the the trigger signal from Noldus
// Observer (started the Biopac recording synchronous with the video
// observation)

return biopacRAWSample;
}

- (NSNumber *)numberFromString:(NSString *)string {
    NSNumber* result = [NSNumber numberWithDouble:0.0];

    if ([string doubleValue]) {
        result = [NSNumber numberWithDouble:[string doubleValue]];
    }
    else if ([string intValue]) {
        result = [NSNumber numberWithInt:[string intValue]];
    }
    // else {
    //     NSLog(@" warning in method %@ and class %@: Couldn't read
    //     number from '%@'. Used %@ instead.", NSStringFromSelector(_cmd), [self
    //     class], string, result);
    // }

    return result;
}

#pragma mark - Private Methods - Calculation

- (void)calcMVCforParticipantWithNumber:(int)participantNumber {
    NSLog(@" running method %@%i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
        participantNumber, [self class]);

    NSNumber* emgAmvc = [self mvcValueForParticipantWithNumber:
        participantNumber andChannel:@"A"];
    NSNumber* emgBmvc = [self mvcValueForParticipantWithNumber:
        participantNumber andChannel:@"B"];

    if ([emgAmvc doubleValue] > 0 && [emgBmvc doubleValue] > 0) {
        self.participant.emgAmvc = emgAmvc;
        self.participant.emgBmvc = emgBmvc;
    }
    else {
        NSLog(@" error in method %@ and class %@: No mvc-values for
            participant %i calculated.", NSStringFromSelector(_cmd), [self
            class], participantNumber);
        self.participant.errorAtCalculation = [NSNumber numberWithBool:YES];
    }
}

- (NSNumber *)mvcValueForParticipantWithNumber:(int)participantNumber
andChannel:(NSString *)channel {
    NSNumber* result = @-1.0;

    NSArray* biopacEMGSamples = [self.biopacEMGSamples allObjects];

```

```

NSPredicate *predicate = [NSPredicate predicateWithFormat:@"channel
CONTAINS %@", channel];
NSArray* channelSamples = [biopacEMGSamples filteredArrayUsingPredicate:
predicate];

if (channelSamples && (channelSamples.count > 0)) {

    NSArray* maxRMSVoltageDescriptors = @[ [NSSortDescriptor
sortDescriptorWithKey:@"rmsVoltage" ascending:YES]];
    BiopacEMG* maxSample = [[channelSamples sortedArrayUsingDescriptors:
maxRMSVoltageDescriptors] lastObject];

    if (maxSample && maxSample.rmsVoltage) {
        result = maxSample.rmsVoltage;
    }

}

return result;
}

- (void)calcHomeTouchesforParticipantWithNumber:(int)participantNumber {
    NSLog(@" running method %@@i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
participantNumber, [self class]);

    NSArray* mteTouches = [self.mteRAWsamples allObjects];

    NSMutableArray* runs = [[NSMutableArray alloc] init];
    for (int runNumber = 1; runNumber <= 6; runNumber++) {
        runs = [self addMTETouches:mteTouches ForRun:runNumber ToRuns:runs];
    }
    mteTouches = nil;

    NSMutableSet *homeTouches = [[NSMutableSet alloc] init];

    for (NSArray* runSamples in runs) {

        for (MTERAW *mteRAW in runSamples) {
            long objectIndex = [runSamples indexOfObject:mteRAW];

            if (objectIndex > 0 && [mteRAW.error intValue] == 0) {
                HomeTouch* homeTouch = [[HomeTouch alloc] init];

                homeTouch.run = mteRAW.run;
                homeTouch.timestamp = mteRAW.startTime;
                homeTouch.participant = mteRAW.participant;

                MTERAW* previousSample = [runSamples objectAtIndex:objectIndex
-1];
                double angle = [self convertedNumber:previousSample.angle];

                // classification of direction angle
                if (angle >= 337.5 && angle < 22.5) {
                    homeTouch.direction = [NSNumber numberWithInt:0];
                }
                else if (angle >= 22.5 && angle < 67.5) {
                    homeTouch.direction = [NSNumber numberWithInt:45];
                }
                else if (angle >= 67.5 && angle < 112.5) {

```

```

        homeTouch.direction = [NSNumber numberWithInt:90];
    }
    else if (angle >= 112.5 && angle < 157.5) {
        homeTouch.direction = [NSNumber numberWithInt:135];
    }
    else if (angle >= 157.5 && angle < 202.5) {
        homeTouch.direction = [NSNumber numberWithInt:180];
    }
    else if (angle >= 202.5 && angle < 247.5) {
        homeTouch.direction = [NSNumber numberWithInt:225];
    }
    else if (angle >= 247.5 && angle < 292.5) {
        homeTouch.direction = [NSNumber numberWithInt:270];
    }
    else if (angle >= 292.5 && angle < 337.5) {
        homeTouch.direction = [NSNumber numberWithInt:315];
    }

    [homeTouches addObject:homeTouch];
}

}

[self.homeTouchSamples addObjectFromArray: [homeTouches allObjects]];
}

- (NSMutableArray *)addMTETouches:(NSArray *)mteTouches ForRun:(int)runNumber
ToRuns:(NSMutableArray *)runs {
    NSPredicate *predicate = [NSPredicate predicateWithFormat:@"run == %@",
        [NSNumber numberWithInt:runNumber]];
    NSArray* runSamples = [mteTouches filteredArrayUsingPredicate:predicate];

    if (runSamples.count > 0) {
        [runs addObject:runSamples];
        runSamples = nil;
    }

    return runs;
}

- (void)calcMuscleActivationsForParticipantWithNumber:(int)participantNumber {
    NSLog(@" running method %@@i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
        participantNumber, [self class]);

    NSTimeInterval rmsInterval = 0.1; // in [s]
    int samplingFrequency = 1000; // in [Hz]
    int objectsPerMean = (int)(rmsInterval * samplingFrequency);
    int multiplier = 2; // to specify the time range before and after the touch
    event

    NSArray* homeTouches = [self.homeTouchSamples allObjects];
    NSArray* timestampSortDescriptors = @[ [NSSortDescriptor
        sortDescriptorWithKey:@"timestamp" ascending:YES]];
    homeTouches = [homeTouches sortedArrayUsingDescriptors:
        timestampSortDescriptors];

    double emgAmvc = [self convertedNumber:self.participant.emgAmvc];
    double emgBmvc = [self convertedNumber:self.participant.emgBmvc];

```



```

NSArray* biopacRAWSamples = [self.biopacRAWSamples allObjects];

for (HomeTouch* homeTouch in homeTouches) {
    NSDate* startTime = [homeTouch.timestamp dateByAddingTimeInterval:-
        rmsInterval*multiplier];
    NSDate* endTime = [homeTouch.timestamp dateByAddingTimeInterval:
        rmsInterval*multiplier];

    NSPredicate *predicate = [NSPredicate predicateWithFormat:@"(timestamp
        >= %@) AND (timestamp <= %@)", startTime, endTime];
    NSArray* filteredBiopacRAWSamples = [biopacRAWSamples
        filteredArrayUsingPredicate:predicate];

    if (filteredBiopacRAWSamples && (filteredBiopacRAWSamples.count > 0))
    {

        filteredBiopacRAWSamples = [filteredBiopacRAWSamples
            sortedArrayUsingDescriptors:timestampSortDescriptors];

        NSMutableArray* muscleA = [[NSMutableArray alloc] init];
        NSMutableArray* muscleB = [[NSMutableArray alloc] init];

        for (int index = 0; index < filteredBiopacRAWSamples.count; index
            = index+objectsPerMean) {

            NSUInteger count = MIN(filteredBiopacRAWSamples.count - 1 -
                index, objectsPerMean);
            NSArray *rmsSamples = [filteredBiopacRAWSamples
                subarrayWithRange: NSMakeRange(index, count)];

            int sampleCount = (int)[rmsSamples count];

            if (sampleCount >= objectsPerMean-1) {
                double meanSumA = 0.0;
                double meanSumB = 0.0;

                for (BiopacRAW *biopacRAW in rmsSamples) {
                    double emgA = fabs([self convertedNumber:biopacRAW.
                        emgA]);
                    double emgB = fabs([self convertedNumber:biopacRAW.
                        emgB]);

                    meanSumA += (pow(emgA, 2.0))/(double)sampleCount;//
                        divide here to avoid overflow of double
                    meanSumB += (pow(emgB, 2.0))/(double)sampleCount;//
                        divide here to avoid overflow of double
                }

                double absMuscleActivationA = sqrt(meanSumA);// in [mV]
                double absMuscleActivationB = sqrt(meanSumB);// in [mV]

                double relMuscleActivationA = absMuscleActivationA/emgAmvc
                    ;// between 0 and 1
                double relMuscleActivationB = absMuscleActivationB/emgBmvc
                    ;// between 0 and 1

                [muscleA addObject:[NSNumber numberWithDouble:
                    relMuscleActivationA]];
                [muscleB addObject:[NSNumber numberWithDouble:

```

```

        relMuscleActivationB]];
    }
}

double maxMuscleActivationA = -MAXFLOAT;
double maxMuscleActivationB = -MAXFLOAT;

for (NSNumber *num in muscleA) {
    double x = num.floatValue;

    if (x > maxMuscleActivationA) {
        maxMuscleActivationA = x;
    }
}

for (NSNumber *num in muscleB) {
    double x = num.floatValue;

    if (x > maxMuscleActivationB) {
        maxMuscleActivationB = x;
    }
}

homeTouch.muscleActivationA = [NSNumber numberWithDouble:100*
    maxMuscleActivationA]; // in [%]
homeTouch.muscleActivationB = [NSNumber numberWithDouble:100*
    maxMuscleActivationB]; // in [%]
}
}

- (void)calcMaximumImpactAccelerationsForParticipantWithNumber:(int)
    participantNumber {
    NSLog(@" running method %@i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
        participantNumber, [self class]);

    NSTimeInterval rmsInterval = 0.05; // in [s]

    NSArray* homeTouchSamples = [self.homeTouchSamples allObjects];
    NSArray* timestampSortDescriptors = @[ [NSSortDescriptor
        sortDescriptorWithKey:@"timestamp" ascending:YES] ];
    homeTouchSamples = [homeTouchSamples sortedArrayUsingDescriptors:
        timestampSortDescriptors];

    for (HomeTouch* homeTouch in homeTouchSamples) {

        NSDate* startTime = [homeTouch.timestamp dateByAddingTimeInterval:-
            rmsInterval];
        NSDate* endTime = [homeTouch.timestamp dateByAddingTimeInterval:
            rmsInterval];

        NSArray* biopacRAWSamples = [self.biopacRAWSamples allObjects];

        NSPredicate *predicate = [NSPredicate predicateWithFormat:@"(timestamp
            >= %@) AND (timestamp <= %@)", startTime, endTime];
        biopacRAWSamples = [biopacRAWSamples filteredArrayUsingPredicate:
            predicate];

        if (biopacRAWSamples && (biopacRAWSamples.count > 0)) {

```

```

        biopacRAWSamples = [biopacRAWSamples sortedArrayUsingDescriptors:
            timestampSortDescriptors];

        for (BiopacRAW *biopacRAW in biopacRAWSamples) {
            double accX = fabs([self convertedNumber:biopacRAW.accX]);
            double accY = fabs([self convertedNumber:biopacRAW.accY]);
            double accZ = fabs([self convertedNumber:biopacRAW.accZ]);

            double squareX = pow(accX, 2); //in [g]
            double squareY = pow(accY, 2); //in [g]
            double squareZ = pow(accZ, 2); //in [g]

            double sum = squareX + squareY + squareZ;

            double magnitude = sqrt(sum); //in [g]

            biopacRAW.accMagnitude = [NSNumber numberWithDouble:magnitude*
                9.81]; //in [m/s^2]
        }

        NSArray* maxAccMagnitudeDescriptors = @[NSSortDescriptor
            sortDescriptorWithKey:@"accMagnitude" ascending:YES];
        BiopacRAW* maxSample = [[biopacRAWSamples
            sortedArrayUsingDescriptors:maxAccMagnitudeDescriptors]
            lastObject];

        homeTouch.maximumImpactAcceleration = maxSample.accMagnitude;
        homeTouch.maximumImpactAccelerationTime = maxSample.timestamp;
    }
}

- (double) convertedNumber:(NSNumber *)number {
    double result = 0.0;

    if ([number doubleValue]) {
        result = [number doubleValue];
    } else if ([number intValue]) {
        result = (double)[number intValue];
    }
    // else {
    //     NSLog(@" warning in method %@ and class %@: Couldn't convert
    //         NSNumber '%@' to double. Used 0.0 instead.",
    //         NSStringFromSelector(_cmd), [self class], number);
    // }

    return result;
}

#pragma mark - Private Methods - Export

- (void) exportBiopacDataForParticipantWithNumber:(int)participantNumber {
    NSLog(@" running method %@i in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
        participantNumber, [self class]);

    NSDate* observationStartTime = nil;

    if (self.participant.run1Start) {
        observationStartTime = self.participant.run1Start;
    }
}

```

```

    }
    else {
        observationStartTime = self.participant.observationStartTime;
    }

    NSMutableString *csvFileContent = [[NSMutableString alloc] init];
    [csvFileContent appendString:@"participant,run,timestamp,chanA,chanB\n"];

    NSArray* samples = [self.biopacRAWSamples allObjects];
    NSArray* timestampSortDescriptors = @[NSSortDescriptor
        sortDescriptorWithKey:@"timestamp" ascending:YES]];
    samples = [samples sortedArrayUsingDescriptors:timestampSortDescriptors];

    for (BiopacRAW *sample in samples) {
        NSMutableArray * csvLineElements = [[NSMutableArray alloc] init];

        [csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%i",
            participantNumber]];
        [csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%i", [sample.
            run intValue]]];
        [csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%f", [sample
            .timestamp timeIntervalSinceDate:observationStartTime]]];
        [csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%f", [self
            convertedNumber:sample.emgA]]];
        [csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%f", [self
            convertedNumber:sample.emgB]]];

        NSString * csvLine = [csvLineElements componentsJoinedByString: @","];
        [csvFileContent appendString:[NSString stringWithFormat:@"%s\n",
            csvLine]];
        csvLine = nil;
        csvLineElements = nil;
    }
    samples = nil;

    NSArray *paths = NSSearchPathForDirectoriesInDomains(NSDocumentDirectory,
        NSUserDomainMask, YES);
    NSString *docDir = [paths objectAtIndex:0];
    NSString *folderPath = @"Promotion/Biomechanik/06_Results/";
    NSString *filename = [NSString stringWithFormat:@"BiopacRAW_Participant
        %i.csv", participantNumber];
    NSString *filePath = [docDir stringByAppendingPathComponent:[NSString
        stringWithFormat:@"%s", folderPath, filename]];

    NSError *error = nil;
    [csvFileContent writeToFile:filePath
        atomically:YES
        encoding:NSUTF8StringEncoding
        error:&error];
    csvFileContent = nil;

    if (error) {
        NSLog(@" error during write %@: %@, %@", filename, error, error.
            localizedDescription);
    }
}

- (void) exportHomeTouchesForParticipantWithNumber:(int)participantNumber {

```

```

NSLog(@" running method %@" in class %@", NSStringFromSelector(_cmd),
      participantNumber, [self class]);

NSDate* observationStartTime = nil;

if (self.participant.run1Start) {
    observationStartTime = self.participant.run1Start;
}
else {
    observationStartTime = self.participant.observationStartTime;
}
NSString* handedness = self.participant.handedness;

NSMutableString *csvFileContent = [[NSMutableString alloc] init];
[csvFileContent
    appendString:@"participant,run,timestamp,direction,correctedDirection,
muscleActivationA,muscleActivationB,maximumImpactAccelerationTime,maxi
mumImpactAccelleration\n"];

NSArray* samples = [self.homeTouchSamples allObjects];
NSArray* timestampSortDescriptors = @[NSSortDescriptor
    sortDescriptorWithKey:@"timestamp" ascending:YES];
samples = [samples sortedArrayUsingDescriptors:timestampSortDescriptors];

for (HomeTouch *sample in samples) {
    NSMutableArray * csvLineElements = [[NSMutableArray alloc] init];

    [csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%i",
        participantNumber]];
    [csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%i", [sample.
        run intValue]]];
    [csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%f", [sample
        .timestamp timeIntervalSinceDate:observationStartTime]]];
    [csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%i", [sample.
        direction intValue]]];

    // invert direction for left handed participants
    if ([handedness isEqualToString:@"right"]) {
        [csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%i",
            [sample.direction intValue]]];
    }
    else if ([handedness isEqualToString:@"left"]) {
        if ([sample.direction intValue] == 0) {
            [csvLineElements addObject:@"180"];
        }
        else if ([sample.direction intValue] == 45) {
            [csvLineElements addObject:@"135"];
        }
        else if ([sample.direction intValue] == 90) {
            [csvLineElements addObject:@"90"];
        }
        else if ([sample.direction intValue] == 135) {
            [csvLineElements addObject:@"45"];
        }
        else if ([sample.direction intValue] == 180) {
            [csvLineElements addObject:@"0"];
        }
        else if ([sample.direction intValue] == 225) {
            [csvLineElements addObject:@"315"];
        }
    }
}

```

```

    }
    else if ([sample.direction intValue] == 270) {
        [csvLineElements addObject:@"270"];
    }
    else if ([sample.direction intValue] == 315) {
        [csvLineElements addObject:@"225"];
    }
    else {
        [csvLineElements addObject:@"direction error"];
    }
}
else {
    [csvLineElements addObject:@"handedness error"];
}

[csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%f", [self
    convertedNumber:sample.muscleActivationA]]];
[csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%f", [self
    convertedNumber:sample.muscleActivationB]]];
[csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%f", [sample
    .maximumImpactAccelerationTime TimeIntervalSinceDate:
    observationStartTime]]];
[csvLineElements addObject:[NSString stringWithFormat:@"%f", [self
    convertedNumber: sample.maximumImpactAcceleration]]];

NSString * csvLine = [csvLineElements componentsJoinedByString: @","];
;
[csvFileContent appendString:[NSString stringWithFormat:@"%s\n",
    csvLine]];
}

NSArray *paths = NSSearchPathForDirectoriesInDomains(NSDocumentDirectory,
    NSUserDomainMask, YES);
NSString *docDir = [paths objectAtIndex:0];
NSString *folderPath = @"Promotion/Biomechanik/06_Results/";
NSString *filename = [NSString stringWithFormat:@"HomeTouches_Participant
    %i.csv", participantNumber];
NSString *filePath = [docDir stringByAppendingPathComponent:[NSString
    stringWithFormat:@"%s", folderPath, filename]];

NSError *error = nil;
[csvFileContent writeToFile:filePath
    atomically:YES
    encoding:NSUTF8StringEncoding
    error:&error];

if (error) {
    NSLog(@" error during write %s: %s, %s", filename, error, error.
        localizedDescription);
}
}

#pragma mark - IBActions

- (IBAction)calcThisParticipantButtonClicked:(id)sender {
    if ([self.numerTextField intValue]) {
        int participantNumber = [self.numerTextField intValue];
    }
}

```

```

        if (participantNumber > 0 && participantNumber < 31) {
            [self calcParticipant:participantNumber];
        }
    }
}

- (IBAction)calcAllParticipantButtonClicked:(id)sender {
    for (int participantNumber = 1; participantNumber <= 30; participantNumber
        ++){
        [self calcParticipant:participantNumber];
    }
}

- (IBAction)calcParticipantRangeButtonClicked:(id)sender {
    for (int participantNumber = [self.fromNumerTextField intValue];
        participantNumber <= [self.toNumerTextField intValue];
        participantNumber++){
        [self calcParticipant:participantNumber];
    }
}

@end

```

## Anhang H – Lizenz der verwendeten Bibliothek zur Verarbeitung der XML-Daten in der Auswertesoftware zur empirischen Untersuchung der Biomechanik





# License

Copyright (C) 2012 Antoine Marcadet

Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining a copy of this software and associated documentation files (the "Software"), to deal in the Software without restriction, including without limitation the rights to use, copy, modify, merge, publish, distribute, sublicense, and/or sell copies of the Software, and to permit persons to whom the Software is furnished to do so, subject to the following conditions:

The above copyright notice and this permission notice shall be included in all copies or substantial portions of the Software.

THE SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS", WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND NONINFRINGEMENT. IN NO EVENT SHALL THE AUTHORS OR COPYRIGHT HOLDERS BE LIABLE FOR ANY CLAIM, DAMAGES OR OTHER LIABILITY, WHETHER IN AN ACTION OF CONTRACT, TORT OR OTHERWISE, ARISING FROM, OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE SOFTWARE OR THE USE OR OTHER DEALINGS IN THE SOFTWARE.



# Anhang I – Inbetriebnahmeprotokoll zur empirischen Untersuchung der haptischen Rückmeldung



# Fahrversuch im Simulator

---

## *Inbetriebnahmeprotokoll*

0. generelle Vorbereitung
  - a. Wegweiser und Schild an Tür anbringen
  - b. Schild „Versuch läuft“ aufhängen
  - c. Verbrauchsmaterial (Süßigkeiten, Versuchspersonenerklärung)
  - d. Steckdosenleiste einschalten
  - e. Licht einschalten, aber nur hintere Reihen
  - f. LED Gesichtsausleuchtung anstellen
  - g. Beamer Power on Rechner hochfahren und anmelden
1. Rechner *Lenka* (Fahrsimulator) starten
  - a. Login: Noldus, Passwort: Noldus
2. Laptop *SMI* (Eyetracker) starten
  - a. iViewX 60Hz starten
    - i. Netzwerkeinstellungen zum Rechner BonJovi prüfen
3. Rechner *BonJovi* (Haptisches Touchpad) starten
  - a. Login: Continental, Passwort: Continental
  - b. SMI-Dongle anschließen
  - c. SMI Experiment Center starten
    - i. Connected?
4. Rechner *Metallica* (Media Recorder) starten
  - a. Login: Noldus, Passwort: Noldus
  - b. USB-Stick „Media-Recorder“ anschließen
  - c. MediaRecorder starten



## Anhang J – Versuchspersonenerklärung zur empirischen Untersuchung der haptischen Rückmeldung





# Fahrversuch im Simulator

---

## *Versuchspersonenerklärung*

### Datenschutz und Ethik

Alle benötigten Daten werden anonym gespeichert und ausgewertet. Die Daten werden ausschließlich zu wissenschaftlichen Zwecken im Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik verwendet und nicht an Dritte weitergegeben. Die Teilnahme an der Untersuchung ist freiwillig und ein Abbruch ist jederzeit ohne Angabe von Gründen möglich.

### Einverständniserklärung

Ich habe den oben aufgeführten Text gelesen und verstanden. Offene Fragen habe ich durch Nachfragen geklärt.

Vorname: \_\_\_\_\_

Nachname: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_

### Zukünftige Versuche

Das Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik darf mich auch bei zukünftigen Terminen zur Versuchsteilnahme einladen.

☐ ja ☐ nein

Meine Kontaktinformationen lauten:

Telefon: \_\_\_\_\_

E-Mail: \_\_\_\_\_



## Anhang K – Ablaufprotokoll zur empirischen Untersuchung der haptischen Rückmeldung



# Fahrversuch im Simulator

---

## *Ablaufprotokoll*

0. Inbetriebnahme (siehe Inbetriebnahmeprotokoll)
1. Proband begrüßen
  - a. kurze Einführung
  - b. Versuchspersonenerklärung ausfüllen lassen
2. Fahrersitz einstellen
3. Armlehne einstellen
4. Eyetracker ausrichten
5. FaceReader Kamera ausrichten und scharf stellen
6. Media Recorder Videoaufnahme starten
7. 1x Fahrt (3min) zum Testen
  - a. Anweisungen:
    - i. Fahren Sie mit konstanter Geschwindigkeit von 60 km/h, das heißt, dass Sie mit dem Gaspedal durchgehend am Anschlag fahren.
    - ii. Fahren Sie zum Start auf der mittleren Spur.
    - iii. Die am Fahrbahnrand auftauchenden Schilder zeigen Ihnen den geforderten Spurwechsel mit Hilfe von Pfeilen an. Dabei heißt zum Beispiel ein mittig auftauchender Pfeil, dass Sie auf die mittlere Spur wechseln sollen.
    - iv. Wechseln Sie die Spur, sobald das Schild erscheint, jedoch nicht davor.
    - v. Führen Sie dabei den Fahrspurwechsel möglichst schnell und effektiv durch. So sollten Sie möglichst beim Passieren des Schildes den Spurwechsel bereits vollzogen haben.
    - vi. Fahren Sie immer mittig auf der Fahrspur.
    - vii. Haben Sie Fragen zur Fahraufgabe?
8. 1x Fahrt ohne Touchpad
9. Eyetracker starten
  - a. Probandennummer eingeben

- b. kalibrieren (Punkt verfolgen lassen) mit Leertaste starten
- 10. Blende aufkleben
- 11. TouchPad-Software starten
- 12. Touchpad vorführen und Beispielaufgaben durchführen lassen
  - a. Allgemeine Bedienung
    - i. Kein Schieben oder Nachsetzen möglich wie beim Mauszeiger
      - I. Anwählen, indem entsprechende Tastfläche auf dem Touchpad berührt wird
      - II. Auswählen durch Drücken der Touchpad- Oberfläche
      - III. Flächen entsprechen sich, das heißt Berührungspunkt auf dem Touchpad ist gleich dem Auswahlpunkt auf dem Bildschirm
  - b. Menüpunkt Control:
    - i. Heckscheibenheizung an/aus
    - ii. Frontscheibenheizung an/aus
    - iii. Umluft an/aus
    - iv. Klimaanlage an/aus
    - v. Hauptmenütaste ist gleichzeitig für „zurück“ zuständig
- 13. Touchpadsoftware beenden und neu starten
- 14. 1x Fahrt mit haptischem Feedback, 1x Fahrt ohne haptisches Feedback
  - a. Probanden mit ungerader Nummer: erste Fahrt mit haptischem Feedback
  - b. Probanden mit gerade Nummer: erste Fahrt ohne haptisches Feedback
- 15. Aufgaben abarbeiten
  - a. Aufgaben je nach Probandennummer
- 16. Messung stoppen
  - a. Programm TouchPad beenden
  - b. EyeTracking beenden
- 17. Proband verabschieden
- 18. Tür öffnen
- 19. Daten sichern

- a. LogFiles Touchpad in Unterordner mit Probandennummer kopieren,  
z.B. P01
- b. LogFiles Fahrsimulator in Unterordner mit Probandennummer kopieren,  
z.B. P01





# Danksagung

*Sowohl im Kreislauf der Mensch-Maschine-Interaktion des Basismodells für Touchscreensysteme als auch im menschenzentrierten Gestaltungsprozess bedeutet das Ende einen neuen Anfang (vgl. Abbildung 2.8, Abbildung 2.24). Dieser schönen Logik folgend beginnt meine Danksagung erst mit dem Ende dieser Arbeit und läutet zugleich den Aufbruch in einen neuen Lebensabschnitt ein. Doch auch in diesem neuen Lebensabschnitt sollen meine Tage weiterhin mit dem Schönsten beginnen und enden, was man sich wünschen kann: der großen Liebe. Manche sagen, meine Frau Laura sei meine geheime und zugleich kritischste Lektorin; andere nennen sie schlicht meinen Glücksfall. Beide haben recht.*

Ziel dieser Arbeit war ein ganzheitlicher Gestaltungsansatz, der die Besonderheiten der Touchscreentechnologien und -interaktion berücksichtigt. Die Arbeit enthält Literaturanalysen und empirische Studien zu folgenden Aspekten: Interaktionseinfluss der Touchscreentechnologien, Gebrauchstauglichkeit touchscreenbasierter Interaktionsformen, Dauer und Intensität der Touchscreeninteraktion im Arbeitsumfeld, touchscreeninduzierte Ermüdung des Hand-Arm-Systems sowie Einfluss künstlicher haptischer Rückmeldungen.

Anhand der Erkenntnisse wurden konkrete Gestaltungsempfehlungen abgeleitet und mit dem menschenzentrierten Gestaltungsprozess zu einem ganzheitlichen Gestaltungsansatz für Touchscreensysteme zusammengeführt. Die Anwendbarkeit des Gestaltungsansatzes konnte an einem Praxisbeispiel demonstriert werden. Die Ergebnisse der Arbeit erleichtern die Gestaltung touchscreenbasierter Systeme. Auch eine formative analytische Evaluierung entsprechender Systeme wird durch die Verwendung der touchscreenspezifischen Gestaltungsempfehlungen als Konformitätskriterien ermöglicht.

ISBN 978-3-7376-0428-4



9 783737 604284 >