

Von der Fakultät 12
- Erziehungswissenschaft, Psychologie und Soziologie -
der Technischen Universität Dortmund
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Philosophie
- Dr. phil. -
genehmigte Dissertation.

Einfluss der Gestaltung absoluter Bedieninteraktionen
auf die sensomotorische Leistungsfähigkeit:
Eine kognitionspsychologische Evaluation von
Touchpadbedienung im Fahrzeug

vorgelegt von

Susanne Schild

Gutachter:

PD Dr. Gerhard Rinkenauer

Prof. Dr. Herbert Heuer

Dortmund, im Juni 2015

Danksagung

Zuallererst möchte ich mich für die Unterstützung meines Doktorvaters PD Dr. Gerhard Rinkenauer bedanken, der sich stets Zeit für Fragen und Diskussionen genommen hat und mich besonders darin bestärkt hat, den roten Faden meiner Arbeit im Auge zu behalten. Ohne ihn wäre die Entstehung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Dafür möchte ich mich ganz herzlich bedanken!

Herrn Prof. Dr. Herbert Heuer danke ich sehr für die Übernahme der Zweitgutachtertätigkeit und sein Interesse an der vorliegenden Arbeit. Auch bei Prof. Dr. Monika Reichert möchte ich mich bedanken, dass sie als interessierte Prüferin an meiner Disputation mitgewirkt hat.

Ein weiteres Dankeschön gilt Dr. Stefan Mattes, der mich im täglichen Arbeiten und allen auftretenden Fragen intensiv unterstützt und beraten hat. Ohne seine Hilfe wäre ich über einige inhaltliche, methodische und organisatorische Fallstricke gestolpert. Daneben danke ich auch meinen weiteren Kollegen für Ihre Unterstützung während der Entstehung dieser Arbeit.

Ein besonderer und herzlicher Dank gilt meinen Eltern Agi und Gerhard, die immer an mich geglaubt haben und für mich da waren. Auch danke ich Elisabeth, meinen Brüdern, meiner übrigen Familie und meinen Freunden für die manchmal notwendige Ablenkung. Nicht zuletzt gilt mein großer Dank meinem Mann Michael für seinen Glauben an mich, seine zuverlässige Hilfe in allen Bereichen und seine unendliche Geduld während der Entstehung dieser Arbeit.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit betrachtet die Bediensituation während des Fahrens und den Einfluss der Gestaltung der Bedieninteraktion auf die Leistungsfähigkeit des Nutzers. Im Fahrzeug führt die Erhöhung der Funktionsanzahl zum Einsatz neuartiger Anzeige- und Bedientechnologien, die flexibel auf verschiedene Inhalte angepasst werden können. Aufgrund der Doppelaufgabensituation während der Fahraufgabe ist es bedeutend, die Bedienung möglichst einfach und ablenkungsarm zu gestalten. Im Hinblick auf die demografische Entwicklung mit einer Zunahme älterer Fahrer ist außerdem eine altersgerechte Gestaltung der Bedieninteraktion unumgänglich.

Der Fokus dieser Arbeit wurde auf die Gestaltung absoluter Touchpadbedienung gelegt. Dabei sind Touchpad- und Anzeigefläche einander direkt zugeordnet. Die absolute Position des Bedienfingers auf der Touchpadfläche wird an der entsprechenden Position auf der Anzeigefläche über einen Cursor repräsentiert. Zur Bedienung wird dieser Cursor über virtuelle Tasten auf der Anzeige positioniert und daraufhin die Auswahl mit dem Touchpad bestätigt. Da die Zieltasten indirekt über einen Cursor bedient werden, findet hierbei eine sensomotorische Transformation statt, bei der die eigene Körperbewegung in die Bewegung des Cursors übersetzt wird. Es ist davon auszugehen, dass das absolute Bedienkonzept aufgrund der absoluten Abbildung (Mapping) des Bedienelements über die Anzeige eine intuitive und einfache Bedienbarkeit ermöglicht.

Absolute Bedienkonzepte beinhalten zum Großteil Zielbewegungen, da der Cursor beispielsweise zu einer virtuellen Zieltaste bewegt wird. Bei Zielbewegungen ist der Abgleich von Geschwindigkeit und Genauigkeit der Bewegung entscheidend. In der Literatur finden sich dafür verschiedene Modelle, wobei die Ergebnisse dieser Arbeit darauf hinweisen, dass sich die Dauer einer Bewegung beim absoluten Bedienprinzip wie erwartet über Fitts' Law erklären lässt. Fitts' Law nimmt einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen der Dauer und der Schwierigkeit einer Zielbewegung an, wobei sich die Schwierigkeit aus Parametern der Aufgabe ergibt.

Als weitere zentrale Fragestellungen sollten in dieser Arbeit grundlegende Gestaltungsaspekte im Hinblick auf das absolute Bedienkonzept im Kontext Fahren untersucht werden, wobei auch mögliche Alterseffekte berücksichtigt wurden: Einerseits wurde der Einfluss der Skalierung von Anzeige und Touchpad auf die sensomotorische Leistungsfähigkeit des Nutzers und die Leistung in der Fahraufgabe betrachtet. Unter dem Begriff Skalierung ist dabei die Größe des Ausschnitts der Anzeige beziehungsweise des Touchpads zu verstehen, der für die Darstellung der Bedienaufgabe beziehungsweise für die Bedienung genutzt wird. Andererseits sollte die Nutzung der Flexibilität von Touchpadumgebungen kritisch geprüft werden. Die Befunde legen hierbei nahe, dass eine (unerwartete) Veränderung der Skalierung von Anzeige oder Touchpad zu Einbußen in der Effizienz der Bedienung führen kann. Weiterhin wurde versucht, die Zielbewegung bei absoluter Bedienung durch visuelles Feedback über das Erreichen eines Bewegungsziels zu unterstützen. Die in diesen Untersuchungen ermittelten Er-

kenntnisse erlauben es prinzipiell, Empfehlungen für die Gestaltung der absoluten Bedieninteraktion im Fahrzeug abzuleiten. Jedoch stellen absolute Bedieninteraktionen in den vorliegenden Experimenten hohe Anforderungen an die Bedienpräzision und erzeugen während der Fahraufgabe eine hohe Fehlerhäufigkeit. Trotz theoretischer Vorteile des absoluten Bedienprinzips wurde daher die Anwendung alternativer Konzepte geprüft. Eines der entwickelten, alternativen Bedienkonzepte, das ebenfalls auf absoluter Bedienung basiert, greift Überlegungen auf, Fitts' Law zu umgehen, und erwies sich als empfehlenswert: Durch Entkopplung von visueller und motorischer Ebene lässt sich durch dieses Bedienkonzept die Zielbewegung erleichtern, ohne die virtuellen Tasten auf der Anzeige anzupassen. Darüber hinaus wurden gestenbasierte, relative Bedienkonzepte betrachtet. Bei diesen Bedienkonzepten ist der Cursor unabhängig von der Fingerposition auf der Anzeige angeordnet und wird basierend auf einzelnen Wischgesten in Bewegungsrichtung des Fingers (relativ) weiterbewegt. Da gestenbasierte Bedienkonzepte nicht auf kontinuierlichen Zielbewegungen beruhen, wurde anstelle von Fitts' Law ein geeignetes theoretisches Konzept ausgewählt, um die Zeit zu beschreiben, die bis zum Erreichen eines Bewegungsziels benötigt wird. Die Ergebnisse dieser Arbeit deuten darauf hin, dass sich diese Zeit wie erwartet sehr gut über die Anzahl an notwendigen Bedienschritten modellieren lässt. Relative Konzepte, bei denen die Fingerbewegung abhängig vom zurückgelegten Weg auf der motorischen Ebene in mehrere Cursorschritte auf der Anzeige übersetzt wird, sind hierbei aufgrund des Nutzererlebens verglichen zu diskreteren Konzepten zu bevorzugen, ihre Gestaltung sollte allerdings hinsichtlich der Bediensicherheit weiter optimiert werden.

Beide theoretischen Konzepte, Fitts' Law für absolute Bedienung sowie der gewählte Ansatz für gestenbasierte, relative Bedienung, scheinen geeignet, die Bediensituation zu beschreiben und ermöglichen es, Empfehlungen für eine möglichst einfache Bedienung in der Doppelaufgabensituation im Fahrzeug abzuleiten. Entsprechende Gestaltungsempfehlungen - unter Berücksichtigung des Alters des Nutzers - werden am Ende dieser Arbeit dargestellt.

Inhalt

1	EINLEITUNG	1
1.1	Bedieninteraktionen im Fahrzeug.....	1
1.1.1	Zunahme von Komplexität.....	1
1.1.2	Umgang mit Komplexität.....	2
1.1.3	Reduktion von Komplexität durch menschenzentrierte Bedienumgebungen	4
1.1.4	Mehraufgabensituation beim Fahren.....	6
1.1.5	Touch-Bedienung als eine Möglichkeit der kontextangepassten Bedienung	9
1.1.6	Bedienkonzepte in Touchpad-Bedienumgebungen.....	12
1.2	Sensomotorische Anforderungen von Bedieninteraktionen an den Nutzer	16
1.2.1	Zielbewegungen als generelles Paradigma zur Untersuchung sensomotorischer Interaktionen	16
1.2.2	Modelle der Bewegungskontrolle	18
1.2.3	Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich bei Zielbewegungen.....	22
1.2.4	Anwendung von Fitts' Law.....	26
1.2.5	Relevante Besonderheiten für die vorliegende Arbeit.....	27
1.2.6	Beating Fitts' Law.....	30
1.2.7	Feedback zur Erleichterung der Zielerreichung	33
1.2.8	Sensomotorische Transformationen.....	34
1.2.9	Alterseffekte beim Erlernen von Transformationen.....	42
1.2.10	Altersabhängige Veränderungen des sensomotorischen Systems im Kontext Fahren	42
1.2.11	Altersabhängige Veränderungen des Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleichs.....	43
1.3	Aktuelle Studien zu Touchpadbedienkonzepten.....	45
1.3.1	Bedienung im PC-Kontext.....	45
1.3.2	Touchpadbedienung im Fahrzeug.....	46
1.3.3	Fazit	49
1.4	Zentrale Fragestellung	49
2	GENERELLE METHODIK	53
2.1	Versuchsumgebung	53
2.2	Fahraufgabe	53
2.3	Touchpad in Experiment I bis III	54
2.4	Absolutes Bedienkonzept	54
2.5	Generelles Versuchsdesign.....	55
2.5.1	Unabhängige Variablen.....	55
2.5.2	Abhängige Variablen	55
3	EXPERIMENT I: VISUELLE SKALIERUNG DER BEDIENAUFGABE	59
3.1	Fragestellung.....	59
3.2	Methode.....	59
3.2.1	Probanden	59
3.2.2	Apparatur	60
3.2.3	Versuchsaufgabe	60
3.2.4	Ablauf einer Aufgabe.....	61
3.2.5	Versuchsdesign	61
3.2.6	Versuchsablauf.....	63

3.2.7	Datenanalyse	64
3.3	Ergebnisse	65
3.3.1	Ausgeschlossene Daten	65
3.3.2	Skalierungseffekt der Anzeige	65
3.3.3	Wechselkosten bei Änderung der Skalierung der Anzeige	69
3.3.4	Mischkosten	77
3.4	Diskussion.....	78
3.4.1	Skalierungseffekt der Anzeige	79
3.4.2	Wechselkosten bei Änderung der Skalierung der Anzeige	80
3.4.3	Mischkosten	82
3.4.4	Alterseffekte.....	83
3.4.5	Ausblick	84
4	EXPERIMENT II: MOTORISCHE SKALIERUNG DER BEDIENAUFGABE ...	85
4.1	Fragestellung.....	85
4.2	Methode.....	86
4.2.1	Probanden	86
4.2.2	Apparatur	86
4.2.3	Versuchsaufgabe	86
4.2.4	Ablauf einer Aufgabe.....	89
4.2.5	Versuchsdesign	89
4.2.6	Versuchsablauf.....	92
4.2.7	Datenanalyse	94
4.3	Ergebnisse	95
4.3.1	Ausgeschlossene Daten.....	95
4.3.2	Skalierungseffekt des Touchpads.....	95
4.3.3	Wechselkosten bei Änderung der Skalierung des Touchpads.....	101
4.3.4	Mischkosten	106
4.4	Diskussion.....	106
4.4.1	Skalierungseffekt des Touchpads.....	107
4.4.2	Wechselkosten bei Änderung der Skalierung des Touchpads.....	108
4.4.3	Mischkosten	110
4.4.4	Alterseffekte.....	110
4.4.5	Empfehlungen	111
4.4.6	Ausblick	113
5	EXPERIMENT III: UNTERSTÜTZUNG DER BEDIENAUFGABE DURCH VISUELLES FEEDBACK	114
5.1	Fragestellung.....	114
5.2	Methode.....	115
5.2.1	Probanden	115
5.2.2	Apparatur	116
5.2.3	Versuchsaufgabe	116
5.2.4	Feedbackvarianten	117
5.2.5	Versuchsdesign	117
5.2.6	Versuchsablauf.....	119
5.2.7	Datenanalyse	120
5.3	Ergebnisse	120
5.3.1	Ausgeschlossene Daten.....	120
5.3.2	Objektive Maße.....	121

5.3.3	Modellanpassungen gemäß Fitts' Law.....	121
5.3.4	Ausnutzung der Zielbreite.....	124
5.3.5	Subjektive Maße	125
5.4	Diskussion.....	126
5.4.1	Fitts' Law als Beurteilungsgrundlage	126
5.4.2	Unterschiede der Feedbackbedingungen in der effektiv genutzten Zielbreite	128
5.4.3	Empfehlungen zur Feedbackgestaltung	129
5.4.4	Ausblick	129
6	EXPERIMENT IV: VERGLEICH ALTERNATIVER BEDIENKONZEPTE.....	131
6.1	Fragestellung.....	131
6.2	Methode.....	133
6.2.1	Probanden	133
6.2.2	Apparatur	133
6.2.3	Versuchsaufgabe	134
6.2.4	Bedienvarianten	135
6.2.5	Versuchsdesign	140
6.2.6	Versuchsablauf.....	145
6.2.7	Datenanalyse	146
6.3	Ergebnisse	147
6.3.1	Ausgeschlossene Daten.....	147
6.3.2	Bearbeitungszeit.....	148
6.3.3	Relativer Fehler.....	157
6.3.4	Spurabweichung.....	161
6.3.5	Zusatzanalyse: Bedienumwege bei relativen Bedienkonzepten	163
6.3.6	Erklärung der Bearbeitungszeit.....	163
6.3.7	Subjektive Maße	170
6.4	Diskussion.....	173
6.4.1	Vergleich der Bedienvarianten in den objektiven Maßen	174
6.4.2	Erklärung der Bearbeitungszeit.....	178
6.4.3	Vergleich der Bedienvarianten in den subjektiven Maßen.....	184
6.4.4	Empfehlungen.....	184
7	ALLGEMEINE DISKUSSION.....	186
7.1	Erkenntnisse dieser Arbeit	190
7.1.1	Alterseffekte.....	190
7.1.2	Skalierungseffekt von Anzeige und Touchpad	192
7.1.3	Wechselkosten bei Transformationsänderung.....	193
7.1.4	Mischkosten bei Transformationsänderung	194
7.1.5	Fitts' Law als Beurteilungsgrundlage verschiedener Feedbackvarianten	194
7.1.6	Vergleich verschiedener Bedienkonzepte	195
7.1.7	Erklärung der Bearbeitungszeit abhängig vom Eingabekonzept.....	196
7.2	Integration der Ergebnisse	198
7.3	Offene Fragen und zukünftige Forschung.....	204
7.4	Empfehlungen für die Gestaltung von Touchpadbedienung im Fahrzeug.....	206
	LITERATURVERZEICHNIS	208
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	213

TABELLENVERZEICHNIS 218

8 ANHANG 219

1 Einleitung

1.1 Bedieninteraktionen im Fahrzeug

1.1.1 Zunahme von Komplexität

“Examine the modern automobile. Complexity again. I’m old enough to remember when the steering wheel was just for steering, the rearview mirror just a mirror. Today, steering wheels are complex control structures with multiple buttons and controls, including volume controls for music and telephone plus multiple stalks to control turn signals, cruise control, headlights, and windshield wipers. Rearview mirrors also now have multiple controls and displays.”
(Norman, 2011, S. 55).

Aufgrund von neuen technischen Möglichkeiten hat die Anzahl von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen im Fahrzeug in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. War in früheren Fahrzeugen das Radio das einzige Fahrerinformationssystem, bieten die meisten Automobilhersteller mittlerweile ein integriertes Navigationssystem, Zugriff auf eigene Medien wie Musik und eine integrierte Schnittstelle zum Mobiltelefon an. Neben der Zunahme von Fahrerinformationssystemen beinhalten diese auch oftmals mehr Funktionsumfang. Aktuell werden zusätzlich immer häufiger Funktionen des Smartphones des Fahrers und andere Internetfunktionen integriert, da gerade ein Teil jüngerer Autofahrer die Ermöglichung von Onlinefunktionen im Fahrzeug fordert. Dieser Anstieg von Funktionen bringt neue Anzeige- und Bedienkomponenten mit sich. Allerdings ist aus ästhetischen und ergonomischen Gründen das Platzangebot für Anzeige- und Bedienelemente im Fahrzeug begrenzt. Daher sind neue, kontextabhängige Bedien- und Anzeigekonzepte erforderlich geworden.

Hinsichtlich der Anzeigefläche integriert die Mehrheit der Automobilhersteller eine zentrale, frei programmierbare Anzeige. Ein derartiges Anzeigekonzept hat den Vorteil, dass viele unterschiedliche Systeminformationen auf kleiner Fläche integriert werden können, da es flexibel ist und dadurch kontextabhängig genutzt werden kann (Schattenberg, 2002). Außerdem können neue Funktionen relativ einfach in das bestehende Konzept übernommen werden.

Hinsichtlich der Bedienung zeigt sich ebenfalls eine Veränderung früherer Konzepte. Ein klassisches Bedienkonzept über einzelne Schalter ist zwar sehr direkt, intuitiv und bietet haptische Rückmeldung, ist aus Ästhetik- und Platzgründen allerdings schlecht erweiterbar: Alle Schalter müssten im Greifraum des Fahrers positioniert werden, wodurch die Bedienflächen schnell „überladen“ wirken. Außerdem kann eine hohe Anzahl verschiedenartiger Schalter die Bedienkomplexität und damit die Ablenkung von der Fahraufgabe erhöhen. Das von Norman (2011) vorgeschlagene Prinzip ein Schalter pro Funktion lässt sich bei steigendem Funktionsumfang in der heutigen Fahrzeugumgebung nicht länger umsetzen.

Schattenberg und Debus (2001) schlagen daher ein schalterreduziertes, integrales Mensch-Maschine-Interface (MMI) vor, wodurch unterschiedliche Funktionen auf der Anzeige einheitlich über ein zentrales Bedienelement (Abbildung 1-1) gesteuert werden, um die Komplexität eines steigenden Funktionsumfangs zu reduzieren. Neben einer einheitlichen Bedienung und der Platzersparnis erlaubt ein zentrales Bedienelement die einfachere Integration neuer Funktionen. Jedoch zeigten Schattenberg und Debus (2001), dass die Fahrerbeanspruchung und -ablenkung beim integralen Konzept verglichen zum konventionellen Konzept einzelner Schalter erhöht ist. Dies stellt die Wichtigkeit einer möglichst ablenkungsarmen Gestaltung der Bedieninteraktion über das zentrale Bedienelement - besonders im Hinblick auf die Fahrsituation - heraus (auf diesen Aspekt wird in Abschnitt 1.1.4 genauer eingegangen).

Eine Trennung der Anzeige vom abgesetzten Bedienelement bietet weitere Vorteile wie die Ergonomie- und sicherheitsoptimierte Platzierung beider Elemente, da die Anzeige näher am Sichtfeld des Fahrers positioniert werden kann. Als optimale Anzeigeposition ermittelte Schattenberg (2002) die Position in der Mittelkonsole oben neben dem Lenkrad. Das Bedienelement kann gleichzeitig im direkten Greifraum in der unteren Mittelkonsole platziert werden und ist damit ohne eine Anhebung des Arms erreichbar. Dies wirkt einerseits der Ermüdung des Bedienenden entgegen und fördert gleichzeitig die Stabilität. Entsprechend den genannten Vorteilen bieten Automobilhersteller wie Audi, BMW und Mercedes-Benz einen abgesetzten Dreh-Drück-Steller zur Menübedienung auf einer zentralen Anzeige an.

Zusammenfassend kann also ein abgesetztes, zentrales Bedienelement zur Menüsteuerung eine Lösung für die steigende Funktionsanzahl und den daraus resultierenden Platzmangel im Fahrzeug sein und dazu beitragen, mit der zunehmenden Komplexität der Bedienung umzugehen. Dabei ist auf eine möglichst ablenkungsarme Gestaltung der Bedieninteraktion zu achten.

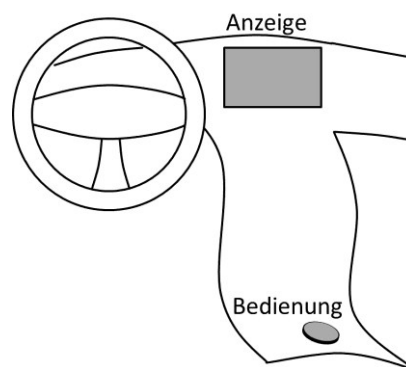


Abbildung 1-1: Abgesetztes, zentrales Bedienelement angelehnt an Schattenberg (2002)

1.1.2 Umgang mit Komplexität

Komplexität eines Systems ist gemäß Norman (2011) per se nichts Negatives. Sie spiegelt den Alltag eines Menschen wider, der ebenfalls komplex ist. Werden neue Funktionen innerhalb eines Systems gewünscht, erhöht das automatisch die Komplexität. Sie bietet dem Nutzer multiple Erfahrungen und

Gelegenheiten und so lange sie dem Nutzer angemessen erscheint, wird sie akzeptiert. Unnötige Komplexität soll jedoch vermieden werden.

Auf das Fahrzeug übertragen bedeutet dies laut Norman (2011), dass ein komplexes Bediensystem zu einer vollwertigen und positiven Nutzererfahrung beitragen kann, weil ein entsprechend großer Umfang an Funktionen zur Verfügung gestellt wird. Nutzer mögen und möchten zusätzliche Funktionen, zudem verkaufen sich entsprechende Produkte besser. So kann bezogen auf das Fahrzeug eine längere Fahrt beispielsweise in einer Stausituation durch neue Medienfunktionen interessanter gestaltet werden. Eine erzwungene Reduktion von Funktionen ist keine Lösung. Das Ziel eines Systems ist damit nicht in erster Linie Einfachheit, sondern Verständlichkeit (Norman, 2011). Einfachheit liegt in der Wahrnehmung des Nutzers und kann auch ohne die Reduktion von Funktionen erreicht werden. Auch komplexe Dinge können einfach und verständlich sein. Diesen Überlegungen folgend sollte es das eigentliche Ziel sein, komplexe Systeme möglichst verständlich zu gestalten, so dass sie als einfach wahrgenommen werden. Für das Fahrzeug gilt dies in besonderem Maße. Die Bedienschnittstelle sollte für unerfahrene Nutzer genauso wie für erfahrene Nutzer funktionieren - und das auch unter Zeitdruck und geteilter Aufmerksamkeit. Außerdem darf die Komplexität nicht von der Primäraufgabe des Fahrens ablenken (Norman, 2011).

Norman (1988) beschreibt sechs Aspekte, die zu einem verständlichen Design beitragen: *Visibility* (Sichtbarkeit), *Mapping* (Abbildung), *Affordance* (Aufforderungscharakter), *Constraint* (Einschränkung), *Conceptual model* (konzeptionelles Modell) und *Feedback* (Rückmeldung): Ein grundsätzlicher Aspekt ist die *Visibility*. Ein Design soll sichtbare Eigenschaften haben, die dem Nutzer die richtigen Nachrichten vermitteln. Das *Mapping*, das heißt, die Passung zwischen dem eigenen Handeln, zum Beispiel der Bewegung eines Kontrollelements, und den Ergebnissen in der realen Welt kann zu unmittelbarem Systemverständnis beitragen. Besonders erstrebenswert ist natürliches *Mapping*, das äußere Analogien und kulturelle Standards nutzt. Ein verständliches System beinhaltet zusätzlich *Affordances* und *Constraints*: *Affordance* beinhaltet die wahrgenommenen Eigenschaften einer Sache, die bestimmen und kommunizieren, wie diese potentiell genutzt werden kann. *Constraints* sind Grenzen der wahrgenommenen Nutzbarkeit einer Sache. Beide geben damit Hinweise, wie das Gerät bedient werden kann. Im Fokus eines einfachen, verständlichen und nutzerzentrierten Designs steht die Bereitstellung eines *Conceptual models*, das heißt, ein Modell darüber, wie eine Sache funktioniert (Norman, 2011). Dieses basiert auf den Aspekten *Mapping*, *Affordance* und *Constraint*. Zusätzlich ist *Feedback* zum augenblicklichen Zustand und den aktuellen Systemmöglichkeiten wichtig (Norman, 1988).

In der Literatur wird im Kontext des konzeptionellen Modells oftmals der Begriff mentales Modell verwendet (für eine Übersicht siehe Carroll & Olson, 1987). Dieses beinhaltet die Repräsentation eines physikalischen Systems und spiegelt das Verständnis des Nutzers über die Inhalte und Prozesse des Systems wider. Mentale Modelle werden zur Erklärung des Systemverhaltens und zur Vorhersage zukünftiger Ergebnisse genutzt, beinhalten also die Erwartung, wie ein System reagiert.

Je besser ein mentales Modell zutrifft, desto besser können Systemprozesse und -zustände vorhergesagt werden. Die von Norman (1988) beschriebenen Aspekte unterstützen die Ausbildung eines geeigneten mentalen Modells.

Wie oben beschrieben, ist Komplexität nicht vermeidbar und eine Reduktion von Funktionen ebenfalls keine Lösung (Norman, 2011). Also sollte das Hauptaugenmerk von Entwicklern darauf liegen, das System verständlich zu gestalten. Eine menschenzentrierte Gestaltung ist dafür ein zentraler Aspekt (Norman, 1988).

1.1.3 Reduktion von Komplexität durch menschenzentrierte Bedienungsumgebungen

Einige Normen, die ursprünglich aus dem Bereich Bürotätigkeit mit Bildschirmgeräten erarbeitet wurden, beschäftigen sich mit der Gebrauchstauglichkeit interaktiver Systeme und betonen die Wichtigkeit menschenzentrierter Gestaltung. Laut DIN EN ISO 9241-210 (2011) ist menschenzentrierte Gestaltung eine „Herangehensweise [...], die darauf abzielt, interaktive Systeme gebrauchstauglicher zu machen, indem sie sich auf die Verwendung des Systems konzentriert und Kenntnisse und Techniken aus den Bereichen der Arbeitswissenschaft / Ergonomie und der Gebrauchstauglichkeit anwendet“ (DIN EN ISO 9241-210, 2011, S. 6).

Menschenzentrierte Gestaltungsaktivitäten beinhalten gemäß DIN EN ISO 9241-210 (2011) die Aspekte

- Verstehen und Beschreiben des Nutzungskontexts,
- Spezifizieren der Nutzungsanforderungen,
- Entwerfen der Gestaltungslösungen,
- Testen und Bewerten der Gestaltung,

die in wechselseitiger Abhängigkeit stehen.

Zur menschenzentrierten Gestaltung eines Systems sollten folgende Grundsätze befolgt werden (DIN EN ISO 9241-210, 2011): Die Gestaltung menschenzentrierter Systeme soll auf einem umfassenden Verständnis der Benutzer, Arbeitsaufgaben und Arbeitsumgebungen beruhen und die gesamte Erfahrung des Nutzers berücksichtigen. Die Benutzer sollen außerdem während der Gestaltung und Entwicklung einbezogen werden und im Gestaltungsteam fachübergreifende Kenntnisse und Perspektiven vertreten sein. In einem iterativen Prozess sollen die Gestaltungslösungen auf der Basis benutzerzentrierter Evaluierung angepasst werden.

Dieser Ansatz kann die Gebrauchstauglichkeit eines Systems erhöhen. Die Definition von Gebrauchstauglichkeit wird zwar in der DIN EN ISO 9241-11 (1999) für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten beschrieben, kann aber auch auf andere Bediensituationen übertragen werden. Gebrauchstauglichkeit ist demnach das „Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ (DIN EN ISO 9241-11, 1999, S. 4).

Die Aspekte Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung können beispielsweise folgendermaßen ermittelt werden (DIN EN ISO 9241-11, 1999):

- Effektivität: Zielerreichungsgrad, durchschnittliche Genauigkeit
- Effizienz: Zeit für Aufgabenbearbeitung
- Zufriedenstellung: Subjektive Einschätzung der Zufriedenstellung anhand einer Skala

Aspekte der Informationsdarstellung (DIN EN ISO 9241-12, 2000) und der Dialoggestaltung (DIN EN ISO 9241-110, 2008) können die Bedienbarkeit verbessern.

Menschzentrierte Bedienumgebungen weisen Vorteile auf (DIN EN ISO 9241-210, 2011): Für den Nutzer ergibt sich ein höheres Wohlbefinden, weniger Stress und ein geringeres Risiko von psychischer und physischer Belastung. Daneben erhöht ein menschzentrierter Ansatz die Zugänglichkeit zum System und die Produktivität der Nutzer. Gebrauchstaugliche Systeme sind außerdem kommerziell erfolgreicher, da Käufer bereit sind, mehr Geld zu investieren und eine geringere Betreuung und Beratung von Käufern notwendig ist. Zudem verringert sich das Risiko, dass ein Produkt von seinen Nutzern abgelehnt wird (DIN EN ISO 9241-210, 2011).

Einer menschzentrierten Gestaltung von Bediensystemen wird in dieser Arbeit Rechnung getragen, indem

- verschiedene Gestaltungslösungen der Bedienung entworfen und verglichen werden,
- der Nutzungskontext Fahren beschrieben und in der Evaluation beachtet wird,
- die Nutzer mittels Evaluationen einbezogen werden,
- zwei Altersgruppen betrachtet werden,
- das Feedback der Nutzer für Verbesserungen der Gestaltungslösungen genutzt wird,
- Maße der drei Aspekte von Gebrauchstauglichkeit erfasst werden.

Dabei werden grundlegende Untersuchungsparadigmen aus der Psychologie angewandt: Einerseits werden Ressourcenmodelle zur Betrachtung der Mehraufgabensituation beim Fahren herangezogen, andererseits sensomotorische Anforderungen des Nutzers bei der Bedienung über Bearbeitungszeiten und Bedienfehler betrachtet. Außerdem wird die Flexibilität des Nutzers hinsichtlich des Bedienkonzepts über das Wechselkostenparadigma untersucht (das Wechselkostenparadigma wird in Abschnitt 1.2.8 genauer erläutert). Dies soll helfen, die durch das Bediensystem entstehende Komplexität und die daraus resultierende Ablenkung einzuschätzen und Hinweise darauf geben, wie die Komplexität der Bediensituation reduziert werden könnte.

1.1.4 Mehraufgabensituation beim Fahren

Eine Reduktion der Komplexität von Bediensituationen ist gerade im Kontext Fahren besonders wichtig, da die Bedienaufgabe oft nur als Nebenaufgabe zur Fahraufgabe ausgeführt wird. Werden mehrere Aufgaben parallel ausgeführt, lassen sich meist Leistungseinbußen feststellen, wenn man die Leistung in der Mehraufgabensituation mit der einzelnen Ausführung der Aufgaben vergleicht (Wickens, 2008).

Die Qualität menschlicher Leistung lässt sich anhand von drei Maßen feststellen (Wickens, Hollands, Banbury, & Parasuraman, 2013):

- Geschwindigkeit, wobei eine schnellere Ausführung für eine bessere Leistung spricht
- Genauigkeit, wobei eine genauere Ausführung für eine bessere Leistung spricht
- Aufmerksamkeitsanforderung, wobei eine geringere Menge von Aufmerksamkeit als Vorteil für die Aufgabenausführung gesehen wird

Ressourcenmodelle nehmen als Erklärung für Leistungseinbußen in Mehraufgabensituationen an, dass nur eine begrenzte Kapazität für mentale Aktivität zur Verfügung steht (Kahneman, 1973; Wickens, 1976; für eine Übersicht siehe Schmidt & Lee, 2011). Neben der Interferenz durch die begrenzte mentale Ressourcenkapazität können auch strukturelle Interferenzen auftreten, die dadurch entstehen, dass mehrere Aktivitäten denselben Wahrnehmungs- oder Response-Mechanismus beinhalten, zum Beispiel eine Hand für zwei manuelle Tätigkeiten (Kahneman, 1973).

Es lassen sich prinzipiell Ressourcenmodelle mit einer oder mit mehreren Ressourcen unterscheiden. Die Theorie multipler Ressourcen geht davon aus, dass verschiedenen kognitiven Systemen jeweils eine eigene Ressource zur Verfügung steht (Navon & Gopher, 1979). Wickens (2008) nimmt dabei ein vierdimensionales System von Ressourcen (Abbildung 1-2) mit den Dimensionen Informationsverarbeitungsstufe (stage), Informationskodierung (code), Modalität (modality) und visuelle Verarbeitung (visual processing) an (vgl. auch Wickens, 1976; Wickens, 2002). Die Informationsverarbeitungsstufe beinhaltet, dass perzeptuelle und kognitive Aufgaben andere Ressourcen benötigen als die Handlungsauswahl und -ausführung. Die Informationskodierung zeigt den Unterschied zwischen Ressourcen für räumliche oder verbale Aktivitäten. Die Modalität zeigt, dass auditive und visuelle Wahrnehmung unterschiedliche Ressourcen nutzen. Die vierte Dimension, visuelle Verarbeitung, unterscheidet zwischen fokussiertem Sehen, das für Objekterkennung genutzt wird, und Umgebungs- oder peripherem Sehen, welches das gesamte visuelle Feld nutzt und für die Wahrnehmung von Orientierung und Bewegung entscheidend ist. Je stärker sich mehrere Aufgaben hinsichtlich dieser Dimensionen unterscheiden, desto besser können sie parallel ausgeführt werden (Wickens, 2008).

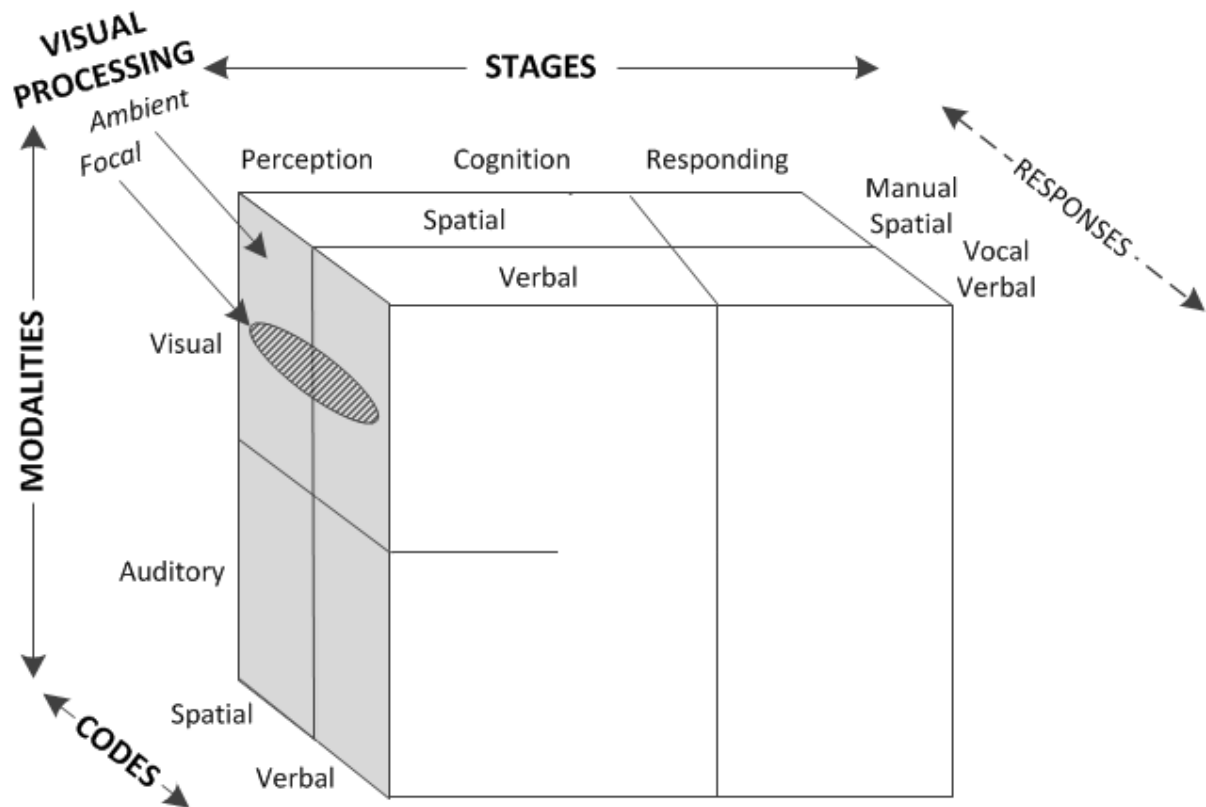


Abbildung 1-2: Vierdimensionales Ressourcenmodell nach Wickens (2008)

Aus der Theorie multipler Ressourcen werden drei Mechanismen abgeleitet, die für Variabilität der Leistung in Mehraufgabensituationen verantwortlich sind (Wickens, 2008): Ressourcenbedarf (*resource demand*), Ressourcenüberlappung (*resource overlap*) und Ressourcenzuteilung (*resource allocation*). Das Ausmaß des Leistungsabfalls wird durch die beiden Aspekte Ressourcenbedarf und Ressourcenüberlappung bestimmt:

- Ressourcenbedarf: Wenn in einer Mehraufgabensituation eine der Aufgaben schwieriger wird, benötigt sie mehr Ressourcen. Aufgrund der Konkurrenz um Ressourcen sinkt die Leistung in der anderen Aufgabe entsprechend.
- Ressourcenüberlappung: Sind sich zwei Aufgaben ähnlich und benötigen die gleichen Ressourcen, ist die Interferenz verstärkt.

Die Komponente Ressourcenzuteilung bestimmt, welche Aufgabe unter der Mehraufgabensituation den größeren Leistungsabfall zeigt (Wickens, 2008).

Multitasking, das heißt, das gleichzeitige Bearbeiten zweier oder mehrerer Aufgaben, lässt sich nach Salvucci, Taatgen und Borst (2009) als Kontinuum beschreiben und wird dadurch charakterisiert, wie viel Zeit für eine Aufgabe verwendet wird, bis zur nächsten gewechselt wird: Es reicht von gleichzeitigen (*concurrent*), schnell abwechselnden Aufgaben (Autofahren und Reden) bis hin zu sequentiellen (*sequential*) Aufgaben mit längerer Zeit zwischen den Wechseln (Kochen und Lesen; Abbildung 1-3). Bei sequentiellen Aufgaben liegen oft Minuten bis Stunden zwischen den Aufgaben.

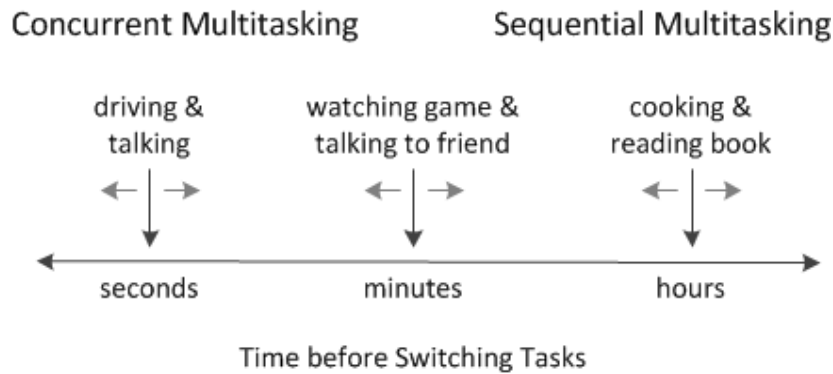


Abbildung 1-3: Das Multitasking Kontinuum nach Salvucci et al. (2009)

Die Situation Autofahren und Bedienen lässt sich dabei eher dem gleichzeitigen Multitasking zuordnen, da die Zeit bis zum Wechsel der Aufgabe im Sekundenbereich liegt. Ein länger dauernder, vollständiger Wechsel hin zur Bedienaufgabe während des Fahrens ist hinsichtlich der Sicherheit im Straßenverkehr nicht möglich.

Die Fahraufgabe an sich besteht laut Horrey, Wickens und Consalus (2006) zum einen aus der Spurhaltung, zum anderen aus der Erkennung möglicher Gefahren, wenn beispielsweise ein Fußgänger plötzlich den eigenen Weg kreuzt. Spurhaltung beruht dabei vorwiegend auf Umgebungs-Sicht, die Erkennung von Gefahrensituationen vor allem auf fokussiertem Sehen (Horrey et al., 2006).

Nebenaufgaben in der Fahrsituation schaffen eine Mehraufgabensituation und können nach den Ressourcenmodellen zu Leistungseinbußen führen. Laut Dingus, Hanowski und Klauer (2011) werden die riskantesten sekundären Tätigkeiten beim Steuern eines Fahrzeugs dadurch charakterisiert, dass sie visuell und manuell sind, aus mehreren Schritten bestehen und mehrere Blickabwendungen von der Straße benötigen. Daneben zeigt eine Studie von Mattes und Hallén (2009), dass mit steigenden Anforderungen einer rein kognitiven Nebenaufgabe die Spurabweichung im Lane Change Test (LCT) signifikant ansteigt. Die Studie zeigt außerdem, dass eine visuell-motorische Nebenaufgabe zu einer höheren Spurabweichung führt als eine kognitive. Diese Befunde stehen im Einklang zur Theorie multipler Ressourcen: Je komplexer die Nebenaufgabe, desto schlechter wird die Leistung in der Primäraufgabe. Bei einer visuell-manuellen Nebenaufgabe, wie sie bei einer Bediensituation mit visuellem Feedback vorhanden ist, kann aufgrund des Bedarfs nach ähnlichen Ressourcen mit stärkerer Interferenz zur Fahraufgabe gerechnet werden als bei einer rein kognitiven Nebenaufgabe (Mattes & Hallén, 2009; Dingus et al., 2011).

Daher würden sich hinsichtlich der Gestaltung von Bedienschnittstellen aufgrund der Theorie multipler Ressourcen folgende Empfehlungen ergeben: Die Bedienschnittstelle sollte

- möglichst einfach sein, um wenige Ressourcen zu beanspruchen und weniger von der Fahraufgabe abzulenken.

- möglichst andere Ressourcen nutzen, als die für die Fahraufgabe benötigten, das heißt, möglichst wenige visuelle und manuelle Ressourcen.¹

Um die Ressourcenverteilung dahingehend zu unterstützen, dass nur während unbedenklichen Fahrsituationen bedient wird, ist es nötig, dass die Bedienung ohne Zeitdruck möglich ist, was eine Unterbrechbarkeit der Bedienhandlung erfordert. Dadurch ist außerdem eine gleichzeitige Bearbeitung von Fahr- und Bedienaufgabe mit schnellen Wechseln zwischen den Aufgaben möglich (vgl. Salvucci et al., 2009). Eine kurze Dauer der Bedienhandlung führt zu einer kürzeren Dauer der Mehraufgabensituation, ermöglicht eine schnellere Rückkehr zur Fahraufgabe und ist damit ebenfalls erstrebenswert.

Diese theoretischen Konzepte sollen in dieser Arbeit bei der Optimierung der Gestaltung manueller Bedienung berücksichtigt werden.

1.1.5 Touch-Bedienung als eine Möglichkeit der kontextangepassten Bedienung

Wie oben beschrieben, erfordert eine Zunahme an Funktionsumfang neue Bedienkonzepte im Fahrzeug. Der momentan bei Audi, BMW und Mercedes-Benz als zentrales Bedienelement eingebaute Dreh-Drück-Steller (DDS) weist einige Nachteile auf.

Der DDS ist hinsichtlich eines natürlichen Mappings zwischen Anzeige und Bedienelement problematisch und kann die zweidimensionale Anzeigefläche nicht abbilden. Gerade bei einer getrennten Platzierung von Anzeige und Bedienelement ist allerdings ein natürliches Mapping zwischen den Komponenten wichtig, um dem Nutzer die Entwicklung eines konzeptuellen Modells (vgl. Norman, 2011) zu erleichtern und eine intuitive Bedienung zu ermöglichen.

Dabei sollte ebenfalls das Konzept der Kompatibilität beachtet werden. Wie in der Übersicht von Wickens et al. (2013) dargestellt, werden in der Literatur verschiedene Arten von Kompatibilität² beschrieben: Die Stimulus-Response-Kompatibilität (S-R-Kompatibilität), das heißt, die Kompatibilität zwischen den Reizen auf der Anzeige und den Reaktionen mittels des Bedienelements, ist bei Bediensituationen besonders relevant: Je besser das Mapping zwischen Bedienelement und Anzeige, also je höher die S-R-Kompatibilität, desto leichter ist eine Bedienhandlung, weil weniger mentale Transformationen erforderlich sind. Die S-R-Kompatibilität beinhaltet dabei unter anderem die Kompatibilität des Ortes und der Bewegung.

Die Wirkung der S-R-Kompatibilität wird im Simon-Effekt deutlich: Simon (1969) konnte zeigen, dass Reaktionen in Richtung der Reizquelle schneller sind als von der Reizquelle weg. Daraus lässt sich ableiten, dass sich die gemeinsame Verortung von Reizquelle und Reaktionsort positiv auf die Reaktionszeit auswirkt beziehungsweise die gemeinsame Verortung von Anzeige und Bedienelement

¹ Dies lässt sich am besten über eine Sprachbedienung realisieren. Klassische Bedienhandlungen im Fahrzeug beinhalten manuelle Kontrolle und meist auch visuelles Feedback. Die vorliegende Arbeit soll sich dennoch mit der Optimierung manueller Bedienung beschäftigen.

² Beispiele nach Wickens et al. (2013): Ökologische Kompatibilität (inwieweit repräsentiert die Schnittstelle das physikalische System), Displaykompatibilität (inwieweit sind Displayrepräsentationen kompatibel zum mentalen Modell des Nutzers)

eine schnellere Bedienzeit ermöglicht. Des Weiteren zeigten Simon und Rudell (1967), dass die schnellere Reaktion bei S-R-Kompatibilität des Ortes auch dann auftritt, wenn die Reizposition zur Bearbeitung der Aufgabe nicht relevant ist: In ihrer Studie reagierten die Probanden auf auditive Kommandos („rechts“, „links“), die entweder am rechten oder linken Ohr dargeboten wurden. Stimmt die Reizort mit dem Reizinhalt überein, zeigten sich deutlich kürzere Reaktionszeiten, obwohl nur der Reizinhalt, nicht aber der Darbietungsort für die Bearbeitung relevant war. Stimmt Reizort und Reizinhalt nicht überein, zeigten sich längere Reaktionszeiten. Das bedeutet, dass irrelevante Orts-Informationen die Handlungsausführung behindern können (Simon & Rudell, 1967).

Hinweise auf die Bedeutung der Kongruenz der Anordnung von Anzeige und Bedienelement konnte eine Studie von Fitts und Seeger (1953) geben, die verschiedene Reiz- und Bedienelement-Anordnungen miteinander kombinierte. Sie konnten zeigen, dass bei Übereinstimmung der Anordnung von Reizen und Bedienelementen die schnellsten und genauesten Bedienhandlungen auftraten. Daraus lässt sich ableiten, dass auf eine kongruente Anordnung Wert gelegt werden sollte, sobald keine gemeinsame Anordnung von Anzeige und Bedienelement möglich ist (Fitts & Seeger, 1953).

Im Fahrzeug ist allerdings der eingangs beschriebene Zielkonflikt der Platzierung zu beachten: Die Anzeige sollte möglichst nahe an der Frontscheibe platziert werden, um Blickabwendungen zu reduzieren, das Bedienelement dagegen sollte ergonomisch im Greifraum des Fahrers positioniert werden. Damit ist eine gemeinsame Verortung von Bedienung und Anzeige nur mit deutlichen Kompromissen in der Platzierung zu erreichen. Insofern scheint eine Absetzung des Bedienelementes von der Anzeige wie beim DDS vertretbar. Dabei sollte eine Kongruenz in der Anordnung zwischen Bedienelement und Anzeigeelementen angestrebt werden.

Wie oben erwähnt, ist ein weiterer Aspekt der S-R Kompatibilität die Bewegungskompatibilität (für eine Übersicht siehe Wickens et al., 2013): Diese beinhaltet unter anderem Aspekte wie Populationsstereotypen (eine Bedienbewegung nach oben, rechts, im Uhrzeigersinn oder nach vorne sollte eine Erhöhung bedeuten) und die Kongruenz der Bewegung (vertikale Bedienbewegungen sollten zu vertikaler Bewegung des Kontrollelements auf der Anzeige führen). Daneben sollten nicht übereinstimmende Dimensionen vermieden werden. Beispiele für nicht übereinstimmende Dimensionen sind vertikale Bewegungen des Bedienelements kombiniert mit horizontalen Änderungen auf der Anzeige oder Rotationsbedienelemente, die mit linearem Feedback auf der Anzeige kombiniert sind (Wickens et al., 2013).

Hierbei zeigen sich Nachteile des DDS. Rotatorische Bedienhandlungen werden häufig in lineare Änderungen auf der Anzeige übersetzt, zum Beispiel Drehbewegungen, um den Cursor in einer vertikalen Liste entlang zu bewegen, was die Bewegungskompatibilität reduziert. Des Weiteren erweist sich der DDS aufgrund der indirekten Cursorsteuerung und Auswahl durch Dreh- oder Drückbewegungen insbesondere bei der Texteingabe als ein eher langsames Bedienkonzept. Außerdem stößt er aufgrund fehlender Bedienfreiheitsgrade (Drehen, Drücken, Bestätigen) bei komplexeren Funktionen, die bei-

spielsweise zweidimensional aufgebaut sind oder den häufigen Wechsel von Interaktionsmodi beinhalten, an seine Grenzen.

Vorteile des DDS liegen in der guten haptischen und akustischen Rückmeldung von Bedienhandlungen (Pitts et al., 2012): Der visuelle Kanal, der von der Fahraufgabe stark belegt ist, kann dadurch entlastet werden.

Touchkonzepte weisen oft eine eingeschränktere haptische und akustische Rückmeldung auf. Sie sind allerdings wesentlich flexibler als der DDS und können kontextabhängig angepasst werden. Durch ihre Flexibilität können auch komplexere Funktionen, die beispielsweise eine zweidimensionale Bedienung erfordern, gut in ein bestehendes System integriert werden. Es lassen sich Touchscreens und Touchpads unterscheiden.

Touchscreens im Fahrzeug

Bei einem Touchscreen sind Anzeige und Bedienung kombiniert. Hier ist eine vollständige Kompatibilität von Anzeige- und Bedienort gegeben. Durch Berührung eines Teils der Anzeige oder einer bestimmten virtuellen Taste können Funktionen meist direkt ausgewählt werden. Es handelt sich damit um eine besonders direkte und damit intuitive Interaktion (Pitts et al., 2012).

Allerdings führt das Bedienkonzept im Fahrzeug zum oben beschriebenen Zielkonflikt der Platzierung, da die Anzeige im Greifraum positioniert werden muss. Funktionen müssen außerdem verhältnismäßig groß auf der Anzeige dargestellt werden, um mit dem Finger getroffen werden zu können, und brauchen damit mehr Platz. Zusätzlich verdeckt die Hand während der Bedienung einen Teil der Anzeige, wodurch die Bedienung gestört werden kann.

Touchpads im Fahrzeug

Bei einer Touchpadbedienung wird über eine berührungssensitive Fläche ein Cursor auf der Anzeige gesteuert und darüber Funktionen aktiviert.

Die Bedienung über ein Touchpad löst damit den Zielkonflikt der Platzierung im Fahrzeug auf: Im Gegensatz zum Touchscreen ist eine Trennung zur Anzeige gegeben, was eine optimierte Positionierung von Anzeige und Bedienelement ermöglicht. Da die Anzeige nicht direkt mit dem Finger bedient wird, können Funktionen auch kleiner dargestellt werden und die Problematik der Verdeckung durch die Hand wird umgangen. Zusätzlich werden unästhetische Fingerabdrücke auf der Anzeige vermieden. Da die Bedienung verglichen zum Touchscreen allerdings indirekter ist, ist sie auch weniger intuitiv und weist eine etwas schwierigere sensomotorische Transformation auf (auf diesen Aspekt wird in Abschnitt 1.2.8 näher eingegangen).

Neben der generellen Flexibilität und einfachen Bedienung von Touchkonzepten liegen Potentiale der Touchpadbedienung außerdem in der Bekanntheit durch die in Laptops verwendeten Systeme. Touchpads bilden zudem durch zweidimensionale Bewegungen zur Bedienung die Anzeigefläche eindeuti-

ger ab als beispielsweise der oben erwähnte DDS (Vilimek & Zimmer, 2007). Zusätzlich können neuere Konzepte wie die Handschrifteingabe integriert werden.

Aufgrund der vielen Vorteile von Touchkonzepten im Generellen und von Touchpadbedienung im Speziellen werden im Rahmen dieser Arbeit Möglichkeiten einer Touchpadbedienung im Fahrzeug untersucht und Gestaltungsempfehlungen für das Bedienkonzept erarbeitet.

1.1.6 Bedienkonzepte in Touchpad-Bedienungsumgebungen

Aufgrund der Flexibilität von Touchinteraktionen lassen sich verschiedene Bedienkonzepte realisieren.

Anwendungsbeispiel: Cam-Touch-Pad

Ein Konzept, das die Vorteile der direkten und intuitiven Bedienung von Touchscreens mit der abgesetzten und damit ergonomisch optimierten Bedienung von Touchpads vereint, ist das Cam-Touch-Pad (Abbildung 1-4; Weber, 2011): Handbewegungen über dem Touchpad werden mit einer Videokamera erfasst und auf der zentralen Anzeige als transparentes Bild (der bedienenden Hand) angezeigt, ohne den Anzeigehalt zu verdecken. Die Touchscreen-Logik bleibt damit bei abgesetzter Bedienung und den entsprechenden Vorteilen (vgl. Abschnitt 1.1.5, Touchpads im Fahrzeug) erhalten (Mattes, 2010). Neben der aufwändigen Technik bringt diese Methode allerdings das Problem mit sich, dass das Touchpad aufgrund der Abbildung der Hand ähnlich zur Anzeige und damit verhältnismäßig groß skaliert sein muss.



Abbildung 1-4: Cam-Touch-Pad (Weber, 2011)

Absolutes Bedienkonzept

Ein Bedienprinzip, das mit einem einfachen Touchpad funktioniert und sich ebenfalls von der Touchscreenbedienung ableiten lässt, ist die absolute Bedienung (Abbildung 1-5): Dieses bildet die Logik eines Touchscreens ab, der aber in Bedienbereich und Anzeige geteilt wird. Touchpad- und Anzeigefläche sind einander direkt zugeordnet. Die absolute Position des Bedienfingers auf der Touchfläche wird an der entsprechenden Position auf der Anzeige über einen Cursor, beispielsweise einen Kreis, repräsentiert. Dieser Cursor bewegt sich kongruent zur Fingerbewegung auf dem Touchpad mit. Virtuelle Tasten auf der Anzeige können ausgewählt werden, indem der Finger beziehungsweise der Cursor an der entsprechenden Stelle auf dem Touchpad beziehungsweise auf der Anzeige positioniert werden und daraufhin die Taste betätigt wird.

Vollständige Kompatibilität zwischen Anzeige- und Bedienort, welche die Reaktion auf Bedienreize erleichtert (vgl. Simon, 1969; Abschnitt 1.1.5), ist bei absoluter Touchpadbedienung aufgrund der Trennung von Bedienung und Anzeige nicht möglich. Da aber die Anordnung der möglichen Tasten auf dem Touchpad vollständig der Anordnung der virtuellen Tasten auf der Anzeige entspricht, wird die Empfehlung hinsichtlich der Kongruenz in der Anordnung bestmöglich erfüllt. Diese Form der Kompatibilität ist gemäß der Studie von Fitts und Seeger (1953) sehr erstrebenswert, da sie eine höhere Bediengenauigkeit und -schnelligkeit ermöglicht (vgl. Abschnitt 1.1.5).

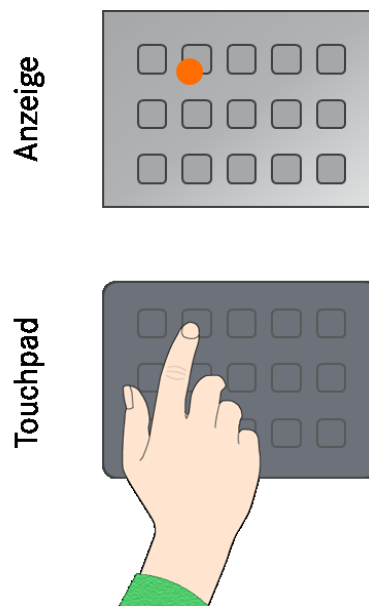


Abbildung 1-5: Absolutes Bedienprinzip

Das absolute Bedienkonzept bietet außerdem ein direktes Mapping zwischen Bedienung und Anzeige beziehungsweise zwischen Bewegungen des Fingers und des Cursors, was die Entwicklung eines konzeptuellen Modells erleichtern und damit die Komplexität der Bedienung reduzieren könnte. Solch ein Konzept würde damit den Anforderungen von Norman (1988) gerecht werden.

Ähnlich zu einer Touchscreenbedienung handelt es sich bei einem absoluten Touchpadbedienkonzept also um eine verhältnismäßig direkte und damit intuitive Interaktion. Gleichzeitig werden Nachteile

der Touchscreenbedienung wie der Zielkonflikt der Platzierung (vgl. Touchscreens im Fahrzeug) vermieden.

Ein weiterer Vorteil des Konzepts liegt in der stetigen Bewegung des Cursors. Außerdem ist das Prinzip auf viele Tastenverteilungen auf der Anzeige anwendbar und damit sehr flexibel. Auch Spezialfälle wie Auswahl von Zielen in der Karte, Texteditierung oder Bedienung von Internetinhalten lassen sich damit realisieren.

Nachteile zeigen sich in der nötigen Präzision, um eine Taste anzusteuern. Für eine gute Erreichbarkeit sollten die Tasten daher möglichst groß sein und nicht zu weit auseinanderliegen. Bediengenaugigkeit und Größe der Tasten werden Gegenstand dieser Arbeit sein, wobei auf diese Aspekte in Abschnitt 1.2.3 genauer eingegangen wird.

Die Repräsentation des Fingers in Form des Cursors kann variiert werden. Es ist außerdem möglich, die Bedienung mit zusätzlichem Feedback anzureichern: So kann das Erreichen einer virtuellen Taste beispielsweise akustisch oder die aktuell selektierte Taste durch ein temporäres Einfärben (Abbildung 1-6), in dieser Arbeit als „Highlight“ bezeichnet, rückgemeldet werden.

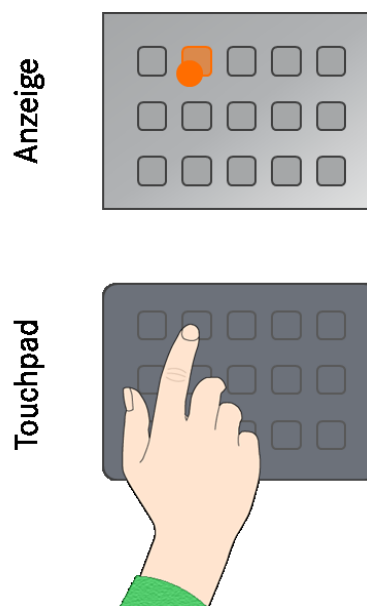


Abbildung 1-6: Absolutes Bedienprinzip mit Rückmeldung der aktivierbaren Taste (Highlight)

Relatives Bedienkonzept

Ähnlich zur Maussteuerung über das Touchpad am Laptop können auch relative Bedienkonzepte (Abbildung 1-7) realisiert werden. Bei diesen wird ein Cursor durch Fingerbewegungen auf dem Touchpad in Bewegungsrichtung auf der Anzeige weiterbewegt - unabhängig von der absoluten Fingerposition. Relative Bedienung ist dabei weniger direkt als die absolute Bedienung.

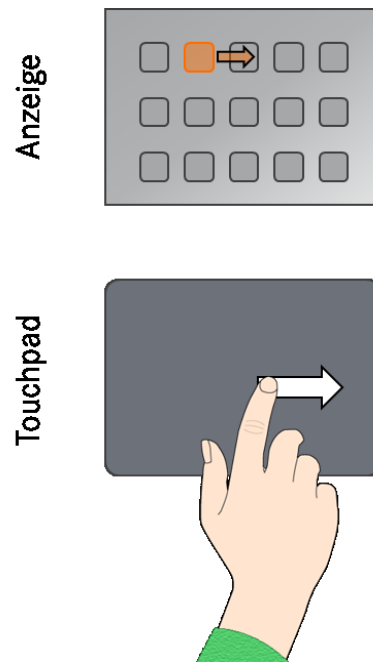


Abbildung 1-7: Relatives Bedienprinzip

In relativen Bedienkonzepten sind verschiedene Ausprägungen denkbar. Eine Fingerbewegung kann einerseits kontinuierlich in eine Cursorbewegung übersetzt werden, das heißt, der Cursor bewegt sich so lange richtungsanalog, wie der Finger bewegt wird. Es ist andererseits auch möglich, die Fingerbewegung als Geste zu interpretieren. Diese kann einerseits diskret gewertet werden, so dass der Cursor pro Geste einen Schritt weiterbewegt wird. Eine zweite Möglichkeit besteht in der wegabhängigen Wertung der Geste, das heißt, abhängig von der Gestenlänge wird der Cursor eine bestimmte Anzahl von Einheiten weiterbewegt.

Eine relative Cursorsteuerung erzeugt laut Casiez, Vogel, Pan und Chaillou (2007) das Problem des Umsetzens des Fingers: Um bei weiten Zielbewegungen das Verlassen der Eingabefläche zu vermeiden, muss bei Erreichen der Grenze der Eingabefläche der Finger neu positioniert und danach die Eingabe fortgesetzt werden. Die Häufigkeit des Umsetzens ist jeweils abhängig von der Größe der Anzeige- und Eingabefläche, dem Übersetzungsverhältnis (Verstärkung) zwischen Finger- und Cursorbewegungen (vgl. Abschnitt 1.2.8) und dem Nutzen eines dynamischen Übersetzungsverhältnisses, das beispielsweise abhängig von der Geschwindigkeit der Fingerbewegung angepasst wird (Casiez et al., 2007).

Kombination von absoluter und relativer Bedienung

Gerade bei großen Anzeigen entsteht, wie gerade beschrieben, bei relativer Bedienung das Problem, dass der Finger zur Bedienung neu positioniert werden muss. Es lassen sich daher auch Ansätze finden, die dieses Problem durch die kombinierte Nutzung absoluter und relativer Bedienung zu lösen versuchen.

McCallum und Irani (2009) untersuchten die Nutzung eines Touchscreens am Mobiltelefon zur Interaktion mit großen Anzeigen - es handelt sich daher um ein Touchpadkonzept, da Bedienung und An-

zeige getrennt sind. Sie entwickelten zur Lösung des Problems des Umsetzens das neuartige Bedienkonzept ARC-Pad, das eine absolute und relative Cursorsteuerung vereint, ohne dass der Nutzer explizit zwischen den beiden Arten der Cursorsteuerung wechseln muss. In dem Konzept sprang der Cursor bei Fingerberührung und -loslassen an die entsprechende Position auf der Anzeige (absolute Eingabe). Bei Wischen über das Touchpad (unter kontinuierlichem Fingerkontakt) wurde der Cursor relativ bewegt, wodurch er präzise positioniert werden konnte. Zum Bestätigen eines Ziels wurde eine separate Taste gedrückt. In einem Vergleich des ARC-Konzepts mit einer rein relativen Bedienung zeigte sich eine schnellere Zielerreichung mit dem ARC-Pad und weniger Umsetzen ohne Genauigkeitseinbußen.

Da im Fahrzeug das Verhältnis von Anzeige und Bedienfläche allerdings weniger unterschiedlich ist, scheint die Anwendung eines kombinierten Konzepts, um die Häufigkeit des Umsetzens zu reduzieren, weniger erforderlich.

Cursorkonzepte

Ein weiterer Aspekt, die Bedienkonzepte zu unterscheiden, liegt in der verwendeten Cursorlogik. Der Cursor kann für beide beschriebenen Bedienkonzepte entweder frei auf der Anzeige bewegt werden und jeden Punkt auf der Anzeige erreichen oder alternativ objektgebunden zwischen den aktivierbaren Inhalten der Anzeige, beispielsweise den virtuellen Tasten, diskret springen. Wird ein objektgebundener Cursor eingesetzt, vermeidet man das Problem, den Cursor präzise über Zielobjekten platzieren zu müssen. Allerdings ist die Bewegung dann nicht mehr fließend, so dass die intuitive Cursorbewegung, die dem Finger direkt folgt, verloren geht. Weiterhin ist problematisch, dass nicht in allen Anwendungen im Fahrzeug eine klare Struktur von objekthaften Zielen vorliegt. So sind beispielsweise in einer Straßenkarte alle Punkte als mögliches Ziel denkbar.

Fazit

Aufgrund der natürlichen, stetigen Bewegung eines objektunabhängigen (frei beweglichen) Cursors und seiner flexiblen Einsetzbarkeit soll diese Cursorlogik in dieser Arbeit eingesetzt werden. Bei der Wahl des zu untersuchenden Bedienkonzeptes wird sich die folgende Arbeit auf absolute Konzepte konzentrieren, da diese gegenüber relativen Konzepten einen Vorteil hinsichtlich der Direktheit der Bedienung bieten.

1.2 Sensomotorische Anforderungen von Bedieninteraktionen an den Nutzer

1.2.1 Zielbewegungen als generelles Paradigma zur Untersuchung sensomotorischer Interaktionen

Viele Alltagshandlungen bestehen aus schnellen gezielten Bewegungen (im Folgenden „Zielbewegungen“ genannt), wie das Betätigen eines Lichtschalters oder das Hämmern eines Nagels in die Wand (Proctor & van Zandt, 2008). Insbesondere Bedienvorgänge beinhalten Zielbewegungen wie das Drücken des Startknopfes am Laptop oder das Ansteuern einer virtuellen Taste in einem Menüsystem.

Zielbewegung bedeutet dabei, dass der Arm oder ein anderes Körperteil von einem Start- zu einem Zielort bewegt wird (Proctor & van Zandt, 2008).

Hinsichtlich Grundlagen der generellen Bewegungssteuerung lassen sich zwei unterschiedliche Richtungen feststellen, der sensomotorische und der ideomotorische Ansatz.

Sensomotorischer Ansatz der Bewegungssteuerung

Im sensomotorischen Ansatz wird Handeln als Fortsetzung der Wahrnehmung gesehen, das heißt, beides ist stark miteinander verbunden (für eine Übersicht siehe Hommel & Nattkemper, 2011): Für die Handlungssteuerung sind afferente Prozesse (Sensorik), efferente Prozesse (Signale des zentralen Nervensystems an die Muskulatur) und zentrale Prozesse (die Verarbeitung der afferenten Information und Umsetzung in efferente Prozesse) entscheidend. Die enge Verbindung von Reiz, Informationsverarbeitung und Reaktion spielt im sensomotorischen Ansatz eine zentrale Rolle.

Auf dieser Grundlage basieren Modelle, die den Verarbeitungsweg zwischen Wahrnehmung und Bewegung in Teilprozesse oder auch Stufen gliedern. Donders (1969) versuchte bereits im Jahr 1868 Stufen der Informationsverarbeitung zu trennen (zum Beispiel Diskrimination zwischen Reizen und die entsprechende Reaktion) und deren Dauer zu ermitteln, indem er mittlere Reaktionszeiten von Aufgaben mit verschiedenen Verarbeitungsstufen verglich. Später stellte Sternberg (1969) die Methode additiver Faktoren vor, um die Stufen der Informationsverarbeitung zu untersuchen. Dabei werden experimentelle Faktoren (experimentell variierte unabhängige Variablen) betrachtet, welche die Dauer der Stufen beeinflussen. Die Annahme ist, dass Faktoren, wenn sie keine gemeinsamen Stufen beeinflussen, unabhängig und additiv auf die mittlere Reaktionszeit wirken, wenn sie aber gemeinsame Stufen beeinflussen, nicht additiv wirken, sondern interagieren. Die Methode additiver Faktoren sucht nach experimentellen Faktoren, die nicht additiv auf die Reaktionszeit wirken und nimmt an, dass es für derartige Faktoren ein korrespondierendes Paar von Verarbeitungsstufen gibt. Auf Basis mehrerer Experimente identifizierte Sternberg (1969) so verschiedene Stufenmodelle.

Aktuelle Stufenmodelle der Informationsverarbeitung nehmen mindestens drei Stufen zwischen der Reizpräsentation und der entsprechenden Handlung an: Reizidentifizierung, Response-Auswahl und Response-Programmierung (Abbildung 1-8; für eine Übersicht siehe Schmidt & Lee, 2011).

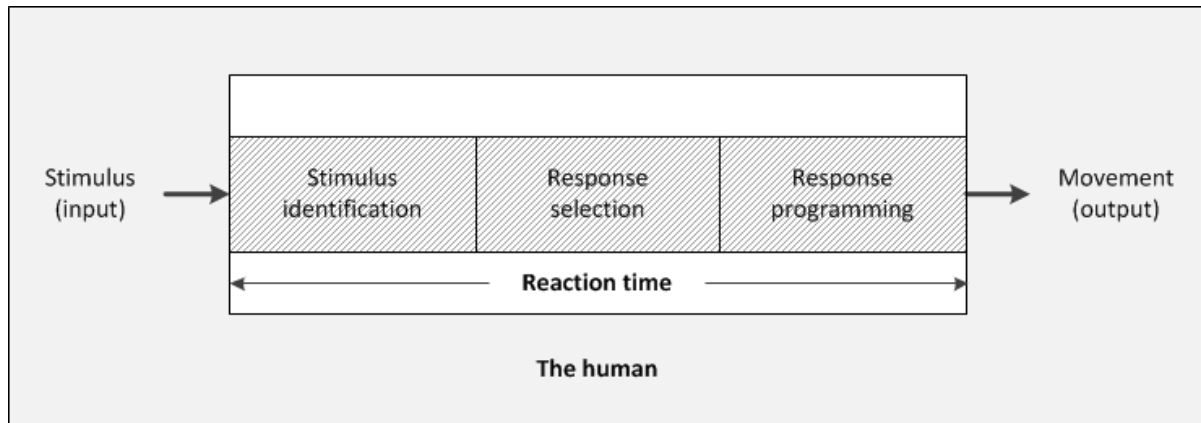


Abbildung 1-8: Stufenmodell der Informationsverarbeitung nach Schmidt und Lee (2011)

Ideomotorisches Prinzip der Bewegungssteuerung

Ursprung des ideomotorischen Ansatzes ist die Frage, wie „wir [einerseits] willkürliche, zielgerichtete Handlungen ausführen können, andererseits aber so wenig darüber wissen, wie wir das eigentlich tun“ (Hommel & Nattkemper, 2011, S. 4). Das ideomotorische Prinzip geht also davon aus, dass eher das Wissen um Handlungseffekte als das Wissen über die Handlung selbst Handlungsvoraussetzung ist. Handlung beginnt als „Wechselspiel zwischen einer Intention und der Auswahl intentionsdienlicher Handlungen“ (Hommel & Nattkemper, 2011, S. 4). Ideomotorische Ansätze betonen damit Handlungsziele. Reize spielen eine weniger zentrale Rolle als beim sensomotorischen Ansatz: Sie sind lediglich das Ergebnis von Handlungen und werden hinsichtlich des Handlungsziels bewertet (Hommel & Nattkemper, 2011).

1.2.2 Modelle der Bewegungskontrolle

Es lassen sich zwei Arten von Bewegungskontrolle unterscheiden: Closed-loop (geschlossene Schleife) und Open-loop (offene Schleife) Kontrolle. Ein erstes Modell zur Bewegungskontrolle, das beide Arten kombiniert, wurde bereits 1899 von Woodworth aufgestellt.

Woodworth (1899, zitiert nach Schmidt & Lee, 2011) nahm an, dass Zielbewegungen aus zwei Phasen bestehen, der *initialen, impulsiven Phase* und der *laufenden Kontrollphase*. In der initialen Phase wird ein Impuls in Richtung Ziel ausgeführt. In der folgenden Kontrollphase wird visuelles Feedback zum genauen Ansteuern des Ziels genutzt und Fehler werden korrigiert. Die zweite Phase tritt allerdings nur auf, wenn genügend Zeit vorhanden ist, den Fehler zu verarbeiten und ein Korrektursignal zu erzeugen.³

Die beiden Phasen lassen sich den beiden eingangs genannten Arten von Bewegungskontrolle zuordnen. Diese sollen im Folgenden näher erläutert werden.

³ Um die Zeit zu bestimmen, ab der visuelles Feedback zur Bewegungskorrektur genutzt werden kann, ließ Woodworth (1899, zitiert nach Schmidt & Lee, 2011) in einer Studie die Probanden verschiedene Bewegungslängen unter konstanter Geschwindigkeit mit einem Stift herstellen - entweder mit geöffneten oder geschlossenen Augen. Er konnte zeigen, dass die Probanden ab Bewegungszeiten von mindestens 250 ms von visuellem Feedback profitierten, bei Bewegungszeiten unter 215 ms die Fehlerhäufigkeiten in beiden Sichtbedingungen gleich waren.

Closed-loop Bewegungskontrolle

Bewegungskontrolle in einem geschlossenen Regelkreis (Closed-loop) kann man sich, wie in einer Übersicht von Schmidt und Lee (2011) dargestellt, analog zur Kontrolle in einem mechanischen System wie einer Heizung vorstellen: Bei Vorliegen eines Systemziels wird ein Sollwert festgelegt. Während der Bewegungsausführung wird Feedback über den Istzustand mit der Referenz (Sollwert) verglichen und dadurch ein möglicher Fehler (als Differenz zwischen Ist und Soll) festgestellt. Dieser wird als Feedback an eine Steuerungseinheit rückgemeldet, die dann Instruktionen zur Fehlerreduktion an einen ausführenden Systempart sendet. Dies reduziert den Fehler, woraufhin wiederum Ist- und Sollwert verglichen werden. Dieser Prozess wird fortgesetzt bis die Differenz möglichst null ist. Damit handelt es sich also um einen iterativen Prozess. Überträgt man das Konzept, wie in der Übersicht von Schmidt und Lee (2011) beschrieben, auf die motorische Kontrolle von Bewegungen (Abbildung 1-9), startet ein Reiz oder ein internes Ziel eine Handlung durch die verschiedenen Stufen der Informationsverarbeitung (vgl. Abbildung 1-8), was einen Bewegungsbefehl an die Muskulatur erzeugt. Gleichzeitig wird eine Referenz erzeugt, welche die erwarteten Konsequenzen einer korrekten Handlung beinhaltet und damit die sensorische Qualität des Ziels spezifiziert. Muskelkontraktionen, Bewegungswahrnehmung und Umweltveränderungen werden mit dem erwarteten Feedback einer korrekten Handlung verglichen. Ergibt sich eine Differenz zwischen Ist- und Sollwert, wird ein Fehler rückgemeldet und eine Korrektur eingeleitet.

Wie von Schmidt und Lee (2011) dargestellt, ist Closed-loop Kontrolle vor allem für Bewegungen über einen längeren Zeitraum bedeutsam. So basiert beispielsweise Tracking (Folgeaufgaben) auf Closed-loop Kontrolle. Bei Bewegungen, die sehr schnell sind, beispielsweise weniger als 100 ms benötigen, bleibt nicht genug Zeit für die Generierung und Erkennung von Fehlern und die Festlegung und Initiierung einer Korrektur. Es müssten in jeder Iteration alle Stufen der Informationsverarbeitung durchlaufen werden. Closed-loop Modelle sind damit für die Erklärung sehr schneller, kontrollierter Bewegungen nicht geeignet (Schmidt & Lee, 2011).

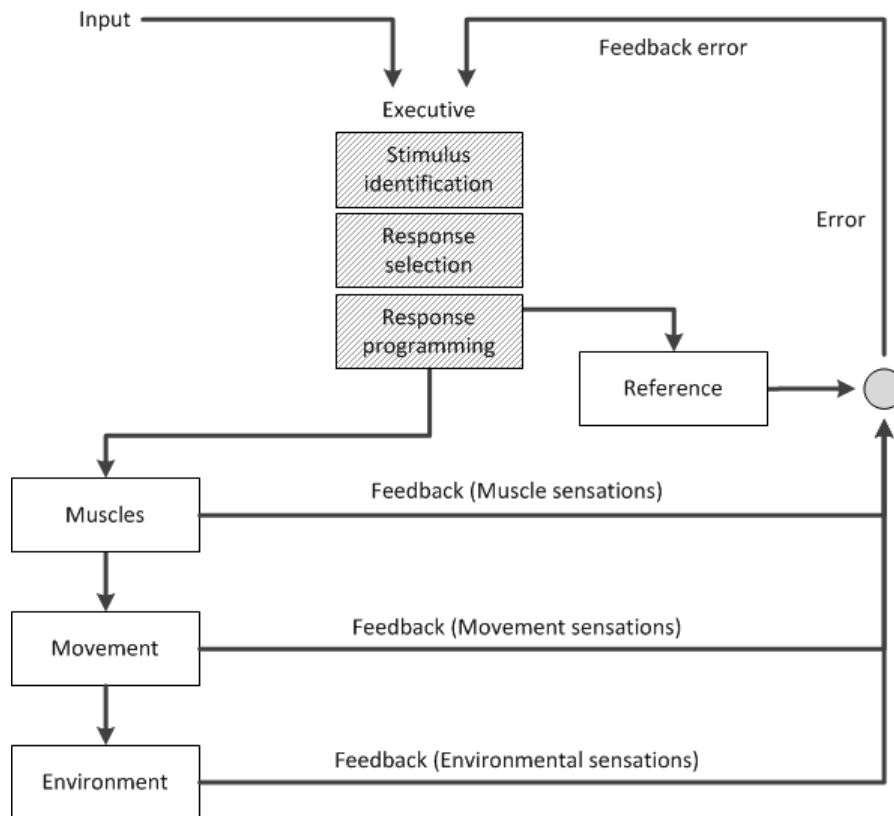


Abbildung 1-9: Closed-loop Bewegungskontrolle nach Schmidt und Lee (2011)

Open-loop Bewegungskontrolle

Bei Open-loop Kontrolle werden Bewegungen vorprogrammiert und laufen ohne Beachtung von Feedback ab, das heißt, in einem nicht geschlossenen Regelkreis (Open-loop, Abbildung 1-10). Schmidt und Lee (2011) bieten hierzu eine Übersicht: Bei einem bestimmten Input wird die Exekutive programmiert, dem Effektor zeitabhängig bestimmte Instruktionen zu senden. Der Effektor führt diese Instruktionen aus. Innerhalb des Systems wird kein Bewegungsfeedback genutzt.

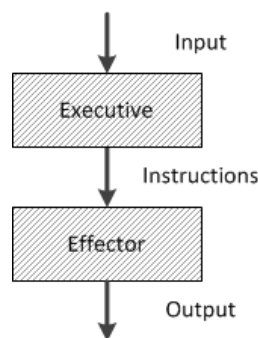


Abbildung 1-10: Open-loop Bewegungskontrolle nach Schmidt und Lee (2011)

Open-loop Kontrolle wird damit durch die motorische Vorprogrammierung von Bewegungen ermöglicht. Keele (1968) definiert ein motorisches Programm dabei als „a set of muscle commands that are structured before a movement sequence begins, and that allows the entire sequence to be carried out uninfluenced by peripheral feedback“ (Keele, 1968, S. 387).

Obwohl Feedback nicht zur direkten Fehlerkorrektur genutzt wird, spielt es eine große Rolle bei Open-loop Kontrolle (Schmidt & Lee, 2011): Es dient dazu, vor der Bewegung den Zustand des motorischen Systems einzuschätzen, während der Bewegung zumindest das Auftreten von Fehlern festzustellen, um beispielsweise bei Handlungssequenzen zu reagieren, und nach der Bewegung festzustellen, ob das Ziel erreicht wurde.

Wie in der Übersicht von Schmidt und Lee (2011) dargestellt, treten bei der Annahme, dass Bewegungen im Vorfeld programmiert werden, zwei Notwendigkeiten auf. Erstens müssen die Motorprogramme für jede einzelne Handlung *gespeichert* werden und zweitens können Motorprogramme das *Erlernen neuer Bewegungen* nicht erklären. Diese Probleme führten zu Schmidts Idee von generalisierten motorischen Programmen (GMP) (Schmidt, 1975): Ein GMP wird für eine bestimmte Klasse von Handlungen im Gedächtnis gespeichert und enthält invariante Aspekte wie die Reihenfolge von Ereignissen, das relative Timing und die relative Kraft. Bei jeder Ausführung müssen zusätzlich bestimmte Parameter, wie die Gesamtdauer, die generelle Kraft und die Muskelauswahl gesetzt werden. Zur Festlegung der Parameter ist - wie oben beschrieben - vor der Bewegung Feedback zum Zustand des motorischen Systems wichtig (Schmidt, 1975).

Verschiedene Aspekte sprechen für motorische Programme (für eine Übersicht siehe Proctor & van Zandt, 2008): Erstens sind erlernte Bewegungen ohne Feedback möglich. Zweitens können schnelle Bewegungen genau ausgeführt werden, obwohl die Verarbeitung von Feedback länger dauern würde als die eigentliche Bewegung (zum Beispiel beim Tippen). Drittens dauert die Planung komplexer Bewegung oder zumindest die Reaktionszeit, bis die Handlung initiiert wird, länger als die Planung weniger komplexer Bewegungen.

Nach Heuer (1983) ist für vorprogrammierte Bewegungen ein Modell darüber, welche motorischen Kommandos zu welcher Körperbewegung führen (Körper-Transformation), notwendig. Wird die Körper-Transformation beherrscht, muss der Ablauf einer Bewegung nicht mehr über Feedback korrigiert werden. Wird bei einer vorprogrammierten Bewegung ein Werkzeug verwendet, ist zusätzlich ein Modell darüber, welche Körperbewegung zu welcher Werkzeugbewegung führt (Werkzeugtransformation), nötig. Auf den Aspekt der Werkzeugtransformation wird in Abschnitt 1.2.8 genauer eingegangen.

Generell wird angenommen, dass Bewegungen, die zu schnell ausgeführt werden, um eine Modifizierung durch Feedback zu gewährleisten, oder Bewegungen, die „überlernt“ sind, Open-loop ablaufen (Proctor & van Zandt, 2008). Die gleiche Bewegung kann also abhängig vom Lernstatus zuerst Closed-loop und im späteren Lernverlauf, wenn ein motorisches Programm entwickelt und dessen Parameter spezifiziert wurden, Open-loop gesteuert werden.

Ähnlich zur Closed-loop und Open-loop Steuerung von Bewegungen sprechen Wolpert, Diedrichsen und Flanagan (2011) von Kontrollklassen („feedforward“ und „reactive control“⁴; Wolpert et al., 2011, S. 740), die jeweils adaptiv sind und für motorisches Lernen genutzt werden. Gelernte Bewegungen beruhen oft auf vorhersagender Kontrolle (feedforward control). Ein prädiktives Modell sagt dabei die sensorischen Konsequenzen einer Handlung auf Basis des gegenwärtigen Systemzustands und der Efferenzkopie, das heißt, der Kopie der efferenten, motorischen Befehle, vorher (Wolpert et al., 2011). Insofern lässt sich hierbei die Analogie zur Open-loop Kontrolle ziehen, bei der - ohne Nutzung von Bewegungsfeedback - ein GMP (Schmidt, 1975) ausgewählt wird und dessen entsprechende Parameter so gesetzt werden, dass die gewünschten sensorischen Konsequenzen erreicht werden. Des Weiteren kann analog zur Closed-loop Kontrolle die Vorhersage der sensorischen Konsequenzen (vgl. Sollwert) mit dem tatsächlichen Feedback (vgl. Istwert) einer Handlung, das erst mit zeitlicher Verzögerung vorliegt, verglichen und zur Fehlerkontrolle genutzt werden. Bei Differenzen zwischen den erwarteten und den tatsächlichen sensorischen Konsequenzen können korrektive Handlungen, was einer reaktiven Kontrolle (reactive control) entspricht, eingeleitet werden. Durch die Vorhersage sensorischer Konsequenzen kann sich daher ein enger Zusammenhang von vorhersagender und reaktiver Kontrolle ergeben, der insbesondere im Lernverlauf bedeutsam ist (Wolpert et al., 2011).

Im folgenden Abschnitt soll ein weiterer wichtiger Aspekt schneller, gezielter Bewegungen erläutert werden, der Abgleich von Geschwindigkeit und Genauigkeit der Bewegung.

1.2.3 Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich bei Zielbewegungen

Der Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich (speed-accuracy trade-off) bedeutet, dass mit zunehmender Bewegungsgeschwindigkeit die Bewegungsgenauigkeit abnimmt. Der Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich ist damit allen Bewegungen inhärent, zeigt sich aber deutlich im Kontext von Zielbewegungen. Es wurden verschiedene theoretische Konzepte für den Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich aufgestellt, die im Folgenden beschrieben werden.

Fitts' Law

Fitts' Law (Fitts'sches Gesetz) besagt, dass ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Dauer einer Zielbewegung und der Schwierigkeit der entsprechenden Zielaufgabe besteht. Es geht zurück auf eine Studie von Fitts (1992), in der Probanden mit einem Stift alternierend auf zwei Zielflächen tippen mussten, wobei sowohl die Breite der Zielflächen als auch der Abstand zwischen den Zielflächen variiert wurden. In dieser Arbeit zeigte sich, dass die Bewegungszeit bei zunehmendem Abstand zwischen den Zielflächen und bei zunehmenden Genauigkeitsanforderungen, das heißt, bei Abnahme der Breite der Zielflächen, anstieg (Fitts, 1992).

⁴ Zusätzlich führen die Autoren die „biomechanical control“ (Wolpert et al., 2011, S. 740) auf: Die biomechanische Kontrollklasse beeinflusst die Bewegung durch die Veränderung biomechanischer Eigenschaften, wie beispielsweise der Steifheit der Hand (Wolpert et al., 2011).

Nach Fitts (1992) bestimmen sowohl die Zielbreite als auch der Abstand zwischen den Zielen den sogenannten Schwierigkeitsindex (index of difficulty; (*ID*); Formel (1)) einer Zielaufgabe. Der Schwierigkeitsindex ergibt sich dabei aus dem Logarithmus des Verhältnisses der doppelten Zielentfernung zur Zielbreite und wird in der Einheit [bits]⁵ angegeben. Die Schwierigkeit einer Zielbewegung steigt also mit zunehmender Zielentfernung und abnehmender Zielbreite an.

$$ID = \log_2 \frac{2A}{W} \quad (1)$$

Dieser Schwierigkeitsindex hängt wiederum linear mit der Bewegungszeit (movement time; (*MT*); Formel (2)) zusammen (Fitts, 1992). Y-Achsenabschnitt *a* und Steigung *b* sind empirisch ermittelte Konstanten. Abbildung 1-11 bietet eine schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem Schwierigkeitsindex einer Zielaufgabe und der Zeit der Zielbewegung.

$$MT = a + b (ID) = a + b \left[\log_2 \frac{2A}{W} \right] \quad (2)$$

Der Y-Achsenabschnitt des Modells gibt mathematisch die Bewegungszeit an, die bei einer Schwierigkeit von null auftritt. Er wird in der Literatur jedoch kontrovers diskutiert. Soukoreff und MacKenzie (2004) bieten dazu eine Übersicht: Teils wird er als Zeit für eine Bewegung mit null Distanz oder für wiederholtes Tippen auf einer Stelle betrachtet, teils als Schwellzeit, teils als Verzögerung des psychomotorischen Systems oder Reaktionszeit oder einfach als Modellfehler aufgefasst. Die Steigung des Modells spiegelt die Sensitivität der Bewegungszeit für Veränderungen des Schwierigkeitsindex wider. Sie ist sensitiv für einige Faktoren des Versuchssettings, für Eigenschaften der Probanden wie deren Alter (Ketcham & Stelmach, 2004) und für die Effizienz des Eingabegeräts (Sutter & Ziefle, 2004).

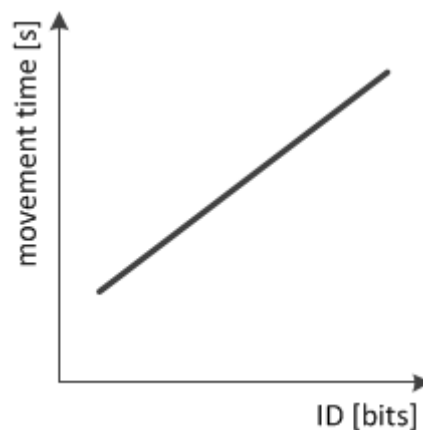


Abbildung 1-11: Schematische Darstellung von Fitts' Law nach Schmidt und Lee (2011)

Fitts' Law nimmt also eine lineare Beziehung zwischen Schwierigkeit und Bewegungszeit an und setzt die Bewegungszeit in Bezug zur Genauigkeit. Obwohl Fitts' Law für manuelle Zeigebewegungen aufgestellt wurde, lässt es sich auch auf andere schnelle Zielbewegungen, wie beispielsweise die Ein-

⁵ Bits (Binary digits) geben eine Informationsmenge an: Ein Bit ist die Menge an Information, die nötig ist, um die Unsicherheit um die Hälfte zu reduzieren (Schmidt & Lee, 2011).

gabe am Computer, übertragen (Soukoreff & MacKenzie, 2004). Fitts' Law bietet weiterhin die Möglichkeit, die Bedienbarkeit von Eingabegeräten zu beurteilen und zu vergleichen. Auf diesen Aspekt wird in Abschnitt 1.2.4 genauer eingegangen.

Linearer Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich

Schmidt, Zelaznik, Hawkins, Frank und Quinn Jr. (1979) untersuchten einzelne, schnelle Zielbewegungen. Anders als im Fitts' Versuch wurde die Soll-Bewegungszeit zum Ziel vorgegeben. Nach jedem Trial wurde die tatsächliche Bewegungszeit als Feedback rückgemeldet. Als Bewegungsziel wurde ein Punkt verwendet. Von den Probanden wurde Genauigkeit hinsichtlich Bewegungszeit (nur Aufgaben, die der geforderten Bewegungszeit $\pm 10\%$ entsprachen, wurden gewertet) und Amplitude gefordert. Die Bewegungsamplitude (10, 20, 30 cm) und die Bewegungszeit (140, 170, 200 ms) wurden in jeweils drei Stufen variiert. Als abhängige Variable wurde die effektive Zielbreite betrachtet.

$$W_e = a + b \left(\frac{A}{MT} \right) \quad (3)$$

Es zeigte sich ein linearer Zusammenhang zwischen effektiver Zielbreite und Geschwindigkeit (Formel (3); Schmidt et al., 1979): Die effektive Zielbreite steigt (sowohl in Bewegungsrichtung als auch in der Senkrechten zur Bewegungsrichtung), wenn bei gleichbleibender Bewegungszeit die Bewegungsamplitude zunimmt oder bei gleichbleibender Bewegungsamplitude die Bewegungszeit abnimmt - das heißt, wenn die Geschwindigkeit der Bewegung steigt. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit der Bewegung verringert damit ihre Genauigkeit (Abbildung 1-12).

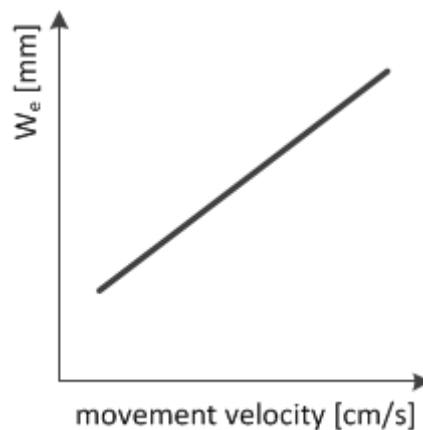


Abbildung 1-12: Schematische Darstellung von Schmidt's Law nach Schmidt et al. (1979)

Unterschiede der Ansätze

Schmidt et al. (1979) versuchen die Unterschiede zwischen dem linearen Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich und Fitts' Law folgendermaßen zu begründen:

- Der lineare Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich gilt insbesondere für sehr schnelle Bewegungen, die vorprogrammiert (vgl. Open-loop Steuerung) ohne Feedback-basierte Korrekturen ablaufen. Fitts' Law gilt dagegen für langsamere Bewegungen mit Feedback-basierter Korrektur (vgl. Closed-loop Steuerung).

- Die Untersuchungen unterscheiden sich im Ziel der Bewegungszeit. Bei Fitts (1992) sollten die Zielbewegungen schnellstmöglich ausgeführt werden, das heißt, die Bewegungszeit war eine abhängige Variable. Im Versuch von Schmidt et al. (1979) sollten kontrollierte Bewegungszeiten hergestellt werden, das heißt, die Bewegungszeit war als unabhängige Variable vorgegeben. Die Veränderung der Aufgabe verglichen zum Fitts' Paradigma hinsichtlich der konkreten Vorgabe einer Bewegungszeit könnte den linearen Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich hervorgerufen und eine Bewegung ohne Feedback-basierte Korrektur gefördert haben.

Ein Experiment von Carlton (1994) unterstützt diese Argumentation: In der Studie wurde die Bewegungszeit der Zielbewegung variiert, das heißt, es wurde entweder eine bestimmte (400 ms) oder die schnellstmögliche Bewegungszeit von den Probanden gefordert. Die räumliche Genauigkeit der Bewegungen und die Bewegungsamplitude waren in beiden Aufgaben ungefähr gleich. Gemessen wurden die Anzahl an Korrekturbewegungen und die Bewegungszeit. Bei einem konkreten Bewegungszeit-Ziel trat normalerweise nur eine Subbewegung auf, in der Aufgabe mit schnellstmöglicher Bewegung meist zwei Subbewegungen. Außerdem war beachtlich, dass in der Aufgabe mit einer konkreten Bewegungszeit diese ungefähr 90 ms größer war als bei der schnellstmöglichen Zielbewegung. Die Studie von Carlton (1994) spricht damit dafür, dass abhängig von der Aufgabeninstruktion (Vorgabe einer Zielbewegungszeit vs. schnellstmögliche Bewegung) unterschiedliche Prozesse der Bewegungskontrolle auftreten: Bei einer konkreten Zielbewegungszeit tritt nur eine Subbewegung auf. Es wird nicht korrigiert, was für eine Vorprogrammierung (vgl. Open-loop Kontrolle) der Bewegung spricht und in Zusammenhang mit dem linearen Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich steht. War das Ziel der Aufgabe, die Bewegung schnellstmöglich auszuführen (vgl. Paradigma von Fitts, 1992), traten meist zwei Subbewegungen auf (vgl. Closed-loop Kontrolle), das heißt, es wurde korrigiert (Carlton, 1994).

Daneben gibt es weitere Ansätze, die die Bewegungstrajektorie genauer betrachten und versuchen, den Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich über Korrekturprozesse und unterschiedliche Bewegungsphasen oder Subbewegungen tiefergehend zu erklären (beispielsweise Crossman & Goodeve, 1983; Meyer, Abrams, Kornblum, Wright, & Smith, 1988).

Fazit

Eine Bedienungsaufgabe über ein Touchpad in einem Menükontext entspricht eher der Fitts' Law Aufgabe, das heißt, dem schnellstmöglichen Bewegen, als einer vorgegebenen Zielbewegungszeit. Eine möglichst kurze Bediendauer ist gerade im Fahrzeugkontext wichtig, wobei die Wahl der tatsächlichen Bediendauer in den folgenden Studien den Probanden überlassen wird, um neben der möglichst schnellen und genauen Bedienung eine angemessene Leistung in der Fahraufgabe beizubehalten. In den hier durchgeführten Studien handelt es sich außerdem nicht um extrem schnelle Zielbewegungen (beispielsweise unter 100 ms). Es ist stets möglich Bewegungskorrekturen auszuführen, um eine ge-

naue Zielerreichung zu ermöglichen. Dementsprechend wird angenommen, dass der von Fitts (1992) beschriebene Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich für diese Situationen passend ist. Dieser ist außerdem sehr flexibel (auch für Eingabe am Computer anwendbar), weit verbreitet und oft bestätigt. Die genaue Bewegungstrajektorie kann in den folgenden Studien nicht gemessen werden, da dieser Aufwand den Rahmen der Arbeit sprengen würde. Daher ist eine Anwendung von Korrekturmodellen oder eine Betrachtung von Subbewegungen nicht möglich. Stattdessen wird die Zielbewegung anhand des klassischen Fitts' Law Modells modelliert.

1.2.4 Anwendung von Fitts' Law

Die DIN EN ISO 9241-9 (2002) bietet eine Anleitung zur korrekten Durchführung und Berechnung von Fitts' Law Aufgaben, um Effizienz und Effektivität von Eingabegeräten zu prüfen. Zum Vergleich der Eingabegeräte soll der sogenannte Durchsatz ermittelt werden. Dieser setzt den effektiven Schwierigkeitsgrad einer Aufgabe zur Bewegungszeit ins Verhältnis. Die Norm bietet außerdem eine Reihe von standardisierten Testaufgaben.

Soukoreff und MacKenzie (2004) empfehlen bei der Anwendung von Fitts' Law sieben Aspekte, die zu einer robusteren Modellanpassung führen und außerdem die Vergleichbarkeit zwischen den Studien erhöhen. Diese werden im Folgenden erläutert:

1. Zur Berechnung des Schwierigkeitsindex sollte die Shannon-Formel (Formel (4); MacKenzie, 1989; MacKenzie & Buxton, 1992) genutzt werden.

$$ID = \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \quad (4)$$

Die Shannon-Formel ist laut MacKenzie und Buxton (1992) zu bevorzugen, da sie normalerweise eine höhere Modellpassung erreicht, die Informationstheorie, auf der Fitts' Law basiert, besser widerspiegelt und die Möglichkeit, negative *ID*-Werte zu errechnen, vermeidet.

2. Es sollte eine große und repräsentative Reihe von *ID*-Werten getestet werden und Zielentfernungen und -größen entsprechend variiert werden.
Dies ist in den folgenden Studien aufgrund der im Fahrzeug begrenzten Anzeigefläche und der zur Bedienung nötigen und praktisch relevanten Tastengröße nur eingeschränkt möglich.
3. Fehlerraten und Endpunkte der Bewegung sollten aufgezeichnet werden.
4. Anhand der Endpunkt-Punktwolke sollte eine Anpassung der Genauigkeit vorgenommen werden. Es sollten die effektiv genutzte Zielbreite (W_e , Formel (5)) über die Standardabweichung der Endpunkte und die effektive Zielentfernung (D_e ; mittlere Bewegungsdistanz zwischen Start- und Endpunkten) berechnet werden.

$$W_e = 4.1136 \quad (5)$$

Diese sollten genutzt werden, um den effektiven Schwierigkeitsindex (ID_e ; Formel (6)) zu ermitteln.

$$ID_e = \log_2 \left(\frac{D_e}{W_e} + 1 \right) \quad (6)$$

Der nicht angepasste ID - Wert repräsentiert die eigentlich gestellte Aufgabe, der effektive Schwierigkeitsindex repräsentiert tatsächlich genutzte Zielbreiten und -entfernungen. Die Differenz zwischen beiden Werten sollte allerdings nicht zu groß werden.

5. Um die Parameter a und b zu bestimmen sollte eine lineare Regression nach der Methode der kleinsten Quadrate unter Verwendung von ID_e durchgeführt werden, wobei der Y-Achsenabschnitt a zwischen -200 ms und +400 ms liegen sollte. Werte außerhalb dieses Bereichs lassen auf methodische Probleme im Experiment schließen. Über die Varianzaufklärung durch die Regressionsgleichung kann außerdem die Modellpassung eingeschätzt werden.
6. Bewegungszeit-Vorhersagen (aus dem vorgegebenen ID -Wert) sollten auf die getesteten ID -Bedingungen begrenzt bleiben (keine Extrapolation).
7. Zum Vergleich mehrerer Experimentalbedingungen oder Eingabegeräte sollte der Durchsatz (Throughput (TP); Formel (7)); Einheit: bits pro Sekunde [bps]) berechnet werden. Wie bereits erwähnt, setzt dieser den effektiven Schwierigkeitsgrad einer Bewegungs-Aufgabe zur jeweiligen Bewegungszeit ins Verhältnis. Das Verhältnis wird pro Proband (Mittlerer TP eines Probanden über alle Bewegungs-Bedingungen; x stellt die Anzahl der Bewegungsbedingungen dar) gemittelt. Daraufhin werden diese TP -Werte über alle Probanden (y stellt die Anzahl der Probanden dar) gemittelt, um den generellen TP zu erhalten.

$$TP = \frac{1}{y} \sum_{i=1}^y \left(\frac{1}{x} \sum_{j=1}^x \frac{ID_{e_{ij}}}{MT_{ij}} \right) \quad (7)$$

Sowohl die DIN EN ISO 9241-9 (2002) als auch Soukoreff und MacKenzie (2004) empfehlen standardisierte Aufgaben, was eine bessere Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Studien ermöglicht. Im Hinblick auf die externe Validität wurden in dieser Arbeit allerdings praxisnähere Aufgaben, die im Fahrzeugsetting denkbar sind, verwendet.

1.2.5 Relevante Besonderheiten für die vorliegende Arbeit

Gewichtung von Zielgröße und -entfernung

Laut Fitts' Law hängt die Schwierigkeit, Ziele zu erreichen vom Verhältnis $\frac{D}{W}$ (vgl. Formel (4)) ab. Damit sind Zielentfernung und -breite gleich wichtig zur Ermittlung der Schwierigkeit einer Zielaufgabe. Fitts' Law postuliert damit außerdem Skalierungsinvarianz: Verschiedene Zielentfernungen können den gleichen Schwierigkeitsindex erzeugen, wenn das Verhältnis zur Zielbreite gleich bleibt,

also sie mit entsprechend angepassten Zielbreiten kombiniert werden. Eine doppelte Zielentfernung bei doppelter Zielbreite $\frac{2D}{2W}$ führt zum gleichen Verhältnis wie $\frac{D}{W}$.

Chapuis und Dragicevic (2011) konnten allerdings zeigen, dass sehr kleine Ziele zu überproportionalen Leistungseinbußen führen, das heißt, die Skalierungsinvarianz gilt nicht für sehr kleine Ziele. Es ist bei kleinen Zielen daher sinnvoller, die Zielbreite zu erhöhen als die Zielentfernung zu reduzieren. Der Nutzen von Fitts' Law für die Vorhersage der Bewegungszeit bei sehr kleinen Zielen ist damit begrenzt. Die Autoren untersuchten als mögliche Ursachen für diesen Effekt die motorische Genauigkeit, die Wahrnehmbarkeit kleiner Ziele und die Quantisierung. Quantisierung beinhaltet, dass bei sehr kleinen Zielen von wenigen Pixeln Breite der Mauscursor in Zielnähe springen kann, was möglicherweise Unsicherheit in der Bedienung erzeugt. Grund für den Effekt ist, dass die visuelle Bewegungsrückmeldung im Pixelbereich nicht kontinuierlich ist, sondern in diskreten Schritten (meist ein Pixel) erfolgt. Die Autoren konnten jedoch zeigen, dass die Gründe für den Effekt im visuellen und motorischen Bereich liegen, weshalb eine Vergrößerung der Ziele auf der visuellen oder motorischen Ebene sinnvoll scheint. Als problematische Größenschwelle für eine Computermaus identifizierten Chapuis und Dragicevic (2011) 1 - 4 mm auf der Anzeige (bei einer Distanz von 70 cm von Auge zu Anzeige) und 0.1 - 0.2 mm auf der motorischen Ebene.

Sutter und Ziefle (2004) konnten diesen Effekt auch für die Bedienelemente Trackpoint und Touchpad zeigen: Bewegungszeiten waren bei kleinen Zielen überproportional erhöht - besonders beim Trackpoint. Bei Zielen von 0.5 cm oder kleiner unterschätzt der errechnete *ID*-Wert damit die eigentliche Schwierigkeit (Sutter & Ziefle, 2004). Bewegungsziele sollten daher bei Touchpad- oder Trackpoint-Bedienung größer als 0.5 cm sein, was in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt wird.

Fitts' Law in Doppelaufgabensituationen

Fahren stellt durch die Parallelität mehrerer Aufgaben eine besondere Situation dar. Die Aufmerksamkeit muss auf verschiedene Bereiche wie die eigene Geschwindigkeit oder die Umgebung gelenkt, mehrere Bewegungen müssen koordiniert werden und es zeigen sich sowohl strukturelle als auch kapazitive Interferenzen (vgl. Abschnitt 1.1.4). Die Frage, ob Fitts' Law auch in Mehraufgabensituationen wie dem Fahren gilt, wurde bislang wenig untersucht.

Shehab und Schlegel (1993) untersuchten Fitts' Law in einem Fahrzeugsetting. Die Probanden sollten Zielbewegungen zu den Geräten in der Mittelkonsole ausführen. Variiert wurde der Schwierigkeitsindex der Zielaufgabe und der Aufgaben-Load, das bedeutet, die Zielaufgabe wurde entweder mit keiner, einer oder zwei weiteren Aufgaben kombiniert. Die beiden Zusatzaufgaben (Monitoring einer Anzeige, Tracking) sollten die Anforderungen des Fahrens abbilden. Die Doppelaufgabe Monitoring und Zielaufgabe führte in der Studie zu längeren Reaktionszeiten, die Doppelaufgabe Tracking und Zielaufgabe führte zu längeren Bewegungszeiten. Es zeigte sich außerdem, dass der Schwierigkeitsindex für alle drei Level des Aufgaben-Load einen signifikanten Effekt auf die Bewegungszeit hatte. Er

konnte in der Studie von Shehab und Schlegel (1993) zwischen 66 und 82 % der Varianz der Bewegungszeit aufklären (getrennte Regressionen für die verschiedenen Load-Level).

Auch Schedlbauer (2007) untersuchte Fitts' Law während einer Doppelaufgabe. Er testete, inwiefern Fitts' Law bei einer Touchscreen-Bedienung gilt, wenn die Bedienaufgabe mit einer Monitoring- und Entscheidungsaufgabe verknüpft wird. Die Probanden sollten einen sich verändernden Zahlenwert beobachten. Sobald dieser unter den Wert 10 sank, sollten sie eine Zielbewegung ausführen. Es zeigte sich, dass Bearbeitungszeit, Fehlerrate und räumliche Variabilität unter geteilter Aufmerksamkeit deutlich erhöht sind. Bei reiner Bedienaufgabe konnte 83% der Varianz der Bewegungszeit durch den Schwierigkeitsindex der Zielaufgabe erklärt werden, in der Doppelaufgabensituation noch 61%. In beiden Versuchsbedingungen zeigen sich damit relativ gute Varianzaufklärungen (was als gute Passung von Fitts' Law gewertet werden kann), wobei diese in der Doppelaufgabensituation etwas geringer war. Die Steigung der Fitts' Law Gleichung war in beiden Situationen vergleichbar, allerdings war der Y-Achsenabschnitt in der Doppelaufgabensituation deutlich erhöht. Schedlbauer (2007) nimmt an, dass dieser eine längere Phase der Bewegungsplanung repräsentiert und den auftretenden Unterschied in der Bearbeitungszeit bewirkt. Insgesamt vermutet Schedlbauer (2007) aufgrund der ähnlichen Steigung der Regressionsgeraden bei gleichzeitigem Unterschied im Y-Achsenabschnitt, dass die Doppelaufgabensituation additiv auf Fitts' Law wirkt.

Als Alternativerklärung für einen erhöhten Achsenabschnitt könnte man auch vermuten, dass dieser mit der Belastung durch die Doppelaufgabensituation und den dadurch reduzierten Ressourcen in Zusammenhang steht. Ein erhöhter Y-Achsenabschnitt muss daher - entgegen den Anwendungsempfehlungen für Fitts' Law von Soukoreff und MacKenzie (2004) (vgl. Abschnitt 1.2.4) - nicht unbedingt auf ein methodisches Problem im Experiment hinweisen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Fitts' Law auch in Doppelaufgabensituationen Gültigkeit zu haben scheint. Die Varianzaufklärung ist allerdings geringer als in einer Einfachaufgabensituation. Eine Begründung könnte in der durch die Doppelaufgabe erhöhten Varianz der Bewegungszeiten liegen.

Vorhersage der Bearbeitungszeit bei diskreten Eingaben

Fitts' Law (vgl. Abschnitt 1.2.3 und 1.2.4) wird auf kontinuierliche Zielbewegungen wie Greif- oder Zeigebewegungen angewendet und lässt sich damit auf eine Maus- und Touchscreenbedienung oder bestimmte Touchpadkonzepte übertragen. Für Eingabemethoden oder Cursor-Steuerungsarten, die auf diskreten Eingaben wie Tastendrücker oder einzelnen Gesten basieren, ist es nicht geeignet, unter anderem weil diesen eine diskrete Logik der Cursorsteuerung zugrunde liegt und Zielgröße und -entfernung weniger relevant sind. Stattdessen könnte man die diskrete Cursorsteuerung eher als Handlungssequenz mehrerer, sich teils wiederholender Einzelhandlungen (zum Beispiel Tastendrücker) verstehen, die den Cursor schrittweise zum Zielort bewegen.

Card, English und Burr (1978) stellten einen interessanten Ansatz vor, die Bearbeitungszeit bei derartigen, diskreten Eingabemethoden zu modellieren und damit vorherzusagen: In ihrer Untersuchung verglichen sie vier Eingabemethoden zur Text-Auswahl, zwei kontinuierliche (Maus und Joystick) und zwei tastenbasierte und damit diskrete Methoden (Pfeil- und Texttasten), bei denen der Cursor pro Tastendruck weiterbewegt wurde. Über die Pfeiltasten wurde der Bearbeitungscursor pro Tastendruck in die entsprechende Pfeil-Richtung weiterbewegt, über die Texttasten (Absatz, Zeile, Wort, Zeichen) wurde der Bearbeitungscursor je nach Tastendruck entsprechend einen Absatz, eine Zeile etc. weiterbewegt. Gemessen wurde die Zeit, bis ein Zieltext ausgewählt wurde.

Die kontinuierlichen Eingabemethoden wiesen in der Studie von Card et al. (1978) schnellere Bearbeitungszeiten auf als die tastenbasierten Methoden, wobei die Bewegungszeiten für die kontinuierlichen Eingabearten (Maus und Joystick) wie erwartet Fitts' Law folgten. Es zeigten sich 83% Varianzaufklärung durch das Fitts' Modell bei Mausbedienung und 89% Varianzaufklärung beim Joystick. Die Maus erwies sich insgesamt als bestes Eingabegerät. Es zeigten sich hierbei die kürzesten Bearbeitungszeiten und die wenigsten Fehler.

Da Fitts' Law für die Vorhersage der Bearbeitungszeit bei tastenbasierten Eingabemethoden nicht geeignet ist, versuchten Card et al. (1978) die Bearbeitungszeit bei den tastenbasierten Eingabemethoden über die minimal notwendige, also ideale Anzahl an Tastendrücken bis zur Zielerreichung zu erklären und vorherzusagen. Es zeigte sich, dass bei der tastenbasierten, diskreten Eingabe die Zeit der Positionierung des Cursors tatsächlich proportional zur idealen Anzahl an Tastendrücken war. Es konnten 84% bis 89% der Varianz der Positionierungszeit durch diesen Ansatz erklärt werden. Bei diskreten Eingabemethoden scheint eine Modellierung über die mindestens nötige Anzahl von Eingabeschritten bis zur Zielerreichung damit geeignet.

1.2.6 Beating Fitts' Law

Nach Fitts' Law kann die Zielerreichung durch die Stellgrößen Zielgröße und -entfernung erleichtert werden, indem größere oder nähere Ziele verwendet werden. In der physikalischen Welt lassen sich diese beiden Parameter allerdings nur selten beeinflussen. In der virtuellen Welt, das heißt, bei Steuerung eines Cursors zu Objekten auf einer Anzeige, gelten jedoch weniger Einschränkungen. Die eigentliche Größe und Positionierung ist zwar meistens durch Restriktionen auf der Anzeige oder inhaltliche Überlegungen festgelegt, es gibt aber Methoden, Zielgröße und -entfernung anzupassen, ohne das generelle grafische Layout zu verändern. Balakrishnan (2004) gibt einen Überblick über Techniken, die versuchen, Zeigebewegungen dementsprechend zu erleichtern und Fitts' Law zu umgehen beziehungsweise zu „schlagen“ (Beating Fitts' Law; Balakrishnan, 2004). Fitts' Law zu „schlagen“ bedeutet dabei, virtuelles Zeigen einfacher zu machen, als es in der realen Welt wäre, und dadurch eine höhere Performanz in der Bedienung (genauere und / oder schnellere Zielbewegung) zu erreichen, als Fitts' Law sie vorhersagen würde.

Dabei sind drei Hauptfaktoren zu beachten, deren Manipulation zum „Schlagen“ von Fitts‘ Law genutzt wird (Balakrishnan, 2004):

1. Motorische Ebene: Motorische Zielgrößen und -entfernungen,
2. Visuelle Ebene: Visuelle Zielgrößen und -entfernungen,
3. Transferfunktion zwischen Bedienelement und Anzeige (auf diesen Aspekt wird in Abschnitt 1.2.8 näher eingegangen).

Die Techniken, welche die Zielerreichung erleichtern sollen, lassen sich in drei grobe Kategorien einteilen, die an Fitts‘ Law (vgl. Shannon-Formel (4), Abschnitt 1.2.4) ansetzen: Techniken, welche die Zielentfernung (D) reduzieren, Techniken, welche die Zielbreite (W) erhöhen und Techniken, die D reduzieren und W erhöhen (Balakrishnan, 2004). Diese sollen im Folgenden an jeweils einem Beispiel dargestellt werden.

Techniken zur Reduktion von D

Eine Möglichkeit, die Bedienwege zu minimieren, besteht darin, zwischen Objekten Leerräume auf der motorischen Ebene zu entfernen. Die Ziele befinden sich damit auf der motorischen Ebene direkt nebeneinander ($D_{motorisch}$ wird verändert), wobei die Leerflächen auf der visuellen Ebene ($D_{visuell}$) konstant bleiben (Balakrishnan, 2004). Guiard, Blanch und Beaudouin-Lafon (2004) nennen diesen Ansatz „Object pointing“ (Guiard et al., 2004, S. 9; objektbasiertes Zeigen). Der Cursor wird nicht als Mittel zur Pixel-Auswahl, sondern zur Objekt-Auswahl betrachtet und springt jeweils in Bewegungsrichtung von Objekt zu Objekt (vgl. Abschnitt 1.1.6). Neben der Reduktion der Distanz zum Ziel zeigt sich ein weiterer Vorteil dieser Technik darin, dass das letzte Objekt in Bewegungsrichtung auch bei überschießenden Bewegungen erreicht wird. In der Evaluation zeigte sich, dass das objektbasierte Zeigen den größten Nutzen zeigt, je weniger dicht die Anzeige belegt und je weiter ein Ziel entfernt ist (Guiard et al., 2004). Neben dem begrenzten Nutzen auf dicht belegten Anzeigen oder wenn Ziele nebeneinander liegen, ist eine Anwendung der Technik nicht möglich, wenn kleine Pixelgruppen manipuliert werden sollen (Balakrishnan, 2004). Das Springen des Cursors kann laut Balakrishnan (2004) außerdem störend auf den Anwender wirken.

Techniken zur Erhöhung von W

Eine Methode, das Ziel künstlich zu vergrößern, liegt laut Balakrishnan (2004) in der Nutzung eines Flächencursors. Hierbei unterscheidet er zwischen Punktcursor und Flächencursor: Der Punktcursor repräsentiert einen genauen Punkt auf der Anzeige und ermöglicht damit eine präzise Steuerung. Der Flächencursor nimmt eine gewisse Fläche auf der Anzeige ein. Dadurch vergrößert er künstlich kleine Ziele - W entspricht nicht der Zielbreite sondern dem Cursordurchmesser. Dies kann die Zielerreichung erleichtern. Bei dicht belegten Anzeigen oder eng beieinanderliegenden Zielen ergibt sich dabei das Problem, einzelne Ziele auszuwählen (Balakrishnan, 2004). Zur Lösung dieses Problems werden dynamische Cursor vorgeschlagen wie der „Bubble Cursor“ (Grossman & Balakrishnan, 2005, S. 281)

oder der „DynaSpot“ (Chapuis, Labrune, & Pietriga, 2009, S. 1391). Beide dynamischen Cursor zeigen eine ähnliche und gegenüber einem Punktcursor deutlich erhöhte Bedienleistung (Chapuis et al., 2009; Grossman & Balakrishnan, 2005).

Techniken zur Reduktion von D und Erhöhung von W

Nach Balakrishnan (2004) basieren Techniken, die gleichzeitig Zielgröße und -entfernung manipulieren, auf einer dynamischen Änderung der Verstärkung (gain) von Bedienelement (control) zu Anzeige (display). Dieser Verstärkungsfaktor beschreibt das Übersetzungsverhältnis der eigenen Bewegung beziehungsweise der Bewegung des Bedienelements in die Bewegung des Cursors: Bei einer Verstärkung größer 1 führen kurze Bewegungen des Bedienelements zu großen Bewegungen des Cursors, bei einer Verstärkung von 1 entsprechen sich die Bewegungen in ihrer Weite, bei Verstärkungen kleiner 1 führen große Bewegungen des Bedienelements zu kurzen Cursorbewegungen. Bei der Festlegung eines Verstärkungsfaktors beschreibt Balakrishnan (2004) den Konflikt zwischen der Nutzung einer großen Verstärkung für eine schnelle Grobpositionierung des Cursors, wodurch bei Bedienelementen wie dem Touchpad ein flächenmäßig kleineres Gerät ermöglicht wird, und einer kleinen Verstärkung zur Ermöglichung der Feinpositionierung des Cursors. Um diesen Konflikt zu lösen, werden teils variable Verstärkungen eingesetzt.

Eine Möglichkeit stellt das „semantic pointing“ (Blanch, Guiard, & Beaudouin-Lafon, 2004, S. 519; semantisches Zeigen) dar. Dieses beinhaltet basierend auf Veränderungen des Verstärkungsfaktors verschiedene Zuordnungen von Anzeige zu Bedienelement abhängig von der Wichtigkeit bestimmter Bedienfelder. Die Zielgrößen auf der visuellen und motorischen Ebene werden daher entkoppelt: Die Wichtigkeit des Ziels, beispielsweise die Nutzungshäufigkeit einer Bedienoption, spiegelt die Größe auf der motorischen Ebene wider, der Informationsgehalt, beispielsweise die Wortlänge der Bedienoption, die Größe auf der visuellen Ebene. Bei Entkopplung der Größen stellt sich die Frage, worauf die Ermittlung des Fitts'schen Schwierigkeitsindex beruht und wie die Bewegungszeit am besten vorhergesagt werden kann (Blanch et al., 2004). Die Autoren konnten zeigen, dass die Leistung der Zeigeaufgabe von der Schwierigkeit auf der motorischen Ebene abhängig war.

Fazit

Aufgrund der Häufigkeit von Bildschirmtätigkeiten und Bedienung unter indirekter Sicht in der heutigen Zeit ist eine Beschäftigung mit der Frage, wie Bedienhandlungen erleichtert werden können, sehr relevant. Die meisten der Techniken zeigen allerdings Schwierigkeiten in der Anwendung auf dicht belegten Anzeigeflächen (Balakrishnan, 2004). Beispielsweise führt die Anwendung des „Object pointing“ (Guiard et al., 2004, S. 9) nur zu geringer Distanzreduktion auf dicht belegten Anzeigeflächen. Ein weiteres Problem liegt in der Übertragbarkeit auf verschiedene Bedienelemente. Im Fahrzeugsetting kommen andere Bedienelemente zur Anwendung und die eingebauten Anzeigen sind aufgrund ihrer geringeren Größe oft auch dichter belegt als im Bürobereich. Die Übertragbarkeit derartiger Me-

thoden ist daher nur eingeschränkt gültig und die Wirksamkeit sollte in dem jeweils zu verwendenden Setting geprüft werden.

1.2.7 Feedback zur Erleichterung der Zielerreichung

Eine weitere Möglichkeit, die Zielerreichung zu erleichtern, ist die Verwendung verschiedener Arten von Bedienrückmeldungen.

Akamatsu, MacKenzie und Hasbroucq (1995) untersuchten fünf Feedbackbedingungen bei einer multimodalen Mausbedienung: gewöhnlich (kein Zusatz-Feedback), akustisch (Ton bei Zielerreichung), farblich visuell (Farbänderung des Ziels bei Zielerreichung), taktil (Druck eines Pins von unten auf den Finger bei Zielerreichung) und eine Kombination der Feedbackarten. In den Reaktionszeiten der Probanden oder dem Durchsatz der Bedienung zeigten sich keine Unterschiede zwischen den Bedingungen. Als Begründung geben die Autoren an, dass das Feedback jeweils erst am Ende der Zielbewegung aktiv wurde. In der Zeit der finalen Positionierung, das heißt, die Zeit zwischen Zielerreichung und -bestätigung, ließen sich allerdings Unterschiede feststellen: Die Probanden bestätigten das Ziel in der Bedingung mit taktilem Feedback und bei kombiniertem Feedback am schnellsten, bei farbllichem oder akustischem Feedback etwas weniger schnell, aber immer noch schneller als bei keinem Zusatz-Feedback. Die Probanden scheinen daher in den Bedingungen mit zusätzlichem Feedback die Größe des Ziels besser auszunutzen als in der gewöhnlichen Bedienung, was sich auch in den effektiv genutzten Zielbreiten (vgl. Abschnitt 1.2.4, Punkt 4) zeigt. Diese sind bei gewöhnlichem Feedback am kleinsten (Akamatsu et al., 1995).

Feedback ermöglicht damit die schnellere Identifikation, ob ein Ziel erreicht wurde. Akamatsu et al. (1995) betrachteten allerdings nur Aufgaben mit jeweils einem einzigen Ziel auf der Anzeige. In Aufgaben mit mehreren möglichen Zielen wird häufiger das Erreichen von Tasten rückgemeldet, was die eigentliche Zielaufgabe stören könnte. Die Wirksamkeit von Feedback auf dicht belegten Anzeigeflächen ist daher möglicherweise reduziert.

Cockburn und Brewster (2005) verglichen drei Feedbackarten bei Mausbedienung: akustisch, taktil und pseudohaptisch⁶. Bei einer Anzeige mit einzeln angeordneten Zielen führt Feedback zu schnellerer Bedienung, wobei sich die Kombination aus taktilem und pseudohaptischem Feedback als am schnellsten erweist. Auf einer realistischen, dichter belegten Menüanzeige führt Feedback - mit Ausnahme von rein taktilem Feedback - zu längeren Auswahlzeiten und scheint den Nutzer eher abzulenken (Cockburn & Brewster, 2005).

Die Verwendung von Feedback sollte daher sehr differenziert betrachtet werden und die Wirksamkeit für verschiedene, realistische Menükonfigurationen nachgewiesen werden. Ähnlich zu den Methoden,

⁶ Pseudohaptisches Feedback: Über Veränderungen des Verstärkungsfaktors fühlten sich die Ziele „klebrig“ an, sobald der Cursor darauf positioniert wurde.

die Zielerreichung durch Manipulation von D und W zu erleichtern, könnte verstärktes Feedback auf Anzeigen mit vielen möglichen Zielen eher stören.

1.2.8 Sensomotorische Transformationen

Werkzeuggebrauch als Transformation

Wie in einer Übersicht von Heuer (1983) dargestellt, erleichtern Werkzeuge lästige, körperlich anstrengende oder schwierige Arbeit. Durch einen Hammer muss ein Handwerker beispielsweise weniger Kraft aufwenden, um einen Nagel in die Wand zu schlagen. Werkzeuggebrauch bringt dabei allerdings die Schwierigkeit mit sich, dass ein Objekt nicht mehr direkt mit der Hand oder einem anderen Körperteil manipuliert wird, sondern indirekt über das Werkzeug. Unter einem Werkzeug ist im Folgenden nicht nur ein handwerkliches Werkzeug zu verstehen, sondern der Begriff Werkzeug soll jede Erweiterung des menschlichen Körpers, beispielsweise durch einen Stift, eine Computermaus oder ein Fahrzeug, beinhalten (vgl. Heuer, 1983). Da ein Zielobjekt nicht direkt manipuliert wird, beispielsweise der Mauszeiger auf der Anzeige des PCs über die Computermaus, muss die eigene Bewegung in die Bewegung des Werkzeugs übersetzt werden. Zum Benutzen eines vorher unbekanntes Werkzeuges muss sich das Individuum daher an eine neue sensomotorische Transformation anpassen. Unter einer sensomotorischen Werkzeug-Transformation ist nach Heuer (1983) die Transformation der Bewegung des eigenen Körpers oder Körperteils in die Werkzeug-Bewegung zu verstehen, das heißt, sie beschreibt die Beziehung zwischen der Körperbewegung zur Bewegung des Werkzeugs, mit dessen Hilfe das Zielobjekt manipuliert wird. Es kann sich bei einer Werkzeugtransformation allerdings ebenfalls um eine Transformation der Körperkraft in die Werkzeugkraft handeln (beispielsweise bei einer Kneifzange). Die Verwendung des Begriffs sensomotorisch betont dabei die enge Verbindung von Sensorik und Motorik (vgl. Abschnitt 1.2.1, Sensomotorischer Ansatz der Bewegungssteuerung) - sowohl die körperlichen, proximalen Effekte als auch die Werkzeugbewegung werden über das sensorische System ermittelt und beeinflussen die entsprechende motorische Reaktion (Heuer, 1983).

Für die Nutzung von Werkzeugen müssen körperbezogene Bewegungen mit distalen Werkzeugbewegungen koordiniert werden, was eine gewisse kognitive Leistungsfähigkeit und motorische Geschicklichkeit erfordert (Müsseler & Sutter, 2012).

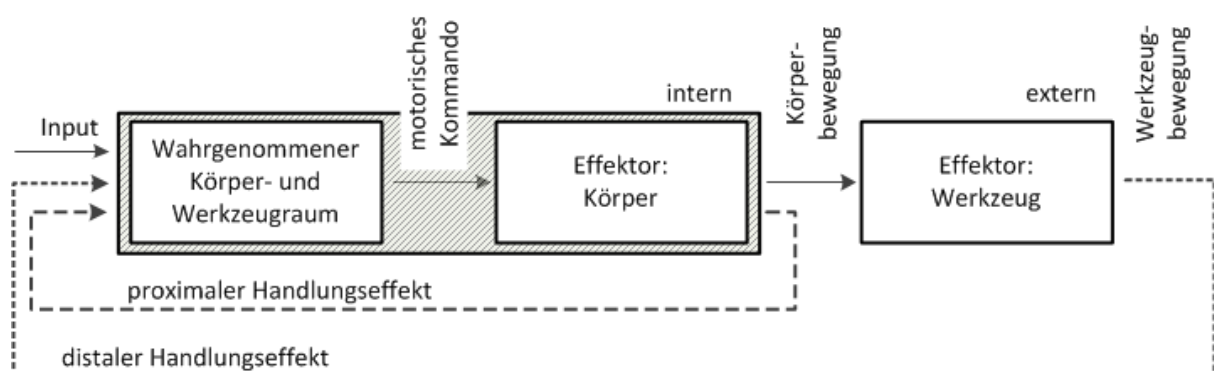


Abbildung 1-13: Regelkreise beim Werkzeuggebrauch nach Müsseler und Sutter (2012)

Diese Koordination erfolgt nach Müsseler und Sutter (2012) in zwei Regelkreisen (Abbildung 1-13): Einerseits müssen proximale Handlungseffekte verarbeitet werden, das heißt, propriozeptive, taktile und haptische Informationen über die Effektoren wie beispielsweise die Hand. Dieser Regelkreis ist auch bei einfachen Bewegungen ohne Werkzeug vorhanden. Bei Werkzeuggebrauch müssen zusätzlich in einem zweiten Regelkreis distale Handlungseffekte, zum Beispiel die Bewegung des Hammerkopfes, geregelt werden. Informationen über distale Handlungseffekte werden meist visuell wahrgenommen. Neben dem Koordinationsproblem ergibt sich dadurch die Schwierigkeit, die verschiedenen Informationsmodalitäten (propriozeptiv, haptisch, taktil, visuell) zu integrieren. Fallen proximale und distale Effekte zusammen wie beispielsweise bei direkten Eingabegeräten (Touchscreen), fallen der zweite Regelkreis und das Koordinationsproblem weg. Bei einem Zusammenfall der Effekte handelt es sich aber im engeren Sinn nicht um Werkzeuggebrauch (Müsseler & Sutter, 2012).

Da bei Werkzeugkontrolle zwei Feedbackquellen zur Verfügung stehen (proximales und distales Feedback), stellt sich die Frage, welche Feedbackquelle zur Bewegungssteuerung entscheidend ist, also es wichtiger ist, die eigene Hand zu überwachen oder beispielsweise die Cursorbewegung auf der Anzeige (Sutter, Sülzenbrück, Rieger, & Müsseler, 2013). Sutter et al. (2013) vermuten dabei, dass zur Bewegungssteuerung nicht beide Feedbackquellen in gleichem Maße beachtet werden, da die Bewegungsausführung im Fall von Diskrepanzen zwischen den Feedbackquellen häufig gestört werden würde.

Sutter, Müsseler und Bardos (2011a) untersuchten diese Frage, indem über Änderungen des Verstärkungsfaktors, der Zielamplitude und der Zielgröße Änderungen auf der motorischen oder visuellen Ebene ausgelöst wurden. In zwei Experimenten wurde dies für ein Touchpad, einen Mini-Joystick und ein Grafiktablett betrachtet. Sie konnten eine Dominanz des distalen Handlungseffekts für die Handlungskontrolle zeigen: Die Bewegungszeiten folgten dem wahrgenommenen Schwierigkeitsindex auf der Anzeige (visuelle Ebene), auch wenn die Amplitude auf der motorischen Ebene konstant gehalten wurde (Sutter et al., 2011a).

Blanch et al. (2004) beschrieben allerdings gegenteilige Effekte. Sie entkoppelten die Zielgröße auf der visuellen und motorischen Ebene über Änderungen des Verstärkungsfaktors und konnten in ihrer Studie zeigen, dass die Leistung der Zeigeaufgabe von der Schwierigkeit auf der motorischen Ebene abhängig war (vgl. Abschnitt 1.2.6).

Sutter et al. (2013) fassen mehrere Studien, die diesen Aspekt untersuchen, zusammen und kommen zu dem Ergebnis, dass generell eher eine Dominanz des distalen Handlungseffektes für die Bewegungssteuerung vorliegt. Das Bewusstsein des Nutzers für die eigenen proximalen Handlungen ist relativ gering, was die flexible Anpassung an sensomotorische Transformationen erleichtert. In manchen Fällen lässt sich nach Sutter et al. (2013) allerdings eine Dominanz der proximalen Handlungseffekte feststellen: Erstens wird bei besonders komplexen Transformationen teilweise proximales Feedback zur Bewegungssteuerung genutzt. Zweitens zeigt sich eine Dominanz proximaler Effekte, wenn

die Transformation offensichtlich ist, also wenn visuelles und propriozeptives Feedback nur in sehr geringem Ausmaß übereinstimmen. Es hängt damit von der Transformation an sich und vom Wissen des Nutzers über die Transformation ab, welche Feedbackquelle zur Bewegungssteuerung entscheidend ist.

Aspekte von Transformationen

Generell lassen sich nach Heuer (1983) verschiedene Aspekte einer Transformation (Bahntransformationen und raum-zeitliche Transformationen) differenzieren, wobei eine Transformation stets beide Aspekte beinhaltet: Unter Bahntransformation versteht er die Verschiebung der Bewegungsbahn oder Änderung ihrer Form (Abbildung 1-14). Dabei stellt eine rein räumliche Verschiebung eine sehr einfache Bahntransformation dar. Eine Drehung der Bewegungsbahn führt zu einer gesteigerten Schwierigkeit der Transformation. Unterschiede in der Form der Bewegungsbahn zwischen Körper- und Werkzeugbewegung erzeugen die schwierigsten Transformationen (Heuer, 1983).

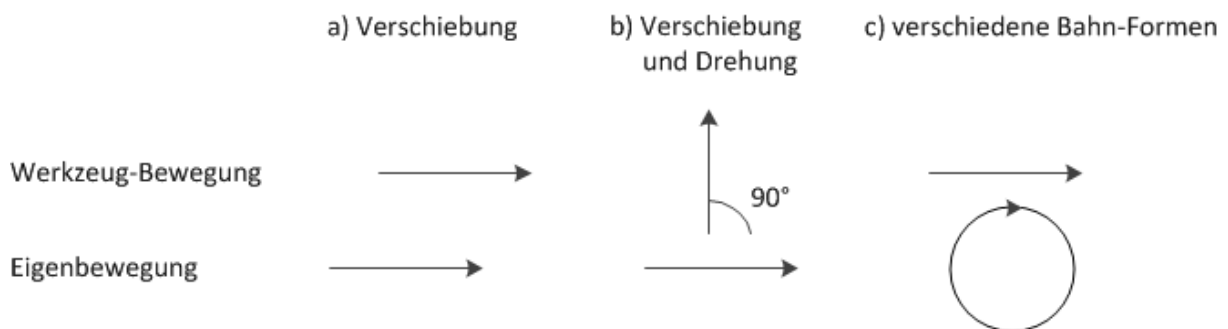


Abbildung 1-14: Bahntransformationen nach Heuer (1983)

Die raum-zeitliche Transformation (Formel (8)) kennzeichnet nach Heuer (1983) die Beziehung der Handposition auf der einen Bahn und der Werkzeugposition auf der anderen Bahn, wobei $e(t)$ die Eingangsgröße und $a(t)$ die Ausgangsgröße beschreibt. Es wird nur die Relation der Positionen auf den Bahnen betrachtet, nicht die Art der Bewegungsbahnen. Bei Bedienelementen finden sich verschiedene raum-zeitliche Transformationen.

$$a(t) = f(e(t)) \quad (8)$$

Eine einfache raum-zeitliche Transformation stellt die Proportionaltransformation (Formel (9)); Heuer, 1983) dar: Die Eingangsgröße ($e(t)$) wird dabei mit einem bestimmten Verstärkungsfaktor k multipliziert, das heißt, jedem Eingangswert ist eindeutig ein Ausgangswert zugeordnet. Die Körperbewegung wird lediglich um einen Faktor verstärkt.

$$a(t) = k * e(t) \quad (9)$$

Der Verstärkungsfaktor k einer Proportionaltransformation findet sich in der Literatur häufig, vor allem im Kontext von Bedienelementen, unter dem Begriff control-display gain, also der Verstärkung von Bedienelement zu Anzeige. Wie in Abschnitt 1.2.6, Techniken zur Reduktion von D und Erhöhung von W, erläutert, entsteht bei der Festlegung eines Verstärkungsfaktors ein Zielkonflikt zwischen der Nutzung eines großen Verstärkungsfaktors für eine schnelle Grobpositionierung des Cursors und

eines kleinen Verstärkungsfaktors zur Ermöglichung der Feinpositionierung (Balakrishnan, 2004). Der Einsatz variabler Verstärkungsfaktoren, beispielsweise abhängig von der Fingergeschwindigkeit, soll dieses Problem lösen, erzeugt allerdings eine komplexere Transformation als die einfachere Proportionaltransformation.

Die verschiedenen Werkzeugtransformationen werden teils auch in Systeme nullter, erster und zweiter Ordnung eingeteilt (für eine Übersicht siehe Proctor & van Zandt, 2008 oder Wickens et al., 2013): Die Kontrollordnung beschreibt die Art, in der das System auf eine direkte Positionsänderung des Bedienelements reagiert. Je niedriger die Ordnung, desto einfacher ist die Benutzung.

- Nullte Ordnung: Position des Bedienelements determiniert die Position des Cursors; direkte Beziehung zwischen Deplatzierung von Bedienelement und Position auf der Anzeige
- Erste Ordnung: Position des Bedienelements determiniert die Geschwindigkeit des Cursors, das heißt, eine bestimmte Position des Bedienelements hält die Geschwindigkeit des Cursors konstant
- Zweite Ordnung: Position des Bedienelements determiniert die Beschleunigung des Cursors, das heißt, eine bestimmte Position des Bedienelements hält die Beschleunigung des Cursors konstant

Lernen von Transformationen

Das Erlernen einer Transformation kann laut Heuer und Hegele (2006) folgende Prozesse beinhalten, von denen die Closed-loop und die Open-loop Kontrolle bereits in Abschnitt 1.2.2 vorgestellt wurden:

- Optimierung von Closed-loop Kontrolle durch verbesserte visuelle Regelung: Im Soll-Ist-Vergleich werden Abweichungen von der Soll-Bewegungsbahn kontinuierlich ausgeglichen ohne eine vollständige Repräsentation der Transformation
- Erwerb und zunehmende Genauigkeit eines inneren Modells für Open-loop Kontrolle
- Strategische Anpassungen basierend auf explizitem Wissen

Voraussetzung dafür, dass sensomotorische Transformationen gelernt werden, ist nach Heuer (2010), dass zu Beginn sowohl die Stellgröße und die Regelgröße registriert werden. Je genauer ein inneres Modell erworben wurde, desto unwichtiger wird Feedback für die Bewegungssteuerung. Zu Beginn liegt also eine Closed-loop Steuerung vor, nach Modellerwerb der Transformation kann die Bewegung Open-loop gesteuert werden. Als zusätzlicher Prozess sind explizite, strategische Änderungen der Bewegung möglich, wenn der Nutzer die Transformation kennt (Heuer & Hegele, 2006).

Schwierigkeit und Erlernbarkeit von Transformationen

Abhängig von der Transformation ergeben sich Unterschiede in ihrer Schwierigkeit und ihrer Erlernbarkeit. Nach Heuer (1983) sind Bahntransformationen leichter zu lernen, je ähnlicher sich die beiden Bewegungsbahnen sind, das heißt, jede Abweichung von der Parallelität der Bewegungsbahnen führt

zu Leistungseinbußen. Bei Bahntransformationen tritt außerdem das Problem der Richtungs-Kompatibilität auf (vgl. dazu auch Abschnitt 1.1.5): Bei parallelen Bahnen ist die Zuordnung dann optimal, wenn die Körperbewegung in eine Werkzeugbewegung in gleicher Richtung übersetzt wird. Bei der Übersetzung einer kreisförmigen in eine gerade Bahn ist eine Rechtsdrehung, das heißt, eine Bewegung im Uhrzeigersinn, mit einer Rechts-Bewegung kompatibel und damit einfacher zu erlernen (Heuer, 1983). Weitere Kompatibilitäts-Effekte wurden bereits in Abschnitt 1.1.5 beschrieben.

Weiterhin bieten Müsseler und Sutter (2012) einen Überblick über Faktoren, welche die Schwierigkeit und Erlernbarkeit von Transformationen beeinflussen: So werden beispielsweise Verstärkungen einfacher gelernt als komplexere Transformationen. Transformationen mit mittlerem Verstärkungsfaktor sind außerdem einfacher als Transformationen mit sehr großer oder kleiner Verstärkung (vgl. Casiez, Vogel, Balakrishnan, & Cockburn, 2008). Daneben sind isometrische Transformationen, bei denen Kraft in Bewegung umgesetzt wird, schwieriger als solche, bei denen die Bewegung des Fingers oder der Hand in Werkzeugbewegungen übersetzt wird (vgl. Armbrüster, Sutter, & Ziefle, 2007; Sutter, 2006; Sutter & Ziefle, 2006). Besonders schwierig sind außerdem inverse Transformationen, bei denen Hand- und Werkzeugrichtung entgegengesetzt verlaufen (Müsseler & Sutter, 2012). Weiterhin wird die Schwierigkeit der Transformation bei Ausführung unter indirekter Sicht erhöht, besonders wenn perspektivische Verzerrungen zwischen der eigenen Bewegung und dem Bildschirm vorhanden sind (Müsseler & Sutter, 2012).

Bedienung als Transformation

In modernen Arbeitsumgebungen wie am PC finden sich häufig Bewegungen unter indirekter Sicht durch eine räumliche Trennung von Bewegungsausführung und -beobachtung (Heuer & Hegele, 2006). So wird beispielsweise über eine Maus die Handbewegung in eine sichtbare Cursorbewegung übersetzt. Auch beim Touchpad, das eine Trennung von Bedienung und Anzeige ermöglicht, ist eine ähnliche Transformation zu beobachten.

Fast jede Art von Bedienung stellt eine Transformation dar: Bei der Bedienung eines Menüsystems werden meist über Finger- oder Handbewegungen Cursorbewegungen erzeugt. Der Cursor wird auf Zielobjekten positioniert, die dann ausgewählt werden. Ausnahmen stellen nur direkte Eingabegeräte, wie ein Touchscreen, ein Stift oder Laserpointer, dar, bei denen keine Cursorsteuerung und damit keine Koordination von proximalen und distalen Bewegungen erforderlich sind (Müsseler & Sutter, 2012). Im engeren Sinne handelt es sich nach Müsseler und Sutter (2012) damit nicht um Werkzeuggebrauch. Zu Klassifikationszwecken lässt sich allerdings festhalten, dass es sich dabei um sehr einfache räumliche Transformationen handelt (Sutter, 2007).

Sutter (2007) stellt eine Übersicht über die verschiedenen räumlichen Transformationsarten bei verschiedenen Bedienelementen und ihre Schwierigkeit zusammen. Beispiele für Bedienelemente der einzelnen Transformationsarten finden sich in Tabelle 1-1. Es lassen sich Bedienelemente mit sehr einfacher, einfacher und schwieriger Transformation finden:

- Sehr einfach: Keine räumliche Verschiebung zwischen distalen und proximalen Effekten; manueller Bewegungspfad führt direkt zu einer Eingabe.
- Einfach: Manueller Bewegungspfad und Bewegungspfad des Werkzeugs sind sich ähnlich, aber mit einer räumlichen Verschiebung zwischen den Pfaden. Das häufigste Beispiel stellen die Transformationen dar, in denen Körperbewegung und deren Anzeige räumlich getrennt sind.
- Schwierig: Je unähnlicher der Pfad von Hand- und Werkzeugbewegung, umso schwieriger ist eine Transformation.

Tabelle 1-1: Klassifikation von Bedienelementen hinsichtlich Schwierigkeit der räumlichen Transformation nach Sutter (2007)

Bedienelement	Typ der räumlichen Transformation		Schwierigkeit
	Räumlicher Pfad Nutzer vs. Cursor	Räumliche Verschiebung	
Touchscreen	Identisch	Nein	Sehr einfach
Stift	Identisch	Nein	Sehr einfach
Maus	Identisch	Ja	einfach
Touchpad	Identisch	Ja	einfach
Joystick	Kraft vs. Geschwindigkeit	Ja	schwierig
Trackball	Rotation vs. Richtung	Ja	schwierig

Die Transformation beim Touchpad lässt sich laut Sutter (2007) als einfach klassifizieren, da sich manueller Pfad und Cursorpfad ähnlich sind, wenn auch räumlich verschoben (vgl. Bahntransformation). Die Maus stellt ein anderes Bedienelement mit einfacher Transformation dar. Der Joystick übersetzt Kraft in Geschwindigkeit, der Trackball Rotationen in Richtung. Aufgrund der fehlenden Ähnlichkeit der Pfade lässt sich deren Transformation als schwierig einstufen (Sutter, 2007).

Touchpadbedienung im Kontext sensomotorischer Transformationen

Generell handelt es sich beim Touchpad um ein sehr flexibles Bedienelement, so dass mehrere Transformationen möglich sind.

Wie in Abschnitt 1.1.6 (Bedienkonzepte in Touchpad-Bedienungsumgebungen) beschrieben, sind relative und absolute Bedienkonzepte denkbar. Letztere lassen sich vom Touchscreen ableiten und sind direkter als relative Konzepte.

In beiden Konzepten liegt als Bahntransformation eine Verschiebung der Bewegungsbahn vor, da die Cursorbewegung räumlich getrennt zur Fingerbewegung dargestellt wird. Bei absoluten Konzepten ist die Verschiebung vorhersagbar, da der Cursor jeweils analog zur Fingerposition angezeigt wird. Bei relativen Konzepten kommt zur Verschiebung aufgrund der räumlichen Trennung von Bedienung und Anzeige eine mögliche Verschiebung der Cursorposition auf der Anzeige hinzu. Der Cursor kann unabhängig von der Fingerposition räumlich auf der Anzeige angeordnet sein.

In relativen Bedienkonzepten sind weiterhin verschiedene - und sogar variable -Verstärkungsfaktoren möglich, so dass Bewegungen verstärkt oder verfeinert werden können. Es ist außerdem möglich, die

Fingerbewegung als diskrete oder wegabhängige Geste zu interpretieren. Bei absoluten Bedienkonzepten entsprechen sich Cursorbewegung und Fingerbewegung, falls das Touchpad und die Anzeige die gleichen Abmessungen haben. Stimmen die beiden in ihrer Größe nicht überein, liegt ebenfalls eine Verstärkung vor, die allerdings konstant ist. Je ähnlicher sich die beiden Größen sind, desto näher liegt der Verstärkungsfaktor an 1.

Gerade im Fahrzeug ist eine einfache Bedienung besonders wichtig, um die Ablenkung des Fahrers zu minimieren. Besonders durch die räumliche Trennung von Bedienung und Anzeige und die dadurch entstehende indirekte Sicht sollte die Transformation möglichst einfach gestaltet werden. Bei Touchpadbedienung wird die Schwierigkeit außerdem etwas erhöht, da die räumliche Orientierung von Bedienelement und Anzeige nicht direkt übereinstimmen (Sutter, 2007).

Zusammenfassend lassen sich sowohl absolute als auch relative Touchpadbedienkonzepte als einfache Transformationen beschreiben, da nur eine Verschiebung der Bewegungsbahn und eine Verstärkung der Fingerbewegung genutzt werden. Absolute Touchpadbedienkonzepte scheinen allerdings etwas einfacher, da die Verschiebung vorhersagbar ist. Bei einem ähnlichen Größenverhältnis von Touchpad zu Anzeige ist die Verstärkung außerdem gering und bleibt konstant, so dass im Hinblick auf die Schwierigkeit der Transformation absolute Konzepte vorteilhaft scheinen.

Einfluss von unerwarteten Wechseln auf die sensomotorische Transformation

Die Flexibilität von Touchpadbedienung ermöglicht nicht nur die erläuterten, unterschiedlichen Konzepte, sondern auch die Nutzung eines gemischten Bedienkonzepts mit einer jeweils angepassten, sensomotorischen Transformation. Ein derartiges Konzept bietet den Vorteil, dass es jeweils auf die aktuelle Aufgabe optimiert werden kann, falls beispielsweise für die Bedienung einer Karte eine andere Transformation geeignet ist als bei Menübedienung. Dadurch stellt sich die Frage, in welchem Maß dies in der Konzeption von Menü und Bedienung genutzt werden kann und inwieweit kognitive Flexibilität eine Rolle spielt.

Kognitive Flexibilität wird häufig im Aufgabenwechselparadigma untersucht. Grundlage dieses Paradigmas ist, dass Aufgaben mental repräsentiert werden (in einem Aufgaben-Set) und Änderungen der Parameter der Aufgabe zu einer verlangsamten Ausführung führen, da die Repräsentation beziehungsweise das mentale Set angepasst werden muss (Meiran, 2010). Das Aufgaben-Set beinhaltet dabei jeweils die Repräsentation aufgabenrelevanter Reize, Reaktionen und die entsprechenden Reiz-Reaktions-Verbindungen (Kiesel et al., 2010).

Zu beachten ist, dass die Leistung beim Aufgabenwechsel von Aufgabeneigenschaften wie beispielsweise der geforderten Reaktion, von der Anzahl an Bearbeitungsschritten der Aufgabe und von Art und Zeitpunkt der Aufgabeninstruktion abhängt. Wie außerdem in der Übersicht von Meiran (2010) dargestellt, lassen sich Prozesse, die den Aufgabenwechsel erschweren, von erleichternden Prozessen unterscheiden: Die Trägheit des zuerst aktivierten Aufgaben-Sets (Übertragung der Aktivierung von Aufgabe A auf Aufgabe B), retroaktive Anpassungen (das kognitive System optimiert sich auf die

Ausführung einer Aufgabe A, wodurch die Ausführung der folgenden Aufgabe B behindert wird) und die Kopplung eines Reizes mit einer Aufgabe zählen zu den erschwerenden Prozessen. Vorbereitung dagegen reduziert die durch den Wechsel entstehenden Leistungseinbußen.

In einer Aufgabenwechselsituation lassen sich Wechselkosten im engeren Sinne (switch costs) und Mischkosten (mixed costs) unterscheiden (für eine Übersicht siehe Kiesel et al., 2010 oder Monsell, 2003): Mischkosten sind relativ globale Kosten und entstehen dadurch, dass in einem Aufgaben-Block Wechsel auftreten können. Sie werden aus dem Vergleich identischer Aufgaben ermittelt, die sich nur darin unterscheiden, dass sie im einen Fall in einem reinen Block, im anderen Fall in einem gemischten Block ausgeführt werden. Wechselkosten (im engeren Sinne) werden ermittelt, indem die Leistung in einer Aufgabe nach einem Wechsel mit der Leistung in einer Aufgabe, die wiederholt wird, verglichen wird.

Die Leistung beim Aufgabenwechsel wird typischerweise an Vorlese-, Benennungs-, Kategorisierungs- oder Reaktionsaufgaben untersucht (Kiesel et al., 2010). Der Einfluss von Wechseln der sensomotorischen Transformation auf die Leistung (zum Beispiel Bearbeitungszeit, -fehler) wurde bislang im Wechselkostenparadigma wenig beachtet.⁷

Grundsätzlich lässt sich vermuten, dass beim Wechsel sensomotorischer Transformationen Wechsel- oder Mischkosten in der Bedienaufgabe auftreten könnten, da der Nutzer seine Repräsentation der Aufgabe an die veränderten Rahmenbedingungen anpassen muss. Dafür könnte auch die Beobachtung von Nacheffekten sprechen, beispielsweise ein Über- oder Unterschließen einer Zielbewegung, wenn eine sensomotorische Transformation wie eine Verstärkung plötzlich geändert wird (Heuer, 1983). Heuer (1983) weist allerdings darauf hin, dass im natürlichen Umfeld bei Transformationsänderungen, beispielsweise beim Wechsel eines verwendeten Werkzeuges, meist keine sichtbaren Nachwirkungen auftreten, da es jeweils Umweltreize gibt, welche die gültige Transformation verdeutlichen.

Das Auftreten von Wechselkosten würde gegen die Verwendung gemischter oder variabler Bedienkonzepte sprechen. Wechselkosten werden allerdings meist grundlagenorientiert in einem streng kontrollierten, experimentellen Setting untersucht. Ob diese auch in einer natürlicheren Aufgabe, wie beim Bedienen eines Menüs und sogar in einer Doppelaufgabensituation (neben der Fahraufgabe) nachweisbar sind, ist fraglich. Eine andere Frage ist außerdem, ob auch die Leistung in der Primäraufgabe durch den Wechsel in der sensomotorischen Transformation reduziert wird. Auf Basis des aktuellen Forschungsstandes können diese Fragen nicht beantwortet werden, weswegen keine Empfehlung für oder gegen Bedienkonzepte mit gemischter sensomotorischer Transformation ausgesprochen werden kann. Dies soll in der vorliegenden Arbeit genauer untersucht werden.

⁷ Eine Studie von Bernardin und Mason (2011) erweitert das Wechselkostenparadigma auf den motorischen Bereich. Der Fokus dieser Studie liegt auf der Koordination der Greifbewegung der zwei Hände, während die Kongruenz der Amplitude der Greifbewegung manipuliert wird. Damit ist der Kontext der Studie von Bernardin und Mason (2011) ein anderer als die in dieser Arbeit untersuchten, sensomotorischen Transformationen zur Cursorbewegung auf einer Anzeige. Dennoch wird in der erwähnten Studie das Wechselkostenparadigma bereits zur Betrachtung von Bewegungszeiten herangezogen.

1.2.9 Alterseffekte beim Erlernen von Transformationen

Ein anderer bedeutsamer Effekt bei der Anpassung an Transformationen ist das Alter des Bedienenden. Dabei spielen auch die Randbedingungen der sensomotorischen Transformation bei der Erlernbarkeit eine Rolle. Heuer und Hegele (2006) bieten einen Überblick über Faktoren, die das Erlernen von Transformationen im Alter beeinflussen können: Zum einen scheinen strategische Anpassungen, die auf explizitem Wissen über die Transformation beruhen, im Alter besonders beeinträchtigt. Ältere scheinen sich der Transformation weniger bewusst und nutzen daher keine expliziten Gegenstrategien zur Kompensation der Transformation. Zum anderen zeigen Ältere höhere kognitive Kosten bei der Anpassung an neue Transformationen. Weiterhin ist die Art der Transformation entscheidend (Heuer & Hegele, 2006): Nicht-natürliche Transformationen, wie beispielsweise nichtlineare Transformationen, zeigen größere Alterseffekte als natürliche Transformationen. Generell sind bei der Anpassung an Transformationen Merkmale der Lernbedingung wie die Art der Bewegungsrückmeldung bedeutsam (Heuer & Hegele, 2006).

Der Effekt, dass nicht-natürliche Transformationen wie Rotationen von Älteren schlechter erlernt werden als von Jüngeren, es sich beim Erlernen von Verstärkungen jedoch keine Unterschiede zeigen, könnte nach Hegele und Heuer (2010) im Unterschied der Transformationsart oder in der bei Rotationen gesteigerten Schwierigkeit der Transformation seine Ursache haben. Hegele und Heuer (2010) untersuchten anhand einer richtungsabhängigen Verstärkungsänderung die Frage, ob der Schwierigkeitslevel von Transformationen für Alterseffekte entscheidend ist. Sie konnten zeigen, dass jüngere Probanden mehr explizites Wissen über die Transformation erwerben und die Anpassung an diese schwierige Verstärkungstransformation altersabhängig eingeschränkt war. In den Nacheffekten, die auf implizite Anpassung schließen lassen, konnte kein Altersunterschied festgestellt werden. Die Studie legt damit nahe, dass die Schwierigkeit einer neuen sensomotorischen Transformation und damit zusammenhängend das vorhandene explizite Wissen, das für strategische Korrekturen genutzt werden kann, nicht aber der Typ der Transformation für Alterseffekte in der Anpassung entscheidend ist (Hegele & Heuer, 2010).

Dementsprechend ist es gerade für ältere Nutzer bedeutsam, eine möglichst einfache Transformation in Bediensystemen anzubieten, um eine Anpassung daran zu ermöglichen und kognitive Kosten, die sich beispielsweise in einer reduzierten Leistung in der Doppelaufgabensituation zeigen, zu vermeiden.

1.2.10 Altersabhängige Veränderungen des sensomotorischen Systems im Kontext Fahren

Neben Alterseffekten hinsichtlich des Erlernens von Transformationen zeigen sich generelle altersabhängige Veränderungen des sensomotorischen Systems, die eine Auswirkung auf die Fahr- und Bedienleistung haben können. Rinkenauer (2008) oder Ketcham und Stelmach (2004) bieten eine Übersicht der motorischen Leistungsfähigkeit im Alter: Die Leistungsfähigkeit wird durch Veränderungen

des Bewegungsapparates wie Verfall der Gelenkstruktur, Rückgang von Muskelkraft und muskulärer Ausdauer, Verlangsamung der Kontraktionszeit der Muskeln, Rückgang der schnellen Muskelfasern, Verlust von Motoneuronen und verringerten propriozeptiven Fähigkeiten zunehmend eingeschränkt. Gleichzeitig treten Veränderungen der zentralnervösen Informationsverarbeitung auf (Rinkenauer, 2008): So ist die Reaktionszeit im Alter bei Einfach- (um 50 ms) und bei Wahlreaktionen (um 50-500 ms) erhöht. Die Bewegungszeit ist bei Älteren 50-500 ms länger. Die Ursache liegt in Veränderungen der Krafteigenschaften, denn sowohl Maximal- und Schnellkraft als auch die Kraftausdauer nehmen im Verlauf der Lebensspanne ab. Die neuromuskulären Veränderungen führen außerdem zu einer geringeren Bewegungsgenauigkeit (Ketcham & Stelmach, 2004): Im Alter zeigen sich eine erhöhte Variabilität der Bewegungsendpunkte und eine höhere Variabilität der Phasen einer Bewegung. Zusätzlich wird die Fähigkeit zur Bewegungskoordination mit fortschreitendem Alter geringer (Rinkenauer, 2008; Ketcham & Stelmach, 2004).

Die beschriebenen, altersbezogenen Veränderungen des neuromuskulären Systems und des Bewegungsapparates führen zu Einschränkungen der körperlichen Mobilität, die sich auf den gesamten Alltag auswirken können. Für Ältere kann es daher besonders wichtig sein, ein Fahrzeug nutzen zu können, um eigene Mobilitätseinschränkungen aufzuheben (Rinkenauer, 2008). Dabei sollten altersbedingte Veränderungen beachtet und ausgeglichen werden: Eine Auswirkung einer verringerten Beweglichkeit der Wirbelsäule beim Einparken könnte beispielsweise durch eine Rückfahrkamera gemindert werden (Rinkenauer, 2008).

Für die Gestaltung der Bedienung im Fahrzeug leitet Rinkenauer (2008) aus den oben beschriebenen altersabhängigen Veränderungen des sensomotorischen Systems folgende Empfehlungen ab: Aufgrund der eingeschränkten Mobilität sollten Bedienelemente gut erreichbar sein. Der erhöhten Variabilität von Bewegungen sollte in der Art Rechnung getragen werden, dass Bedienelemente weder zu klein sind, noch zu dicht aneinander platziert werden. Außerdem ist eine einfache Korrektur von Fehlbedienungen wichtig. Wegen einer verschlechterten Sensorik ist sowohl eine deutliche haptische Rückmeldung, beispielsweise bei Betätigen von Schaltern, als auch zusätzliches beispielsweise akustisches Bedienfeedback sinnvoll. Generell sollten Bedienvorgänge besonders für die wichtigsten Funktionen möglichst einfach gestaltet und klar gegliedert werden (Rinkenauer, 2008).

1.2.11 Altersabhängige Veränderungen des Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleichs

Wie in der Übersicht von Ketcham und Stelmach (2004) dargestellt, zeigen Ältere im Abgleich von Bewegungsgeschwindigkeit und -genauigkeit eine Tendenz zur Genauigkeit auf Kosten der Geschwindigkeit. Dies spiegelt sich auch in Fitts' Law Aufgaben wider: Ältere sind über alle Schwierigkeitsindizes langsamer als jüngere Probanden, benötigen daher bei gleichem Präzisionslevel mehr Zeit als jüngere Probanden. Der Anstieg der Bewegungszeit bei zunehmender Aufgabenschwierigkeit ist bei älteren allerdings deutlicher ausgeprägt als bei jüngeren Probanden, das heißt, es lässt sich meist ein Unterschied in der Steigung der Regressionsgeraden feststellen (Ketcham & Stelmach, 2004): Äl-

tere zeigen bei steigenden Genauigkeitsanforderungen stärkere Auswirkungen auf die Geschwindigkeit als jüngere Probanden.

Ketcham, Seidler, van Gemmert und Stelmach (2002) untersuchten den Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich bei älteren gegenüber jüngeren Probanden anhand des Fitts' Law Paradigmas genauer. Sie betrachteten Unterschiede in Zielbewegungen auf einem Grafiktablett getrennt für Schwierigkeitsindex, Zielgröße und -entfernung, um zu testen, ob Ältere generell langsamer sind oder besonders die Genauigkeits-Kontrolle (es würden sich verstärkt negative Effekte bei kleinen Zielen ergeben) oder die Geschwindigkeits-Kontrolle (es würden sich verstärkt negative Effekte bei höherer Zielentfernung ergeben) beeinträchtigt sind. Wie von den Autoren erwartet stieg die Bewegungszeit mit zunehmendem Schwierigkeitsindex bei älteren Probanden stärker an als bei jüngeren. Die stärkere Zunahme der Bewegungszeit bei Älteren zeigte sich ebenfalls, wenn nur die Zielgröße verkleinert wurde. Der Altersunterschied zeigte sich hier besonders in der relativen, zurückgelegten Distanz der ersten Subbewegung. Diese war bei kleineren Zielen (höheren *ID*-Werten) bei Älteren überproportional geringer als bei Jüngeren. Ältere benötigten in der Studie außerdem überproportional mehr korrektive Subbewegungen bei den kleinsten Zielen. Dies zeigt, dass die Genauigkeits-Kontrolle bei Älteren beeinflusst ist. Sobald Genauigkeit im Besonderen erforderlich ist (bei kleinen Zielen), treten verkürzte erste Subbewegungen auf, wodurch die Bewegungszeit länger ist. Wenn nur die Zielentfernung erhöht wird, zeigt sich ebenfalls die überproportionale Zunahme der Bewegungszeit bei älteren Probanden. Dies lässt sich laut Ketcham et al. (2002) insbesondere auf die Peak-Geschwindigkeit zurückführen, die bei älteren im Vergleich zu jüngeren Probanden bei erhöhter Zielentfernung weniger gesteigert war. Zielgröße und -entfernung scheinen die Bewegungsverlangsamung daher unabhängig voneinander zu beeinflussen und verschiedene Komponenten der Bewegung (relative Distanz der ersten Subbewegung, Anzahl Korrekturbewegungen, Peak-Geschwindigkeit) tragen unterschiedlich zur Bewegungsverlangsamung bei (Ketcham et al., 2002).

Welsh, Higgins und Elliott (2007) sehen in der langsameren Zielbewegung älterer Probanden eine Strategie: Die Vermutung ist, dass ältere Nutzer sich der Veränderung der motorischen Fähigkeiten bewusst sind, daher kürzere Bewegungen planen und mehr Zeit für die Korrektur der Bewegung vorsehen. Welsh et al. (2007) untersuchten dies anhand von realen Zielbewegungen. Das Ergebnis ihrer Studie zeigte, dass ältere Probanden zwar eine zeitlich längere Korrekturphase und damit längere Bewegungszeiten aufweisen, die Zahl von Korrekturbewegungen und die erste Subbewegung sich allerdings nicht von jüngeren Probanden unterscheiden. In dieser Studie ließen sich damit im Gegensatz zu Ketcham et al. (2002) keine Altersunterschiede im Bewegungsmuster zeigen, sondern lediglich in der Dauer. Die Autoren führen den fehlenden Unterschied in der ersten Subbewegung und der Anzahl von Korrekturen auf die Testumgebung zurück, da in dieser Studie reale Zeigebewegungen untersucht wurden. Welsh et al. (2007) vermuten, dass in virtuellen (Computer-basierten) Umgebungen Altersunterschiede in den Bewegungskomponenten auftreten, da ältere Nutzer weniger Erfahrungen mit virtuellen Umgebungen haben und ihnen die Transformation der Körperbewegung in die Werkzeugbewe-

gung schwerer fällt. Beim Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich von Zielbewegungen über ein Touchpad können entsprechend dieser Vermutung bei älteren Nutzern Unterschiede in den Komponenten der Bewegung (vgl. Ketcham et al., 2002) erwartet werden.

1.3 Aktuelle Studien zu Touchpadbedienkonzepten

Nachdem in den vorherigen Abschnitten relevante, theoretische Konzepte zur Bewegungssteuerung, zu Zielbewegungen, sensomotorischen Transformationen etc. vorgestellt wurden, soll im folgenden Abschnitt der aktuelle Forschungsstand zur Gestaltung von Touchpadbedienung aufgezeigt werden. Zur Bedienung während der Fahraufgabe, insbesondere zu Touchpadbedienung im Kontext sensomotorischer Transformationen, lassen sich allerdings kaum Studien finden. Im Bereich der Laptopsteuerung oder generell der Computerbedienung mit verschiedenen Bedienelementen zeigen sich mehr Forschungsaktivitäten.

1.3.1 Bedienung im PC-Kontext

Es lassen sich einige Studien finden, die den optimalen Verstärkungsfaktor bei Mausbedienung, der die Übersetzung der Mausbewegung in die Cursorbewegung beschreibt (vgl. Abschnitt 1.2.8), untersuchen. So konnten beispielsweise Casiez et al. (2008) zeigen, dass die Bedienleistung in Form der Bewegungszeit bei unterschiedlichen Verstärkungen einen L-förmigen Verlauf nimmt. Ein niedriger Verstärkungsfaktor von 2 hatte einen negativen Effekt auf die Leistung, da Umsetzen und hohe Geschwindigkeiten des bedienenden Arms nötig sind. Bei den Verstärkungsfaktoren 5, 8, 12 und 16 war die Bewegungszeit ungefähr konstant, das heißt, hohe Level des Verstärkungsfaktors hatten wenig Einfluss auf die Leistung: In der Studie zeigte sich nur eine leichte Erhöhung der Zeit bei Auswahl sehr kleiner Ziele und konstanter, hoher Verstärkung (bei einem Verstärkungsfaktor von 20). Eine Zeigerbeschleunigung brachte einen kleinen Leistungsvorteil verglichen zu einem konstanten Verstärkungsfaktor: Sie führte zu durchschnittlich zu 3.3%, bei kleinen Zielen zu 5.6% schnellerem Zeigen als bei konstanter Verstärkung (Casiez et al., 2008).

Akamatsu und MacKenzie (2002) untersuchten im Kontext der Nutzung einer variablen Verstärkung bei Touchpadbedienung, ob statt der Geschwindigkeit der Bewegung auch die ausgeübte Kraft zur Festlegung der Verstärkung genutzt werden könnte. Sie konnten zeigen, dass die Kraft in der finalen Auswahlphase geringer war, das heißt, die Kraft kann als Basis für die Festlegung einer variablen Verstärkung herangezogen werden. Ist die Kraft gering, sollte eine kleine Verstärkung verwendet werden, um die Feinpositionierung des Cursors zu ermöglichen (Akamatsu & MacKenzie, 2002).

Einige Studien vergleichen verschiedene Bedienelemente hinsichtlich der Bedienleistung des Nutzers. Ein häufiger Vergleich ist der von Trackpoint (Mini-Joystick, der Kraft in Cursorbewegung überträgt) und Touchpad zur Laptopsteuerung. Die Bedienung mittels des Touchpads ermöglicht eine höhere motorische Leistungsfähigkeit als über den Trackpoint (Armbrüster et al., 2007; Sutter, 2006; Sutter

& Ziefle, 2006). Nach Sutter, Oehl und Armbrüster (2011b) können weiterhin entsprechende Novizen das Touchpad effizienter nutzen als den Trackpoint. Für Experten des jeweils anderen Bedienelements ist außerdem der Wechsel zum ungewohnten Bedienelement Touchpad nicht mit Kosten verbunden, der Wechsel zum ungewohnten Trackpoint dagegen schon (Sutter et al., 2011b). Beim Touchpad zeigt sich zusätzlich ein geringerer altersabhängiger Leistungsabfall (Armbrüster et al., 2007). Touchpad und Trackpoint unterscheiden sich in der Art und Schwierigkeit ihrer Transformation (vgl. Abschnitt 1.2.8, Bedienung als Transformation). Es konnte in den beschriebenen Studien gezeigt werden, dass sich dieser Unterschied in der Effektivität der Bedienung widerspiegelt. Vergleicht man Maus und Touchpad zur Eingabe am PC, erweist sich allerdings die Maus als effektiveres Bedienelement als das Touchpad (Hertzum & Hornbæk, 2010).

1.3.2 Touchpadbedienung im Fahrzeug

Wie bereits erwähnt, finden sich nur wenige Studien zur Touchpadbedienung im Fahrzeug. Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Ergebnisse ist außerdem problematisch, dass die getesteten Bedienkonzepte deutlich vom Fokus dieser Arbeit - der absoluten Touchpadbedienung - differieren. Das untersuchte Konzept und die verwendete Transformation haben, wie oben erläutert, allerdings großen Einfluss auf die Bedienbarkeit. Im Folgenden soll dennoch ein Überblick des aktuellen Forschungsstandes zu Touchpadbedienung im Fahrzeug gegeben werden.

Burnett, Millen, Lawson und Pickering (2010) untersuchten in zwei Studien die Bedienbarkeit von Touchpads im Fahrsimulator. Untersucht wurde ein prototypisches Touchpad, auf dem Zahlen und Buchstaben und einfache Gesten eingegeben werden konnten. Studie 1 sollte beantworten, wo ein Touchpad positioniert werden sollte: in der Mittelkonsole, in der Armlehne (rechts vom Fahrer) oder im Lenkrad. Aufgabe war beispielsweise die Eingabe einer Telefonnummer. Hinsichtlich der Position bevorzugten Rechtshänder die Armlehne, Linkshänder die Mittelkonsole. Die Ergebnisse für das Lenkrad waren gemischt. Es ist allerdings zu beachten, dass diese Fragen mit Hilfe eines Rechtslenkers⁸ untersucht wurden. Damit sind die Erkenntnisse nur eingeschränkt auf linkslenkende Fahrzeuge übertragbar - besonders im Hinblick auf die Händigkeit des Fahrers. Ein Touchpad in der Armlehne würde bei einem Linkslenker aufgrund der höheren Häufigkeit von Rechtshändern in den meisten Fällen mit der nichtdominanten Hand zu bedienen sein. Überträgt man daher die Ergebnisse für Linkshänder in dem rechtslenkenden Fahrzeug, sollte ein Touchpad besser in der Mittelkonsole platziert werden. Studie 2 verglich das prototypische Touchpad mit einem Touchscreen und DDS (Burnett et al., 2010): Der DDS wurde am negativsten bewertet und zeigte die schlechteste Bedienleistung. Der Vergleich der beiden Touchgeräte war aufgabenabhängig. Der Touchscreen war bei einfachen Auswahl-Aufgaben überlegen, das Touchpad, wenn der Nutzer durch einfache Interaktionen Menüwege abkürzen konnte. Es ist allerdings zu beachten, dass das Touchpadkonzept anders gestaltet war als das

⁸ Ein Rechtslenker stellt ein Fahrzeug dar, bei dem das Lenkrad auf der rechten Fahrzeugseite eingebaut ist. Davon zu unterscheiden sind linkslenkende Fahrzeuge, bei denen das Lenkrad auf der linken Fahrzeugseite eingebaut ist.

in den folgenden Studien untersuchte absolute Bedienkonzept, so dass die Ergebnisse nicht direkt vergleichbar sind. Weiterhin wird der Touchscreen aufgrund der genannten Platzierungsnachteile in dieser Arbeit nicht untersucht.

González, Wobbrock, Chau, Faulring und Myers (2007) untersuchten daumenbasierte Eingabetechniken auf einem kleinen Touchpad auf dem Lenkrad im Stand und während einer Fahrt im Fahrsimulator. Am Beispiel der Eingabe eines Navigationsziels wurden drei Interaktionsarten (vertikale / horizontale Wischgesten, Kreisgesten oder Verschiebung des Fingers relativ zum Aufsetzpunkt) für Listenbedienung und verschiedene Arten von Texteingabe (linearer vs. zweidimensionaler Speller vs. einer strichbasierten Handschrift) verglichen. Es konnten jedoch nicht alle Interaktionsarten sinnvoll mit allen Aufgaben kombiniert werden. So wurde beispielsweise die Verschiebung des Fingers nur als Eingabe für die Listenbedienung untersucht. Die teilnehmenden vier Probanden kannten die strichbasierte Handschrift bereits aus einem vorherigen Experiment mit einem anderen Bedienelement, so dass die Handschriftgesten ohne Erlernen der Buchstabenzeichen getestet werden konnten. Aufgrund der Bekanntheit ist eine zu positive Bewertung dieser Technik allerdings nicht auszuschließen. Als schnellste Eingabemethode erwies sich in der Studie die strichbasierte Handschrift. Im Stand war die Verschiebung der Liste die langsamste Methode. Während der Fahrt wies die zweidimensionale Tastatur die längsten Bediendauern auf, da vertikale Daumenbewegungen schwierig auszuführen waren. Es traten kaum Fahrfehler auf, so dass keine inferenzstatischen Vergleiche für die Fahrleistung berechnet werden konnten (González et al., 2007). Eine Generalisierung der Ergebnisse auf absolute Bedienkonzepte ist allerdings nicht möglich, da die untersuchten Konzepte gänzlich unterschiedlich waren. Außerdem führte die Positionierung des Touchpads im Lenkrad zu einer stark eingeschränkten Übertragbarkeit auf eine Positionierung in der Mittelkonsole, beispielsweise da vertikale Gesten schwer auszuführen waren und außerdem mit dem Daumen bedient wurde.

Einen neuartigen, suchbasierten Menüansatz stellen Graf, Spiessl, Schmidt, Winter und Rigoll (2008) vor. In ihrem Konzept wird ein Touchpad in den DDS integriert. Über Handschrifteingabe ist eine alphanumerische Eingabe möglich, die für verschiedene Suchtechniken verwendet wird. Da das Touchpad nur für Handschrifteingabe und nicht für die Menüsteuerung verwendet wird und der klassische Menüansatz nicht verfolgt wird, ist keine Vergleichbarkeit zu den in dieser Arbeit durchgeführten Studien gegeben.

Kamp, Marin-Lamellet, Forzy und Causeur (2001) verglichen in ihrer Studie verschiedene Eingabemethoden hinsichtlich der Bedienleistung bei Aufgaben wie Itemauswahl, Bewegen des Cursors auf der Karte und Eingabe von Namen. Es wurde eine spezielle Tastatur (Kombination aus Dreh-Drücksteller, 4-Wege Schalter, Home, Abbruch) mit einem Touchpad (alphanumerische Eingabe, einfache Wischgesten und Interpretation bestimmter Bereiche der Touchfläche als Tastenfelder) und Spracheingabe verglichen. Das Touchpad konnte verglichen zur Tastatur außer bei der Namenseingabe keine Vorteile zeigen. Während der Touchpadeingabe reduzierten die Probanden ihre Geschwindigkeit. Das

verwendete Konzept lässt sich allerdings wiederum nicht auf absolute Cursorsteuerung übertragen, weshalb die Ergebnisse nicht vergleichbar sind.

Kamp, Poirier und Doignon (2004) stellten ein Bedienkonzept vor, das auf neuronalen Netzen basiert. Der Nutzer kann einfach Zeichen (per Handschrift) am Touchpad eingeben, die dann spezielle Handlungen (Kontaktsuche, Eingabe von Telefonnummern) triggern. Da sich die Autoren nicht mit Cursorsteuerung beschäftigen, lässt sich die Arbeit nicht auf die folgenden Studien übertragen.

Norberg und Rahe (2009) untersuchten ein Infotainment System im Fahrzeug, das über Ein- (Itemauswahl) und Mehrfingergesten (Verschieben und Zoomen) auf dem Touchpad bedient wurde. Die Konzepte wurden auf Papier präsentiert und von den Probanden bewertet. Es zeigte sich, dass die Nutzer das Interface mögen und akzeptieren, wobei die Autoren bimodales Feedback (visuell-akustisch oder visuell-haptisch) für die Verkehrssicherheit empfehlen. Da aber keine tatsächliche Bedienung stattfindet, sondern lediglich Papierkonzepte betrachtet wurden, sind die Ergebnisse wenig aussagekräftig.

Vilimek und Zimmer (2007) entwickelten und bewerteten ein multimodales Touchpadkonzept, bei dem akustisches (Klicklaute), taktiles (fühlbare Item-Grenzen) und visuelles Feedback rückgemeldet werden. Der Nutzer konnte den Cursor über relative, horizontale und vertikale Gesten auf den aktivierbaren Menüinhalten weiterbewegen. Ein Ziel wurde über Antippen des Touchpads bestätigt. Die Autoren verglichen ihr multimodales Touchpad mit einem DDS hinsichtlich Bedien- und Fahrleistung (LCT), Workload und visueller Ablenkung. Bedienungsaufgaben waren Temperatur- und Lautstärkeeinstellung, Speller-Eingabe und Listenauswahl. Sie konnten zeigen, dass die Nutzer von zusätzlichem non-visuellem Feedback profitieren, vor allem aber, wenn nur akustisches Feedback ergänzt wird. Bimodales Feedback ermöglichte kürzere Bearbeitungs- und Blickdauern und subjektiv geringeren Workload. Bei trimodalem Feedback zeigte sich allerdings eine etwas schlechtere Leistung. Dies ist vergleichbar zu dem in Abschnitt 1.2.7 beschriebenen Effekt, dass zu exzessives Feedback den Nutzer auf dicht belegten Anzeigen eher stören kann. Mit dem multimodalen Touchpad konnte eine höhere Leistung als mit dem DDS erreicht werden, verglichen zum rein visuellen Feedback zeigte der DDS allerdings kürzere Blickabwendungen als das Touchpad. Die Studie betont damit die Wichtigkeit zusätzlichen, akustischen Feedbacks bei Touchpadkonzepten. Es wurde allerdings wiederum kein absolutes Bedienkonzept untersucht.

Spies et al. (2011) untersuchten ein haptisch verformbares Touchpad im Fahrzeugkontext. Über Braille-Stäbchen - ähnlich zur Blindenschrift - werden Tasten, die auf der Anzeige abgebildet sind, auch auf dem Touchpad spürbar. Dies bedingt eine absolute Steuerung, also ein direktes Mapping von Touchpad zu Anzeige. Spies et al. (2011) verglichen das haptische mit einem normalen Touchpad - jeweils mit oder ohne visueller Rückmeldung der selektierten Taste (vgl. Abschnitt 1.1.6, Highlight) - hinsichtlich Blickverhalten und Spurabweichung. Das haptische Touchpad führte zu einer geringeren Spurabweichung und zu weniger und kürzeren Blicken. Die visuelle Rückmeldung der selektierten

Taste (Highlight) erhöhte jedoch die Blickanzahl, -dauer und die Spurabweichung, verstärkte also die Ablenkung von der Fahraufgabe. Kritisch anzumerken ist, dass keine Effektivitäts- und Effizienzmaße wie beispielsweise die Bearbeitungszeit berichtet werden.

1.3.3 Fazit

Absolute Touchpadbedienung im Kontext Fahren wurde somit bisher nur von Spies et al. (2011) in Kombination mit haptischem Feedback untersucht, so dass sich nur wenige Empfehlungen für eine möglichst ablenkungsreduzierte und altersgerechte Gestaltung geben lassen. Die Studien betonen außerdem die Wichtigkeit von Bedien-Feedback. Besonders haptisches und akustisches Feedback scheinen hinsichtlich Ablenkung von der Fahraufgabe von Vorteil. Aus praktischen Aspekten kann in der vorliegenden Arbeit allerdings kein Touchpad untersucht werden, das Tastengrenzen haptisch rückmeldet. Hinsichtlich der Positionierung scheint bei linkslenkenden Fahrzeugen im Hinblick auf die Häufigkeit von rechtshändigen Fahrern die Mittelkonsole geeignet, weshalb diese Position für die folgenden Untersuchungen gewählt wird.

1.4 Zentrale Fragestellung

Wie eingangs schon erwähnt, ist die zentrale Motivation dieser Arbeit die Untersuchung von Gestaltungsmöglichkeiten von Bedienung im Fahrzeug und deren Auswirkung auf die sensomotorische Leistungsfähigkeit. Im Hinblick auf die zunehmende Komplexität durch eine erhöhte Funktionsanzahl und die Doppelaufgabensituation beim Fahren ist eine durchdachte und einfache Gestaltung der Bedienung besonders bedeutend. Die Fahrsituation (vgl. Abschnitt 1.1.4) erfordert, dass die Bedieninteraktion möglichst ablenkungsarm erfolgt, wenig visuelle und manuelle Ressourcen benötigt und gut unterbrechbar ist. Des Weiteren ist eine möglichst kurze Bediendauer von Vorteil. Um die Auswirkungen der Bedieninteraktionen auf die Fahrleistung zu erheben, wird in den folgenden Experimenten die Bedienung in einer Doppelaufgabensituation neben einer Spurhaltungsaufgabe in der Fahrsimulation durchgeführt, wobei die Spurabweichung während der Bedienung gemessen wird.

Aufgrund der oben genannten Vorteile von Touchpadbedienung verglichen mit anderen Bedienelementen (vgl. Abschnitt 1.1.5) konzentriert sich diese Arbeit auf dieses Bedienelement, wobei hinsichtlich der konkreten Ausgestaltung des Bedienkonzepts noch Untersuchungsbedarf besteht. Eine menschenzentrierte Gestaltung ist in diesem Kontext besonders wichtig. Dem wird im Folgenden Rechnung getragen, indem Untersuchungen mit Nutzern für die Ableitung von Gestaltungsempfehlungen durchgeführt werden. Zur Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit der Bedienkonzepte werden, wie in Abschnitt 1.1.3 empfohlen, Kenngrößen aus der Kognitionspsychologie, also Maße der Effektivität, wie Fehler bei der Eingabe und die Bediengenauigkeit, der Effizienz, wie die Dauer der Eingabe, und der Zufriedenstellung (anhand von subjektiven Maßen) erhoben. Die Bedienkonzepte werden dabei in möglichst anwendungsrelevanten Untersuchungsumgebungen betrachtet.

Wie in Abschnitt 1.2.8 erläutert, handelt es sich bei fast jeder Bedienung um eine sensomotorische Transformation. Der Fokus dieser Arbeit wird auf die Gestaltung absoluter Bedienkonzepte (vgl. Abschnitt 1.1.6) gelegt. Diese bieten Vorteile wie das Mapping von Anzeige und Bedienelement (Norman, 1988; Norman, 2011), eine intuitive, direkte Interaktion und eine breite und flexible Anwendbarkeit. Gleichzeitig handelt es sich dabei um eine einfache Transformation, die lediglich eine Verschiebung und teils eine konstante Verstärkung beinhaltet (vgl. Abschnitt 1.2.8). Hinsichtlich des Cursorkonzeptes konzentriert sich diese Arbeit auf objektunabhängige Cursor aufgrund ihrer natürlichen, stetigen Bewegung und flexiblen Einsetzbarkeit (vgl. Abschnitt 1.1.6). Zur Untersuchung der Interaktion und der sensomotorischen Leistungsfähigkeit wird das Paradigma von Zielbewegungen (vgl. Abschnitt 1.2.1) herangezogen.

Die erste Frage, die sich hinsichtlich der Gestaltung des absoluten Bedienkonzepts stellt, ist der Einfluss der Skalierung beziehungsweise des genutzten Verstärkungsfaktors auf die sensomotorische Leistungsfähigkeit des Nutzers. Unter dem Begriff Skalierung ist dabei im Folgenden die untersuchte effektive Größe des Ausschnitts der Anzeige beziehungsweise des Touchpads zu verstehen, der für die Darstellung der Bedienaufgabe beziehungsweise für die Bedienung genutzt wird. Die ersten beiden Experimente untersuchen den Einfluss der Skalierung hinsichtlich der Anzeige (Experiment I) und des Touchpads (Experiment II). Wie in Abschnitt 1.1.5 und 1.2.8 beschrieben, ist Flexibilität einer der Hauptvorteile der Touchpadbedienung. Es ist allerdings unklar, inwieweit eine Nutzung dieser Flexibilität beispielsweise durch gemischte Bedienkonzepte sinnvoll ist oder ob Änderungen in der Transformation die Effizienz der Bedienung reduzieren. Die Frage nach der Auswirkung von Wechseln der Aufgabe auf die Leistung wird häufig im Wechselkostenparadigma - typischerweise anhand von Vorlese-, Benennungs-, Kategorisierungs- oder Reaktionsaufgaben, nicht jedoch für Wechsel der sensomotorischen Transformation - untersucht (vgl. Abschnitt 1.2.8, Einfluss von unerwarteten Wechseln auf die sensomotorische Transformation; für eine Übersicht typischer Aufgaben im Wechselkostenparadigma siehe Kiesel et al., 2010). Die ersten beiden Experimente untersuchen daher neben der Skalierungsfragestellung das Auftreten von Wechsel- und Mischkosten bei Änderung der Skalierung beziehungsweise der sensomotorischen Transformation (Experiment I hinsichtlich der Anzeige, Experiment II hinsichtlich des Touchpads) anhand des Wechselkostenparadigmas. Da Wechsel- und Mischkosten hauptsächlich im Grundlagenparadigma untersucht werden, ist fraglich, ob sie auch in einer natürlichen Bediensituation während einer Doppelaufgabe nachweisbar sind. Ein Auftreten von Kosten in der sensomotorischen Leistungsfähigkeit der Nutzer würde beispielsweise gegen gemischte oder variable Konzepte sprechen.

In Experiment III sollen für das absolute Bedienkonzept Empfehlungen hinsichtlich der Gestaltung von visuellem Feedback über die Zielerreichung abgeleitet werden. In der Literatur zeigen sich abhängig von der Anzahl möglicher Ziele gegensätzliche Effekte von Feedback (Akamatsu et al., 1995; Cockburn & Brewster, 2005; vgl. Abschnitt 1.2.7). Daher stellt sich die Frage, ob Feedback die Zielerreichung in der Menüaufgabe erleichtern kann und wie das Feedback optimal gestaltet werden sollte.

Eine weitere Frage ist, ob sich abhängig vom Feedback Unterschiede im Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich der Zielbewegung zeigen. In Abschnitt 1.2.3 wurde erläutert, dass für die Modellierung der Zielbewegung bei der Bedienaufgabe Fitts' Law geeignet erscheint, da die Zielbewegung eher unter Closed-loop Kontrolle (vgl. Abschnitt 1.2.2) mit Nutzung von Feedback erfolgt: Bewegungskorrekturen sind möglich und es handelt sich nicht um extrem schnelle Zielbewegungen. Außerdem wird für die Bedienaufgabe kein Bewegungszeit-Ziel vorgegeben, sondern die Nutzer sollen neben einer angemessenen Leistung in der Fahraufgabe so schnell wie möglich bedienen.

In Experiment III und Experiment IV soll die Modellanpassung von Fitts' Law gemäß der Empfehlungen von Soukoreff und MacKenzie (2004) erfolgen. Um eine für das Fahrzeug realistische Bedienaufgabe zu ermöglichen, werden entsprechende Anpassungen hinsichtlich der Tastenanordnungen, der getesteten *ID*-Bedingungen und der Testaufgabe vorgenommen.

Die erste Frage hinsichtlich des Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleichs in Experiment III ist, ob sich Fitts' Law als ein geeignetes Paradigma erweist, die Menübedienung zu modellieren, das heißt, inwiefern das Modell auf die Bedienaufgabe passt. Hierbei ist insbesondere zu beachten, dass die Bedienung in der Doppelaufgabensituation durchgeführt wird. Es konnte bereits eine Passung des Modells in Mehraufgabensituationen gezeigt werden (Shehab & Schlegel, 1993; Schedlbauer, 2007; vgl. Abschnitt 1.2.5), allerdings mit einer vergleichsweise geringeren Varianzaufklärung und bisher noch nicht für Touchpadbedienung während der Fahraufgabe. Des Weiteren soll hinsichtlich der Gestaltung von Feedback betrachtet werden, ob sich Unterschiede in der Modellierung abhängig von der visuellen Bedingung zeigen, das heißt, ob unterschiedliches Feedback zu messbaren Unterschieden in der Effizienz der Eingabemethode führt. Daneben soll die Auswirkung von visuellem Feedback auf die effektive Zielbreite untersucht werden.

Wie sich zeigen wird, weisen die Ergebnisse eine relativ gute Passung von Fitts' Law auf. In Experiment IV soll die Passung aufgrund methodischer Aspekte wie der Aufzeichnung der Bewegungszeit und der Gestaltung der Testaufgabe erneut geprüft werden. Die in den ersten Experimenten beobachtete Häufigkeit von Fehlern führt außerdem zur Gestaltung und Betrachtung alternativer Bedienkonzepte.

Ein in Experiment IV zusätzlich zu betrachtendes Bedienkonzept schließt die Überlegungen, Fitts' Law zu „schlagen“ (Balakrishnan, 2004; vgl. Abschnitt 1.2.6), ein. Unter Beibehaltung des absoluten Bedienprinzips soll durch Entkopplung von visueller und motorischer Ebene (vgl. Semantisches Zeigen; Blanch et al., 2004) die Zielerreichung erleichtert werden, ohne Tastengröße und -entfernung visuell anzupassen. Die eigentliche Transformation (Verschiebung und Verstärkung; vgl. Abschnitt 1.2.8) wird verglichen zum ursprünglichen Bedienkonzept nicht verändert. Hierbei ist zu untersuchen, ob Fitts' Law tatsächlich „geschlagen“ werden kann und ob distale Effekte (visuelle Ebene) oder proximale Effekte (motorische Ebene) für die Leistungsfähigkeit entscheidend sind (Blanch et al., 2004; Sutter et al., 2011a; Sutter et al., 2013; vgl. Abschnitt 1.2.8, Werkzeuggebrauch als Transformation).

Daneben soll die Leistungsfähigkeit des Nutzers bei gestenbasierten, relativen Bedienkonzepten betrachtet werden, wobei jeweils ein objektgebundener Cursor, der nicht jedem Punkt auf der Anzeige zugeordnet werden kann, sondern der diskret zwischen den aktivierbaren Anzeigehalten springt (vgl. Abschnitt 1.1.6, Cursorkonzepte), Anwendung findet. Relative Konzepte weisen zwar eine deutlichere Verschiebung in der Transformation auf (vgl. Abschnitt 1.2.8), könnten allerdings hinsichtlich der Unterbrechbarkeit der Aufgabe Vorteile zeigen, was die Eignung in der Doppelaufgabensituation erhöhen könnte. Da diese Bedienkonzepte nicht auf kontinuierlichen Zielbewegungen beruhen, ist eine Modellierung über Fitts' Law nicht sinnvoll. Stattdessen soll ähnlich zur Vorhersage der Bearbeitungszeit bei diskreten Eingaben (vgl. Abschnitt 1.2.5) versucht werden, die Bearbeitungszeit über die Anzahl an Bedienschritten zu modellieren.

Eine weitere zentrale Frage von Experiment IV ist, welches Bedienkonzept zur besten sensomotorischen Leistung des Nutzers führt und außerdem die geringsten Auswirkungen auf die Leistung in der Fahraufgabe zeigt. Hinsichtlich der menschenzentrierten Gestaltung der Bedienung werden zusätzlich Aspekte der Zufriedenstellung des Nutzers (vgl. Abschnitt 1.1.3) betrachtet.

Ein Aspekt, der für die Gestaltung effizienter Bedienung besonders bedeutend ist, ist das Alter des Nutzers. Im Hinblick auf die demografische Entwicklung mit einer Zunahme älterer Fahrer ist eine altersgerechte Gestaltung der Bedieninteraktion unumgänglich. Wie in den Abschnitten 1.2.9 und 1.2.10 beschrieben, zeigen sich altersabhängig Unterschiede im Erlernen von Transformationen und Veränderungen des sensomotorischen Systems. Dementsprechend soll in Experiment I und Experiment II betrachtet werden, ob ältere Nutzer andere Anforderungen an die Skalierung von Touchpad und Anzeige haben als jüngere Nutzer. Daneben soll untersucht werden, ob bei älteren Nutzern verstärkt negative Effekte bei Änderungen der sensomotorischen Transformation auftreten, das heißt, sich größere Wechsel- und Mischkosten zeigen als bei jüngeren Nutzern.

Bei der Betrachtung unterschiedlicher Bedienkonzepte in Experiment IV stellt sich ebenfalls die Frage nach einer altersabhängigen Eignung. Zusätzlich sollen in der Modellierung der Bedienzeit über Fitts' Law und über die Anzahl an Bedienschritten Unterschiede hinsichtlich des Alters der Nutzer untersucht werden.

2 Generelle Methodik

2.1 Versuchsumgebung

Die Studien wurden an einem Ergonomie-Prüfstand durchgeführt (Abbildung 2-1), der die räumlichen Abmessungen eines echten Fahrzeuges möglichst realistisch darstellte. Für die Durchführung einer simulierten Fahrt war dieser mit einem Lenkrad, einer Pedaleinheit im Fußraum, über die beschleunigt und gebremst werden konnte, und zwei Lautsprechern für simuliertes Motorengeräusch ausgestattet. Die Fahrsimulation wurde auf einem 15-Zoll Bildschirm dargestellt, der circa 85 cm vom Kopf des Fahrers entfernt positioniert war.



Abbildung 2-1: Versuchsaufbau

Die grafische Oberfläche des Bediensystems wurde auf einem 8-Zoll Bildschirm mit einer Auflösung von 800 x 480 Pixeln dargestellt. Die Anzeige war rechts neben dem Lenkrad auf der Mittelkonsole platziert. Der Abstand zwischen der Anzeige und dem Kopf des Fahrers betrug dabei ungefähr 80 cm. Die Anzeige war zur besseren Lesbarkeit um 20° zum Fahrer hin angewinkelt. Über angebundene Lautsprecher wurden verschiedene Bearbeitungstöne ausgegeben.

2.2 Fahraufgabe

Zur realistischeren Untersuchung der Bedienbarkeit im Fahrzeug führten die Probanden in allen Experimenten als Primäraufgabe eine Spurhaltungsaufgabe aus. Dazu sollten sie in der Fahrsimulation mit 30 km/h möglichst mittig auf der mittleren Spur einer dreispurigen Straße fahren (Abbildung 2-2). Da die Strecke in der Simulation als Oval aufgebaut war, nahm die Straße stets eine leichte Linkskurve. Es gab keinen umgebenden Verkehr. Damit die Aufgabe nur die Querregulation beinhaltete, wurde die

Geschwindigkeit auf 30 km/h begrenzt. So konnten die Probanden das Gaspedal während der Fahrt komplett durchdrücken.

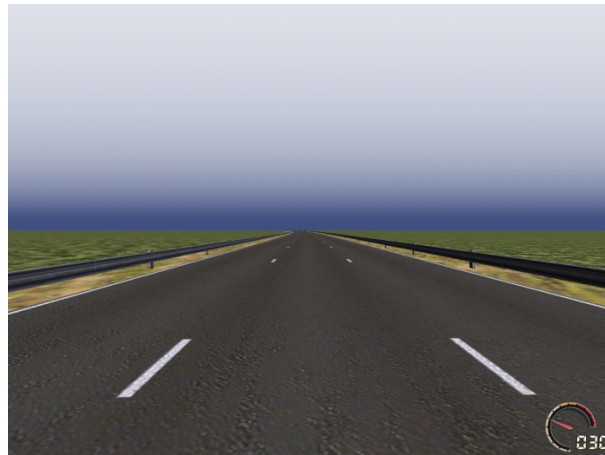


Abbildung 2-2: Fahraufgabe

2.3 Touchpad in Experiment I bis III

Für Experiment I bis III wurde ein 9.5 x 7.5 cm großes kapazitives Touchpad verwendet, das an den Simulations-Rechner angebunden war. Eine Schablone begrenzte die zentrale Touchpadfläche auf eine Größe von 5.0 x 7.3 cm (Abbildung 2-3), wobei die nutzbare Touchpadfläche zusätzlich softwaretechnisch beliebig verkleinert werden konnte. Für eine gute Erreichbarkeit war das Touchpad in einem Winkel von 20° nach vorne abfallend in die Mittelarmlehne eingebaut (Abbildung 2-1 rechts).



Abbildung 2-3: Touchpad

Die Touchpadeinheit war so konstruiert, dass die gesamte berührungssensitive Fläche ähnlich einem Druck-Schalter heruntergedrückt werden konnte. Diese Druck-Funktion wurde zur Betätigung einer virtuellen Taste auf der Anzeige verwendet.

2.4 Absolutes Bedienkonzept

In Experiment I bis III wurde ein absolutes Bedienkonzept (Abbildung 2-4) untersucht (vgl. Abschnitt 1.1.6). Die Fingerposition wurde über einen runden, orangenen Cursor repräsentiert. In Experiment III wurde als zusätzliches Feedback in manchen Experimentalbedingungen ein Tastenhighlight (vgl. Ab-

schnitt 1.1.6) verwendet: Eine virtuelle Taste wurde farbig eingefärbt, solange die Cursormitte innerhalb der Tastengrenzen positioniert war.

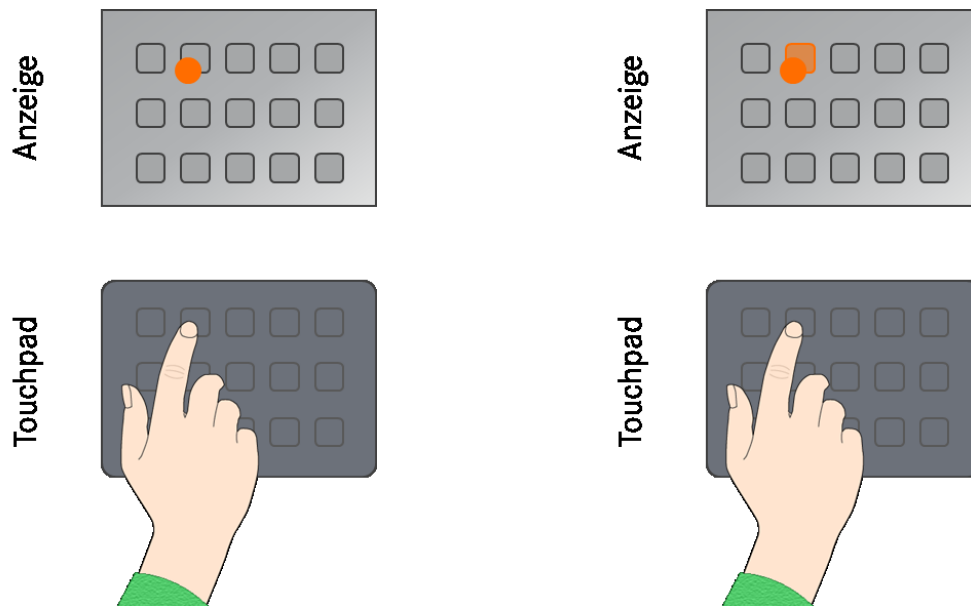


Abbildung 2-4: Absolutes Bedienprinzip ohne (links) und mit (rechts) Highlight

2.5 Generelles Versuchsdesign

2.5.1 Unabhängige Variablen

Wie in Abschnitt 1.4 erläutert, ist das Alter des Nutzers ein Faktor, der bei der Gestaltung effizienter Bedienung generell bedeutend ist. Dementsprechend wurden in den Experimenten I, II und IV Altersinflüsse auf Wechsel- und Mischkosten und auf die Eignung verschiedener Bedienkonzepte betrachtet. Dazu wurden in den genannten Experimenten zwei Altersgruppen (jünger vs. älter) als between-Faktor untersucht, von denen die eine Altersgruppe jünger als 30, die andere Gruppe älter als 55 Jahre war. In Experiment III wurde der Altersfaktor aufgrund einer geringeren Stichprobengröße nicht betrachtet, da es sich hierbei um eine Pilotstudie für die Anwendbarkeit von Fitts' Law auf die absolute Bedienung sowie für die Optimierbarkeit des absoluten Bedienprinzips durch visuelles Feedback handeln sollte.

2.5.2 Abhängige Variablen

In allen Experimenten wurden Maße der sensomotorischen Leistungsfähigkeit, also Maße der Bediengeschwindigkeit und -genauigkeit erfasst. Zusätzlich wurde die Beanspruchung kognitiver Ressourcen über die Leistung in der Doppelaufgabe erhoben (vgl. Abschnitt 1.1.4). Eine Übersicht der erhobenen Maße ist in Tabelle 2-1 dargestellt.

Zum Rückschluss auf die Bediengeschwindigkeit wurden in allen Experimenten Zeitmaße erhoben: In den ersten beiden Experimenten (Experiment I und II), in denen Zielworte über eine Tastatur eingegeben werden sollten, wurde sowohl die Zeit für die Eingabe des ersten Buchstabens des Zielwortes, im

Folgenden „Ersteingabezeit“ genannt, als auch die Zeit für die Eingabe des gesamten Zielwortes, im Folgenden „Gesamteingabezeit“ genannt, betrachtet. Die Ersteingabezeit ist dabei im Folgenden als die Zeit von der Präsentation einer Aufgabe bis einschließlich der Eingabe⁹ des ersten Buchstabens des Zielwortes zu verstehen, die Gesamteingabezeit als die Zeit von der Präsentation einer Aufgabe bis einschließlich der Eingabe des vollständigen Zielwortes. In Einfachreaktionsaufgaben werden normalerweise Reaktionszeit (Initialzeit) und Restzeit getrennt betrachtet, da sie unterschiedliche Prozesse repräsentieren: Die Reaktionszeit repräsentiert beispielsweise Aufmerksamkeits- und Wahrnehmungsprozesse, die Restzeit motorische Prozesse. Die Tippaufgabe (eines Wortes) unterscheidet sich allerdings von der Einfachreaktionsaufgabe. Beim Eintippen eines Wortes ist keine einfache Unterscheidung zwischen diesen Komponenten möglich, da bei jedem Tippen beziehungsweise Tastendruck die gesamte Informationsverarbeitungskette von Wahrnehmung bis Handlungsausführung involviert ist. Da sich die beiden Zeitkomponenten beim Eintippen eines Wortes im Aufgabenverlauf aus mehreren Tastendrücken nicht trennen lassen, ist es nicht zielführend, die Ersteingabezeit von der Gesamteingabezeit zu subtrahieren. Als Gesamteingabezeit wird daher die Zeit von der Präsentation der Aufgabe bis zur vollständigen Eingabe definiert.

In Experiment III wurden als Zeitmaße die Bearbeitungszeit und die Bewegungszeit erhoben. Da in Experiment III unterschiedliche Bedienaufgaben, nicht nur das reine Eintippen eines Zielwortes betrachtet wurden, war eine Differenzierung in die Eingabe eines ersten Buchstabens und des gesamten Wortes nicht sinnvoll, weswegen in Experiment III von „Bearbeitungszeit“ gesprochen wird. Diese beinhaltet die Zeit zwischen der Präsentation einer Bedienaufgabe und der vollständigen Bearbeitung durch den Probanden. Eine Bedienaufgabe konnte in Experiment III mehrere Zielbewegungen beinhalten, sofern mehrere virtuelle Tasten zur Aufgabenbearbeitung betätigt werden mussten. Als weiteres Zeitmaß wurde daher pro Zielbewegung die Dauer der Bewegung zur Zieltaste, im Folgenden „Bewegungszeit“ genannt, erhoben.

In Experiment IV ist eine Bedienaufgabe jeweils mit der Betätigung einer Zieltaste abgeschlossen. Unter „Bearbeitungszeit“ ist in Experiment IV somit die Zeit zwischen der Präsentation einer Zieltaste und deren Betätigung zu verstehen. Für die untersuchten absoluten Bedienkonzepte wurde als weiteres Zeitmaß erneut die Dauer der Zielbewegung („Bewegungszeit“) gemessen. Die in Experiment IV untersuchten relativen Bedienkonzepte basieren nicht auf kontinuierlichen Zielbewegungen, weshalb eine Betrachtung der Bewegungszeit nicht sinnvoll ist. Stattdessen wurde für die relativen Bedienkonzepte als weiteres Zeitmaß die Dauer zwischen der Präsentation der Zieltaste und deren Erreichen, im Folgenden als „Zeit der Zielnavigation“ bezeichnet, gemessen.

Zur Betrachtung der Bediengenauigkeit wurden in allen Experimenten Bedienfehler aufgezeichnet: Beim absoluten Bedienkonzept wurden Tastendrucke „ins Leere“, das heißt, Druck auf das Touchpad, ohne dass der Mittelpunkt des Cursors über einer aktivierbaren Taste positioniert war, und Betätigun-

⁹ Die Eingabe eines Buchstabens beziehungsweise das Betätigen einer Taste erfolgte bei Drücken, nicht bei Loslassen des Touchpads.

gen falscher Tasten, also Tasten, die nicht die jeweilige Zieltaste waren, als Fehler gewertet. Für die in Experiment IV alternativ betrachteten Bedienkonzepte wurden Betätigungen falscher Tasten als Bedienfehler gewertet - Tastendrucke ins Leere waren bei diesen alternativen Konzepten nicht möglich. Aus der Anzahl falscher Tastendrucke wurde die relative Fehlerhäufigkeit ermittelt, das heißt, der Anteil fehlerhafter Aufgaben an der Gesamtzahl eingehender Aufgaben, der im Folgenden als „relativer Fehler“ bezeichnet wird. In Experiment I und II, bei denen von den Probanden ein Zielwort eingegeben werden sollte, wurde die Analyse des relativen Fehlers getrennt für die Eingabe des ersten Buchstabens und die Eingabe des Gesamtwortes betrachtet, wobei sich der relative Fehler bei der Gesamteingabe auf den Anteil von Aufgaben verglichen zum Gesamtanteil bezieht, in denen mindestens ein fehlerhafter Tastendruck aufgezeichnet wurde.

Als weitere Kenngröße der Bediengenauigkeit beim absoluten Bedienprinzip wurde in Experiment I und III der zur Zielerreichung zurückgelegte „Weg auf dem Touchpad“ gemessen, der den Weg beinhaltet, den der Finger zwischen Start und Ziel der Bewegung auf dem Touchpad abfährt. Er wurde in Touchpad-Punkten erfasst und daraufhin in die Einheit mm umgerechnet. Auch wenn beispielsweise Start- und Zielpunkt einer Bewegung nur 20 mm (als direkte Strecke) voneinander entfernt sind, kann der vom Probanden zurückgelegte Bewegungsweg mehr, zum Beispiel 32 mm, betragen, wenn nicht der kürzest mögliche Weg bei der Zielbewegung abgefahren wird. Ein größerer Weg auf dem Touchpad lässt dabei auf eine ungenauere Bedienung schließen. In Experiment II war ein Vergleich des Touchpadweges zwischen den Bedingungen nicht sinnvoll, da diese Kenngröße abhängig von der Skalierung des Touchpads ist, die in Experiment II aktiv variiert wurde. Zusätzlich wurde hinsichtlich der Bediengenauigkeit in Experiment II und III der Abstand zwischen Tastendruck und Tastenmittelpunkt (in [px]; je größer der Abstand, desto ungenauer die Bedienung) betrachtet, der im Folgenden als „Abstand zum Tastenmittelpunkt“¹⁰ bezeichnet wird.

Als Kenngröße für die Ressourcenanforderung der Bedienaufgabe wurden alle Experimente im Doppelaufgabenkontext durchgeführt. Es wurde die Spurabweichung in der Fahraufgabe aufgezeichnet, wobei eine bessere Spurhaltung (niedrigere Spurabweichung) für eine geringere Belastung der Ressourcen durch die Bediensituation spricht, was als eine geringere Ablenkung von der Fahraufgabe gewertet wird. Es wurde einerseits der Betrag (konstanter Fehler), andererseits die Standardabweichung (variabler Fehler) der Spurabweichung berechnet: Der Betrag beinhaltet dabei die generelle Abweichung von der Ideallinie, die Standardabweichung die Variabilität der Spurabweichung.

Um alle Aspekte der Gebrauchstauglichkeit der getesteten Konzepte (Effizienz, Effektivität und Zufriedenstellung; DIN EN ISO 9241-11, 1999; vgl. Abschnitt 1.1.3) einzubeziehen, wurden neben den objektiven Maßen der Bedienleistung (Effizienz und Effektivität) in allen Experimenten zusätzlich diverse subjektive Urteile anhand von Fragebögen erhoben. In Experiment I und II wurde die subjektive Schwierigkeit der Aufgabe erfragt sowie in Experiment II, III und IV verschiedene Akzeptanzfra-

¹⁰ Eine Betrachtung dieser Variable war in Experiment I nicht sinnvoll, da der Abstand abhängig von der visuellen Skalierung ist, die in Experiment I aktiv variiert wurde.

2 Generelle Methodik

gen. Diese konnten von den Probanden in Experiment III und IV anhand von offenen Nennungen zu Vor- und Nachteilen der untersuchten Konzepte und freien Begründungen für die Bewertungen im Akzeptanzfragebogen ergänzt werden.

Tabelle 2-1: Übersicht der abhängigen Variablen

	Abhängige Variable	Beschreibung	Experiment
Bedien- geschwindigkeit	Ersteingabezeit	Zeit von der Präsentation einer Aufgabe bis einschließlich der Eingabe des ersten Buchstabens	I, II
	Gesamteingabezeit	Zeit von der Präsentation einer Aufgabe bis einschließlich der Eingabe des vollständigen Zielwortes	I, II
	Bearbeitungszeit	Zeit zwischen der Präsentation einer Bedienaufgabe und der vollständigen Bearbeitung	III, IV
	Bewegungszeit	Dauer der Zielbewegung	III, IV
	Zeit der Zielnavigation	Dauer zwischen der Präsentation der Zieltaste und deren Erreichen	IV
Bedien- genauigkeit	Relativer Fehler	Anteil fehlerhafter Aufgaben an der Gesamtzahl eingehender Aufgaben	I, II, III, IV
	Weg auf dem Touchpad	Abgefahrener Weg auf dem Touchpad zwischen Start und Ziel einer Bewegung	I, III
	Abstand zum Tastenmittelpunkt	Abstand zwischen Tastendruck und Tastenmittelpunkt	II, III
Leistung in der Fahraufgabe	Betrag Spurabweichung	Ausmaß der Spurabweichung von der Ideallinie	I, II, III, IV
	<i>SD</i> Spurabweichung	Variabilität der Spurabweichung	I, II, III, IV
Akzeptanz	Anhand von Fragebögen und offenen Fragen wurden in allen Experimenten diverse subjektive Urteile erhoben.		I, II, III, IV

3 Experiment I: Visuelle Skalierung der Bedienaufgabe

3.1 Fragestellung

Für die zentrale Frage der Gestaltung effizienter Bedienung im Fahrzeug soll im folgenden Experiment der Einfluss der Skalierung der Anzeige auf die sensomotorische Leistungsfähigkeit des Nutzers untersucht werden. Zu diesem Zweck werden ein großer (800 x 480 px) und ein kleiner (400 x 240 px) Ausschnitt der Anzeige über ein (50 x 73 mm großes) Touchpad bedient und es wird die entsprechende sensomotorische Leistungsfähigkeit des Nutzers betrachtet.

Daneben soll geprüft werden, in welchem Rahmen der Nutzer mit der Flexibilität absoluter Touchpadbedienkonzepte umgehen kann und wie sich unerwartete Wechsel der Bedienungsumgebung auf die Leistungsfähigkeit auswirken. Insofern wird anhand des Wechselkostenparadigmas das Auftreten von Wechsel- und Mischkosten bei Änderung der Skalierung der Anzeige beziehungsweise der sensomotorischen Transformation untersucht, wobei ein Auftreten von Wechselkosten gegen gemischte oder variable Bedienkonzepte sprechen würde.

3.2 Methode

3.2.1 Probanden

Insgesamt 30 Probanden (14 Frauen, 16 Männer) nahmen am Experiment teil. 27 Probanden waren Rechtshänder, 2 Linkshänder und ein Proband Ambidexter. Alle Probanden waren normalsichtig oder korrigiert normalsichtig (der auf Bildschirmdistanz ermittelte Visus lag bei allen Probanden bei mindestens 0.8), wobei 7 Probanden keine Sehhilfe benötigten, 5 Personen Kontaktlinsen und 18 Probanden eine Brille (11 mit Gleitsichtbrille) trugen. Im Versuch wurden zwei Alterskategorien (jeweils 15 Probanden) untersucht, eine Gruppe jünger als 30 Jahre, die andere Gruppe älter als 55 Jahre. Die Probanden der jüngeren Gruppe waren zwischen 21 und 28 Jahre alt, bei einem Altersdurchschnitt von 25.0 Jahren und einer Standardabweichung (*SD*) von 2.2 Jahren. Die Probanden der älteren Gruppe waren zwischen 56 und 68 Jahre alt, bei einem Altersdurchschnitt von 61.6 Jahren und einer Standardabweichung von 4.3 Jahren. Die Probanden schätzten ihre Erfahrung mit Touchpadbedienung vor Untersuchungsbeginn auf einer 5-stufigen Skala (gar nicht - sehr viel) ein. Der Median der Erfahrung mit Touchpads lag in der jüngeren Alterskategorie bei 4, das heißt, bei viel Erfahrung. In der älteren Gruppe lag der Median bei 2, also bei wenig Erfahrung. Zusätzlich gaben die Probanden die Anzahl der Stunden an, die sie pro Woche auf einer QWERTZ-Tastatur tippen. Die Probanden der jüngeren Gruppe tippten zwischen 7 und 50 Stunden pro Woche, bei einem Mittelwert (*M*) von 26.3 Stunden und einer Standardabweichung von 12.2 Stunden. Die Probanden der älteren Gruppe tippten zwischen

3 Experiment I

1 und 50 Stunden pro Woche, bei einem Mittelwert von 13.9 Stunden und einer Standardabweichung von 14.7 Stunden.

3.2.2 Apparatur

Die Apparatur wird in Abschnitt 2 (Generelle Methodik) beschrieben.

3.2.3 Versuchsaufgabe

Im Versuch sollten die Probanden zwei Ortsnamen, „Ramels“ und „Maltis“, möglichst schnell und fehlerfrei mit Hilfe des Touchpads auf einer dargebotenen QWERTZ-Tastatur (Abbildung 3-1) tippen. Die Tastatur war auf zwei Größen skaliert. Zur einen Hälfte der Aufgaben füllte sie die gesamte Anzeige (800 x 480 px), zur anderen Hälfte das untere rechte Viertel der Anzeige (400 x 240 px), wobei im Hintergrund die Karte sichtbar war. Bei beiden Skalierungen wurde das gesamte Touchpad zur Bedienung der Tastatur genutzt.

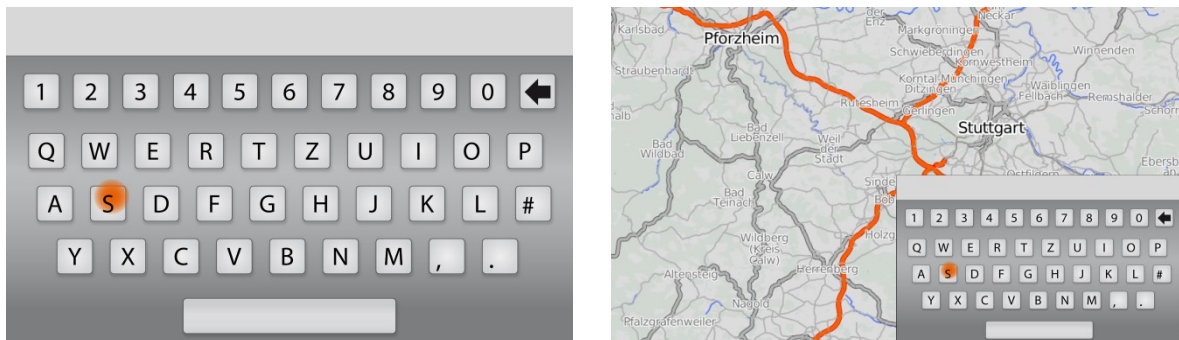


Abbildung 3-1: Dargebotene Tastatur mit Cursor in zwei Skalierungen

Der jeweils zu tippende Ortsname wurde über die am Prüfstand angeschlossenen Lautsprecher ausgegeben und in der Mitte der Anzeige angezeigt. Die Ausgangsposition des Fingers vor dem Eintippen war nicht kontrolliert, sondern wurde von den Probanden jeweils frei gewählt. Sobald die Probanden den richtigen Begriff fehlerfrei eingetippt hatten, erfolgte ein Bestätigungston und die Aufgabe wurde ausgeblendet. Nach einer kurzen Pause wurde die nächste Aufgabe visuell und akustisch dargeboten.

Hatten die Probanden einen falschen Buchstaben eingetippt, konnte über eine Korrekturtaste oben rechts in der Tastatur ein Zeichen pro Tastendruck gelöscht werden. Wenn das Touchpad heruntergedrückt wurde, ohne dass der Cursor über einer Taste positioniert war, erfolgte ein Fehlerlon.

Im Versuch wurden zwei Ortsnamen ausgewählt, um eine Wahlreaktion zu generieren. Die beiden Begriffe stimmten in der Gesamtweglänge, die mit dem Cursor abgefahren werden musste (2074 Pixel), überein. Außerdem lagen die jeweils enthaltenen Buchstaben relativ weit auseinander, waren gleich über die drei Zeilen der Tastatur verteilt und die Wege, die der Finger abfahren musste, waren ähnlich (Abbildung 3-2).

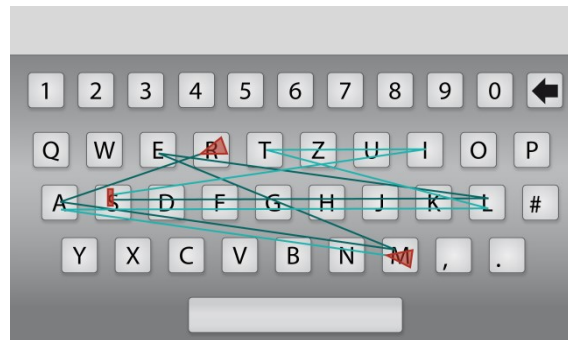


Abbildung 3-2: Demonstration der abzufahrenden Wege beim Eintippen der ausgewählten Ortsnamen

3.2.4 Ablauf einer Aufgabe

Zu Beginn jeder Aufgabe (Abbildung 3-3) wurde für 0.5 s ein schwarzer Bildschirm dargeboten. Daraufhin wurde das Zielwort für 2.0 s in der Bildschirmmitte präsentiert und parallel über die Lautsprecher ausgegeben. Dann wurde so lange eine Tastatur angezeigt, bis der Ortsname fehlerfrei eingegeben war. Darauf folgte für 0.5 s der schwarze Bildschirm.

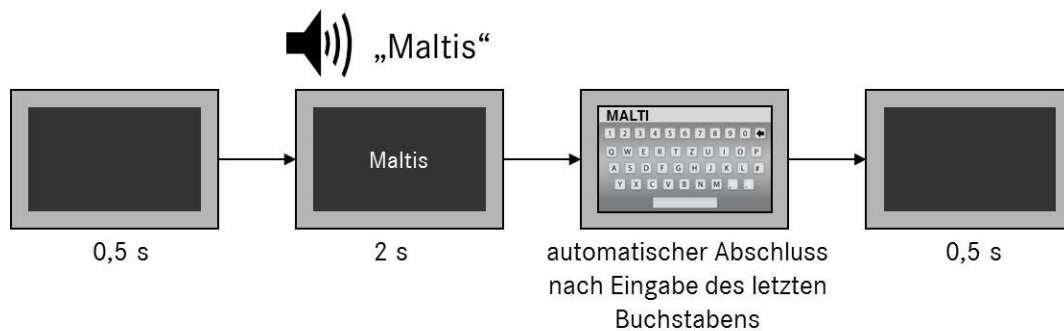


Abbildung 3-3: Ablauf einer Aufgabe am Beispiel „Maltis“

3.2.5 Versuchsdesign

Unabhängige Variablen

Zur Untersuchung des generellen Skalierungseffekts wurde ein 2 (*Alterskategorie*) x 2 (*Skalierung Anzeige*) x 2 (*Messzeitpunkt*) faktorielles Design verwendet.

- Als between-Faktor wurden zwei Alterskategorien untersucht: eine Gruppe jüngerer und eine Gruppe älterer Versuchsteilnehmer.
- Die zweite unabhängige Variable war die Skalierung der Anzeige, die für die Bedienungsaufgabe genutzt wurde (within-Faktor): 100 (A) vs. 25% (B).
- Um Lern- und Ermüdungseffekte zu kontrollieren, wurden zwei Messungen (within-Faktor) durchgeführt, zu Versuchsbeginn (Zeitpunkt 1) und zu Versuchsende (Zeitpunkt 2).

3 Experiment I

Um das Auftreten sensomotorischer Wechselkosten zu untersuchen, wurde ein 2 (*Alterskategorie*) x 2 (*Skalierung Anzeige*) x 2 (*Relative Häufigkeit*) x 3 (*Anzahl gleicher Aufgaben¹¹*) faktorielles Design verwendet.

- Die ersten beiden Faktoren waren wiederum die beiden Alterskategorien (between-Faktor) und die beiden Skalierungen der Bedienaufgabe (within-Faktor).
- Als dritter Faktor wurde die relative Häufigkeit der Skalierungen als within-Faktor variiert. In einem Block wurde die auf 100% skalierte Aufgabe mit einer relativen Häufigkeit von 0.77, die auf 25% skalierte Aufgabe zu 0.23 dargeboten, im anderen Block waren die relativen Häufigkeiten getauscht (Abbildung 3-4).
- Die Anzahl aufeinanderfolgend gleicher Skalierungen war ein weiterer within-Faktor. Die Aufgabenskalierungen wurden im Mittelwert im Verhältnis 10:3 abgewechselt, um ein Mit-zählen der Bedingungen durch die Probanden zu verhindern (Abbildung 3-4). Wechseleffekte wurden allerdings nur in den ersten drei Aufgaben nach einem Skalierungswechsel erwartet, das heißt, in den Aufgaben A₁ und B₁ (nach einem Wechsel), A₂ und B₂ (in der ersten Wiederholung) sowie A₃ und B₃ (in der zweiten Wiederholung). Spätere Aufgaben identischer Skalierung (A₄ - A₁₀ und B₄ - B₁₀) wurden für die Analyse von Wechselkosten daher nicht betrachtet.

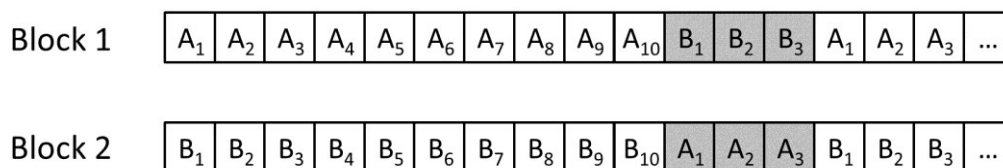


Abbildung 3-4: Beispielhafte Darstellung der Einzelaufgaben-Abfolgen, wobei A (100 %) und B (25%) die beiden Aufgabenskalierungen repräsentieren. Im Mittelwert war die Aufgabenabfolge im einen Block 10 Aufgaben A, 3 Aufgaben B, 10 Aufgaben A etc., im anderen Block 10 Aufgaben B, 3 Aufgaben A, 10 Aufgaben B etc.

Zur Untersuchung von Mischkosten wurde ein 2 (*Alterskategorie*) x 2 (*Skalierung Anzeige*) x 3 (*Block*) faktorielles Design verwendet.

- Die ersten beiden Faktoren waren erneut die beiden Alterskategorien (between-Faktor) und die beiden Skalierungen der Bedienaufgabe (within-Faktor).
- Als dritter Faktor wurde die Bedienung in den verschiedenen Blöcken (within-Faktor) betrachtet: Die Aufgaben der Baseline (A_B) wurden mit entsprechenden Wiederholungsaufgaben (A₂

¹¹ Die im Folgenden verwendete Aufgabennummerierung bezieht sich nicht auf die Anzahl an Wiederholungen (0, 1, 2) einer Aufgabe, sondern auf die Anzahl gleicher Aufgaben, das heißt, Aufgabe 1 ist die Aufgabe nach einem Wechsel, Aufgabe 2 ist die erste Wiederholung, Aufgabe 3 ist die zweite Wiederholung.

häufig), die im gemischten Block häufig¹² waren, und mit entsprechenden Wiederholungsaufgaben (A_2 selten), die im gemischten Block selten¹³ waren, verglichen.

Das Zielwort wurde nicht als Faktor in die Analyse aufgenommen, da die beiden Begriffe in der Eingabecharakteristik bestmöglich übereinstimmten und die Probanden sich auf das jeweilige Zielwort vorbereiten konnten, so dass keine Effekte erwartet wurden.

Die Abfolge der 10:3 Skalierungs-Sequenzen und die Abfolge von Baseline und Wechselblöcken wurden über die Probanden randomisiert, um Reihenfolgeeffekte auszugleichen.

Abhängige Variablen

Wie in Abschnitt 2.5.2 erläutert, wurden während der Bedienung Bedienmaße wie die Ersteingabe- und Gesamteingabezeit, der relative Fehler und der gefahrene Weg auf dem Touchpad erhoben. Außerdem wurde die Leistung in der Fahraufgabe über die Spurabweichung gemessen.

Nach den Baselines wurde die subjektive Schwierigkeit der Aufgabe auf einer Skala von 1 (gar nicht schwierig) bis 5 (sehr schwierig) erfragt.

3.2.6 Versuchsablauf

Nach der Begrüßung wurden die Probanden nach Alter, Händigkeit, Erfahrung mit Touchpadbedienung, wöchentlicher Tippdauer auf einer QWERTZ-Tastatur und dem Tragen von Sehhilfen (Brille, Kontaktlinsen) befragt.

Daraufhin wurden die Probanden instruiert, mit Hilfe des Touchpads je eine von zwei Ortsbezeichnungen einzugeben, um die Bedienung eines Navigationssystems zu testen. Dazu wurde Ihnen das absolute Bedienprinzip erklärt (vgl. Abschnitt 2.4, Absolutes Bedienkonzept).

Der Ablauf der Aufgaben (vgl. Abschnitt 3.2.3) wurde insgesamt jeweils zehnmal pro Ortsbezeichnung und je zehnmal pro Tastaturskalierung geübt. Die Probanden wurden instruiert, möglichst schnell und genau zu bedienen. Die rechte, bedienende Hand sollte zwischen den Aufgaben nicht zum Lenkrad geführt, sondern am Touchpad liegen gelassen werden. Dadurch sollte verhindert werden, dass die Dauer der Armbewegung von Lenkrad zu Touchpad in manchen Aufgaben in die Zeitmaße einfließt, was Störvarianz erzeugen würde.

Nach der Eingabeübung folgte erst eine separate Übung der Fahraufgabe (2.2 Fahraufgabe), dann wurde die Eingabe während des Fahrens geübt. Vor den Testblöcken wurden die Probanden instruiert, dass die Fahraufgabe Vorrang hat, sie aber dennoch möglichst schnell und fehlerfrei eingeben sollen. Nach den vier Baseline-Messungen, in denen nur entweder die große oder die kleine Aufgabenskalie-

¹² Häufig bedeutet im Folgenden, dass die Aufgabe im gemischten Block mit einer relativen Häufigkeit von 0.77 auftrat.

¹³ Selten bedeutet im Folgenden, dass die Aufgabe im gemischten Block mit einer relativen Häufigkeit von 0.23 auftrat.

3 Experiment I

rung dargeboten wurde, beurteilten die Probanden die Schwierigkeit der Aufgabe. Zwischen den beiden Wechselblöcken war eine Pause vorgesehen.

Am Ende des Versuchs wurde bei allen Probanden ein Visustest durchgeführt, der speziell für die Bildschirmdistanz von 80 cm geeignet war. Dieser wurde erst nach den Testblöcken und Befragungen durchgeführt, um deren Ergebnisse nicht zu beeinflussen.

Das Experiment dauerte insgesamt ungefähr 90 Minuten. Abbildung 3-5 bietet einen Überblick über den Ablauf.

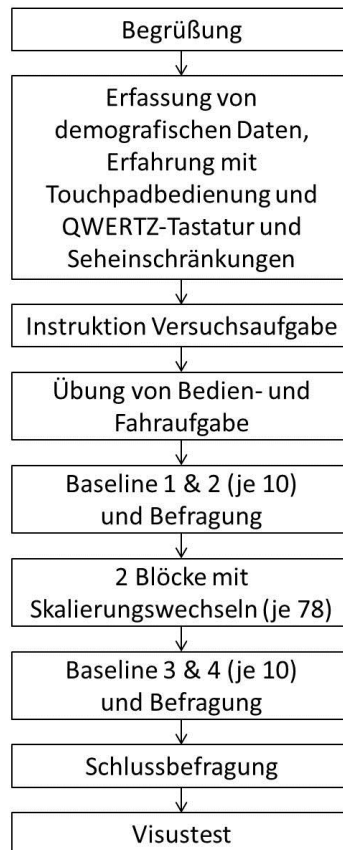


Abbildung 3-5: Grafische Darstellung des Versuchsablaufs von Experiment I

3.2.7 Datenanalyse

Alle Faktoren in den Analysen außer der Alterskategorie der Probanden waren within-Faktoren. Als Hauptanalyse wurde eine gemischte Varianzanalyse mit Messwiederholung berechnet, wobei die Alterskategorie als between-Faktor in die Berechnung einging. Es wurden jeweils Greenhouse-Geisser korrigierte Freiheitsgrade verwendet und als Level für statistische Signifikanz wurde $p < 0.05$ festgelegt. Um bei einem signifikantem Haupteffekt eines Faktors mit mehr als zwei Stufen zu testen, zwischen welchen Stufen der signifikante Unterschied liegt, wurden post hoc paarweise Mittelwertvergleiche mit Bonferroni-Adjustierung berechnet (beispielsweise bei der Bestimmung der Wechselkosten).

Der relative Fehler wurde für die inferenzstatistischen Auswertungen gemäß Winer (1971) sinustransformiert¹⁴. Bearbeitungsmaße (Eingabezeit, relativer Fehler etc.) wurden einerseits für die Eingabe des ersten Buchstabens andererseits für die Eingabe des Gesamtwortes betrachtet.

Die Spurabweichung in der Fahraufgabe wurde jeweils nur für die Dauer der Eingabe des gesamten Wortes berechnet, da der Aufzeichnungszeitraum für die Eingabe des ersten Buchstabens sehr kurz und die entsprechende Spurabweichung damit nicht aussagekräftig war. Als Maße der Spurabweichung wurden, wie in Abschnitt 2.5.2 erläutert, der Betrag und die Standardabweichung berechnet, um einerseits Aussagen über den absoluten Versatz und andererseits über ihre Variabilität treffen zu können.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden im folgenden Ergebnisbericht nur signifikante Effekte und Interaktionen berichtet.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Ausgeschlossene Daten

Aufgaben, in denen eine Störung des Ablaufs - beispielsweise durch ein Niesen des Probanden - auftrat, wurden vom Versuchsleiter während der Versuchsdurchführung markiert und von der Auswertung ausgeschlossen. Daneben wurde getrennt pro Proband, Alterskategorie, Block und Skalierung der Anzeige eine Ausreißer-Korrektur durchgeführt: Aufgaben, in denen die Ersteingabe- beziehungsweise Gesamteingabezeit mehr als drei Standardabweichungen größer als der Mittelwert war, wurden aus den Analysen ausgeschlossen. Für die Betrachtung der Ersteingabe- und Gesamteingabezeit wurden außerdem nur fehlerfreie Aufgaben einbezogen.

Die Berechnungen zur Spurabweichung beruhen auf Daten ohne Ausreißer-Korrektur, das heißt, die Spurhaltung während fehlerhafter Eingaben oder sehr langen Aufgaben wird berücksichtigt. Nur als ungültig markierte Aufgaben wurden ausgeschlossen.

3.3.2 Skalierungseffekt der Anzeige

Subjektive Schwierigkeit der Aufgabenbearbeitung

Die Probanden schätzten die Schwierigkeit der Bearbeitung (Abbildung 3-6) nach jedem Baseline-Block auf einer fünfstufigen Skala von 1 „nicht schwierig“ bis 5 „sehr schwierig“ ein. Die Schwierigkeit lag im Bereich 1.73 bis 3.13, das heißt, im Bereich „eher nicht schwierig“ bis „mittel“. Die Aufgabe wurde bei kleiner Anzeigeskalierung ($M = 2.82$, $SD = 0.85$) schwieriger bewertet als bei großer Anzeigeskalierung ($M = 2.38$, $SD = 0.94$; $F(1,28) = 12.10$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.30$). Daneben wurde die Aufgabe zu Zeitpunkt 2 ($M = 2.28$, $SD = 0.78$) weniger schwierig eingeschätzt als zu Zeitpunkt 1 ($M = 2.92$, $SD = 0.94$; $F(1,28) = 35.72$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.56$). Ältere Probanden schätzten die Tipp-

¹⁴ Die deskriptive Statistik (Grafische Darstellungen, Mittelwerte, Standardabweichungen) des relativen Fehlers basiert jeweils auf nicht transformierten Werten.

3 Experiment I

aufgabe außerdem tendenziell schwieriger ($M = 2.80$, $SD = 0.82$) ein als jüngere Probanden ($M = 2.40$, $SD = 0.98$; $F(1,28) = 3.02$, $p < 0.1$, $\eta_p^2 = 0.10$).

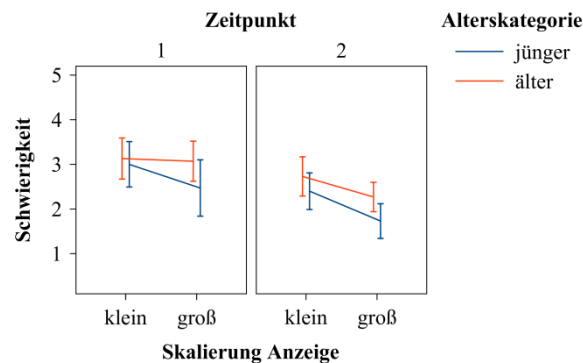


Abbildung 3-6: Mittelwert der subjektiven Schwierigkeit der Aufgabenbearbeitung (1 „nicht schwierig“ - 5 „sehr schwierig“) in Abhängigkeit von der Skalierung der Anzeige, dem Zeitpunkt und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Ersteingabe- und Gesamteingabezeit

In der Ersteingabezeit (Abbildung 3-7 links) ließ sich ein Skalierungseffekt der Anzeige feststellen: Bei kleiner Skalierung dauerte die Eingabe länger ($M = 1899$ ms, $SD = 597$ ms) als bei großer Skalierung ($M = 1690$ ms, $SD = 687$ ms; $F(1,28) = 16.85$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.38$). Daneben zeigten sich ein Alters- und ein Übungseffekt: Ältere Probanden benötigten mehr Zeit ($M = 2108$ ms, $SD = 658$ ms) für die Eingabe als jüngere Probanden ($M = 1481$ ms, $SD = 467$ ms; $F(1,28) = 15.76$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.36$) und zu Zeitpunkt 1 ($M = 2037$ ms, $SD = 690$ ms) brauchten die Probanden länger für die Eingabe als zu Zeitpunkt 2 ($M = 1553$ ms, $SD = 506$ ms; $F(1,28) = 45.47$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.62$).

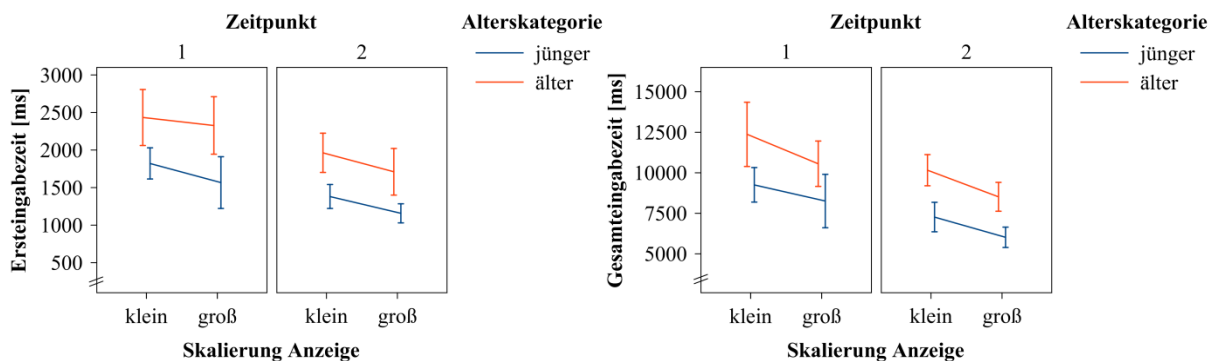


Abbildung 3-7: Mittlere Ersteingabezeit [ms] (links) und Gesamteingabezeit [ms] (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung der Anzeige, dem Zeitpunkt und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Diese Effekte zeigten sich ebenfalls für die Gesamteingabezeit (Abbildung 3-7 rechts): Die Eingabe dauerte bei kleiner Skalierung ($M = 9762$ ms, $SD = 2951$ ms) länger als bei großer Skalierung ($M = 8338$ ms, $SD = 2676$ ms; $F(1,28) = 93.16$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.77$). Die Probanden brauchten zu Zeitpunkt 1 ($M = 10110$ ms, $SD = 3155$ ms) länger als zu Zeitpunkt 2 ($M = 7990$ ms, $SD = 2159$ ms; $F(1,28) = 31.99$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.53$). Außerdem zeigte sich wiederum, dass ältere Probanden ($M = 10402$ ms, $SD = 2795$ ms) länger für die Eingabe brauchten als jüngere Probanden ($M = 7698$ ms, $SD = 2318$ ms; $F(1,28) = 14.66$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.34$). Der Alterseffekt interagiert mit

der Skalierung der Anzeige ($F(1,28) = 4.30, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.13$): Ältere Probanden zeigten einen stärkeren Zuwachs der Gesamteingabezeit bei kleiner Skalierung als jüngere Probanden, das heißt, die Verkleinerung wirkte sich bei älteren Probanden negativer aus.

Relativer Fehler

Wie in Abschnitt 2.5.2 beschrieben, wurden für die Eingabe des ersten Buchstabens und des Gesamtwortes Fehlermaße berechnet. Im relativen Fehler der Ersteingaben (Abbildung 3-8 links) zeigte sich ein unerwarteter Effekt der Skalierung der Anzeige: Bei großer Skalierung ($M = 0.055, SD = 0.077$) war er größer als bei kleiner Skalierung ($M = 0.025, SD = 0.051; F(1,28) = 10.91, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.28$).

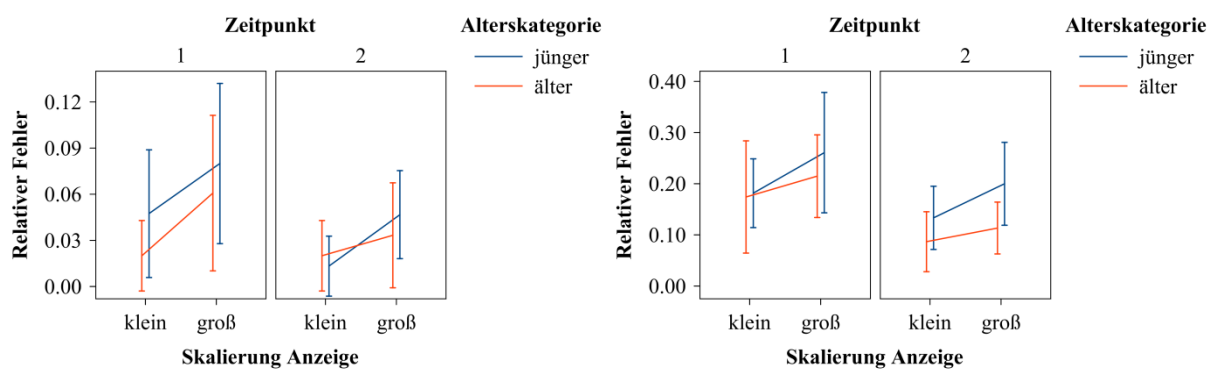


Abbildung 3-8: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung der Anzeige, dem Zeitpunkt und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Beim Gesamtwort bezieht sich der relative Fehler auf den Anteil der Aufgaben, in denen mindestens ein Fehler aufgetreten ist.

Für die Eingabe des Gesamtwortes (Abbildung 3-8 rechts) zeigte sich ein generell hoher relativer Fehler. Dieser war bei der großen Skalierung der Anzeige ($M = 0.197, SD = 0.160$) wiederum tendenziell größer als bei der kleinen Skalierung ($M = 0.144, SD = 0.141; F(1,28) = 3.69, p < 0.1, \eta_p^2 = 0.12$). Daneben zeigte sich ein Zeiteffekt: Zu Zeitpunkt 1 ($M = 0.208, SD = 0.172$) war der relative Fehler größer als zu Zeitpunkt 2 ($M = 0.133, SD = 0.120; F(1,28) = 9.04, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.24$).

Weg auf dem Touchpad

Im zurückgelegten Weg auf dem Touchpad zeigte sich für die Eingabe des ersten Buchstabens (Abbildung 3-9 links) und die Eingabe des Gesamtwortes (Abbildung 3-9 rechts) nur ein Zeiteffekt. Bei der Eingabe des ersten Buchstabens war der Weg auf dem Touchpad zu Zeitpunkt 1 ($M = 30.8 \text{ mm}, SD = 10.0 \text{ mm}$) durchschnittlich 5.4 mm länger als zu Zeitpunkt 2 ($M = 25.4 \text{ mm}, SD = 8.9 \text{ mm}; F(1,28) = 14.01, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.33$), bei der Eingabe des Gesamtwortes war er zu Zeitpunkt 1 ($M = 230.7 \text{ mm}, SD = 27.1 \text{ mm}$) im Mittelwert 11.4 mm länger als zu Zeitpunkt 2 ($M = 219.3 \text{ mm}, SD = 24.7 \text{ mm}; F(1,28) = 8.75, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.24$).

3 Experiment I

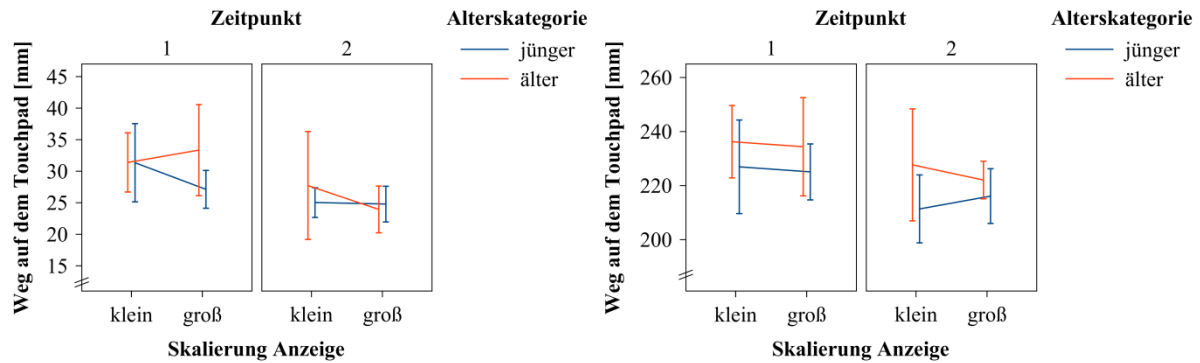


Abbildung 3-9: Mittlerer Weg auf dem Touchpad [mm] für die Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung der Anzeige, dem Zeitpunkt und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Spurabweichung

Ältere Probanden ($M = 0.67$ m, $SD = 0.29$ m) zeigten einen durchschnittlich 0.18 m höheren Betrag der Spurabweichung (Abbildung 3-10 links) als jüngere Probanden ($M = 0.49$ m, $SD = 0.14$ m; $F(1,28) = 5.05$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.15$).

Außerdem zeigten ältere ($M = 0.40$ m, $SD = 0.14$ m) eine durchschnittlich 0.21 m höhere SD der Spurabweichung (Abbildung 3-10 rechts) als jüngere Probanden ($M = 0.19$ m, $SD = 0.12$ m; $F(1,28) = 35.44$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.56$). Zu Zeitpunkt 1 ($M = 0.35$ m, $SD = 0.17$ m) war die SD der Spurabweichung größer als zu Zeitpunkt 2 ($M = 0.25$ m, $SD = 0.14$ m; $F(1,28) = 30.28$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.52$).

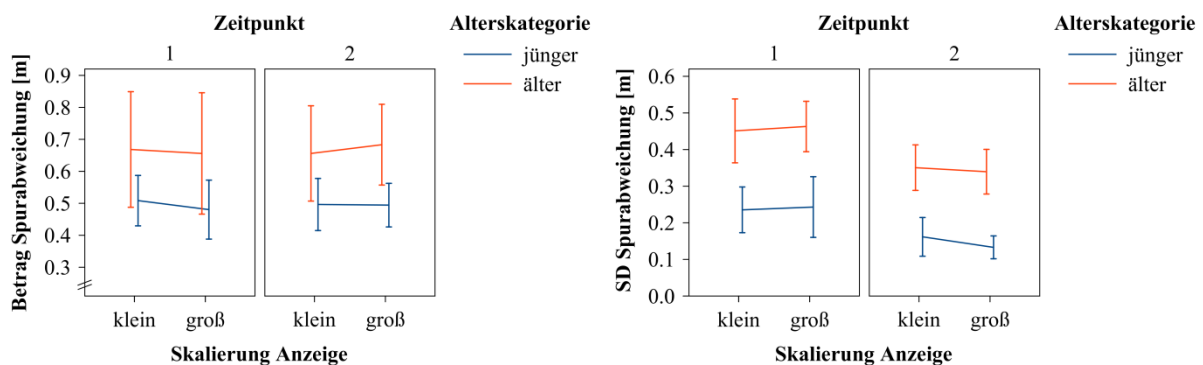


Abbildung 3-10: Mittlerer Betrag der Spurabweichung [m] (links) und mittlere SD der Spurabweichung [m] (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung der Anzeige, dem Zeitpunkt und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Fazit Skalierungseffekte

Die Skalierung der Anzeige hatte einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Nutzers. Die Ersteingabezeit war bei kleiner Skalierung der Anzeige durchschnittlich 209 ms höher als bei großer Skalierung, die Gesamteingabezeit durchschnittlich sogar 1424 ms höher. Dieser Unterschied zeigte sich zu beiden Messzeitpunkten im Versuch. Diese Effekte deckten sich mit den Ergebnissen der subjektiven Schwierigkeit. Die kleine Skalierung der Anzeige wurde als schwieriger eingeschätzt als die große. Im Touchpadweg und in der Spurabweichung ließ sich kein Effekt der Skalierung der Anzeige feststellen. Unerwartet war allerdings, dass der relative Fehler sowohl beim ersten Buchstaben (durch-

schnittliche Differenz 0.030) als auch beim gesamten Wort (durchschnittliche Differenz 0.053) bei großer Skalierung der Anzeige höher war als bei kleiner Skalierung. Alterseffekte zeigten sich für die Ersteingabe- und Gesamteingabezeit, in der subjektiven Schwierigkeit der Aufgabe und in der Spurbabweichung, jedoch nicht in den relativen Häufigkeiten von Fehlern. Mögliche Erklärungen dieser Effekte werden in der Diskussion erläutert.

3.3.3 Wechselkosten bei Änderung der Skalierung der Anzeige

Zur Berechnung von Wechselkosten (im engeren Sinne) wurden die Daten innerhalb einer Bediensequenz verglichen: Die Leistung in einer Aufgabe A (100%) und B (25%) nach einem Wechsel (von A nach B oder B nach A), das heißt, die Leistung in A_1 und B_1 , wurde mit der Leistung in der ersten (A_2 und B_2) und in der zweiten Wiederholung (A_3 und B_3) verglichen. Die Versuchsaufgabe, das Eintippen von Ortsnamen auf einer QWERTZ-Tastatur, wurde in den Abschnitten 3.2.3 und 3.2.4, die Abfolge der Einzelaufgaben in Abschnitt 3.2.5 näher beschrieben.

Die Analyse von Wechselkosten beinhaltet meist nur den Vergleich der Aufgabe nach einem Wechsel mit der ersten Wiederholung und erwartet in der Wiederholungsaufgabe eine höhere Leistung. Allerdings könnten Wechseleffekte auch noch in der zweiten Wiederholung auftreten, das heißt, nicht nur eine höhere Leistung in A_2 verglichen zu A_1 , sondern zusätzlich eine höhere Leistung in A_3 verglichen zu A_2 . Meiran (2010) gibt einen Überblick über verschiedene Prozesse, die den Wechsel zwischen Aufgaben erschweren, wie beispielsweise die Trägheit des zuerst aktivierten Aufgaben-Sets oder retroaktive Anpassungen (vgl. Abschnitt 1.2.8). Es ist denkbar, dass sich diese Prozesse länger auswirken und daher auch in der zweiten Wiederholung noch Wechseleffekte feststellbar sind. Um diesen Aspekt zu betrachten, wurden die zweiten Wiederholungen zusätzlich in die Analyse einbezogen.

Des Weiteren sollen in den folgenden Abschnitten nicht nur die Wechselkosten betrachtet werden, sondern zusätzlich generelle Wechseleffekte beispielsweise bei der Betrachtung von Interaktionen.

Ersteingabe- und Gesamteingabezeit

Für die Ersteingabezeit (Abbildung 3-12 links) ließ sich ein Haupteffekt der Aufgabe ($F(1.9,53.3) = 8.47, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.23$) im Sinne von Wechselkosten feststellen: Post hoc Bonferroni Tests zeigten, dass die Probanden in Aufgabe 1 ($M = 1837$ ms, $SD = 669$ ms) länger brauchten als bei Aufgabe 2 ($M = 1692$ ms, $SD = 577$ ms; $p < 0.05$) und Aufgabe 3 ($M = 1663$ ms, $SD = 610$ ms; $p < 0.01$). Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen Aufgabe 2 und 3 ($p > 0.2$).

Der Effekt der Aufgabe interagierte (Abbildung 3-11) dabei mit ihrer relativen Häufigkeit ($F(1.7,48.0) = 3.54, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.11$): Bei einer relativen Aufgabenhäufigkeit von 0.23 zeigte sich eine deutliche Abnahme der Ersteingabezeit zwischen Aufgabe 1 und 2, bei einer relativen Aufgabenhäufigkeit von 0.77 nur eine minimale Abnahme der Ersteingabezeit von Aufgabe 1 zu Aufgabe 3. Wechselkosten traten damit vor allem bei seltenen Aufgaben auf. Mögliche Ursachen dieses Effekts werden in der Diskussion erläutert.

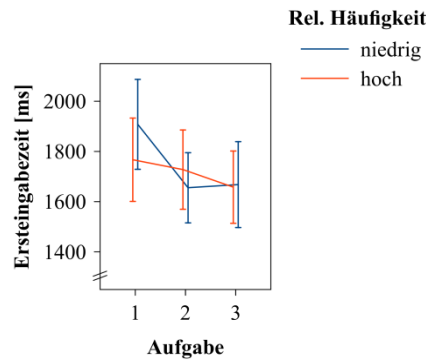


Abbildung 3-11: Mittlere Ersteingabezeit [ms] in Abhängigkeit von der Aufgabe und der relativen Häufigkeit der Aufgabe. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Daneben zeigte sich erneut ein Effekt der Skalierung der Anzeige ($F(1,28) = 58.30, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.68$): Die Ersteingabezeit war bei großer Skalierung geringer. Außerdem zeigte sich ein Effekt der Alterskategorie ($F(1,28) = 9.25, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.25$): Ältere Probanden benötigten mehr Zeit für die Eingabe des ersten Buchstabens. Beide Effekte ließen sich bereits in den Analysen des Skalierungseffektes (vgl. Abschnitt 3.3.2) aufzeigen.

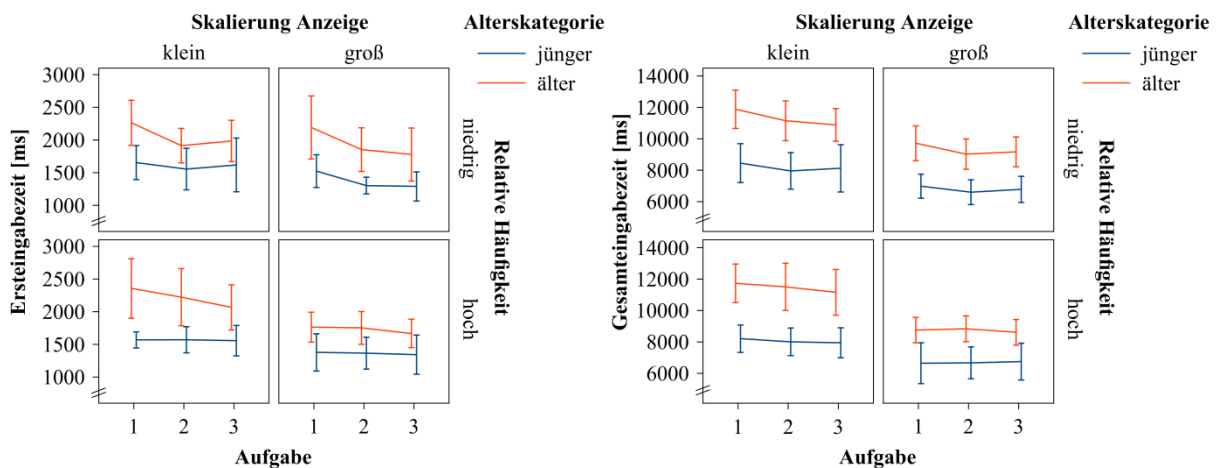


Abbildung 3-12: Mittlere Ersteingabezeit [ms] (links) und Gesamteingabezeit [ms] (rechts) in Abhängigkeit von der Aufgabe, der Skalierung der Anzeige, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Der Effekt der Aufgabe ($F(1.9,52.4) = 9.99, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.27$) zeigte sich ebenfalls für die Gesamteingabezeit (Abbildung 3-12 rechts): Post hoc Bonferroni Tests zeigten wiederum, dass die Probanden in Aufgabe 1 ($M = 9047$ ms, $SD = 2647$ ms) länger brauchten als bei Aufgabe 2 ($M = 8718$ ms, $SD = 2554$ ms; $p < 0.01$) und Aufgabe 3 ($M = 8694$ ms, $SD = 2506$ ms; $p < 0.01$). Es gab auch für die Gesamteingabezeit keinen signifikanten Unterschied zwischen Aufgabe 2 und 3 ($p > 0.2$).

Wie bei der Eingabe des ersten Buchstabens zeigte sich wieder die Interaktion zwischen den Faktoren Aufgabe und relative Aufgabenhäufigkeit (Abbildung 3-13; $F(1.6,42.6) = 3.83, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.12$). Bei einer relativen Aufgabenhäufigkeit von 0.23 zeigte sich eine deutliche Abnahme der Gesamteingabezeit zwischen Aufgabe 1 und 2, bei einer relativen Aufgabenhäufigkeit von 0.77 nur eine minima-

le Abnahme der Gesamteingabezeit von Aufgabe 1 zu Aufgabe 3. Wechselkosten traten damit vor allem bei seltenen Aufgaben auf.

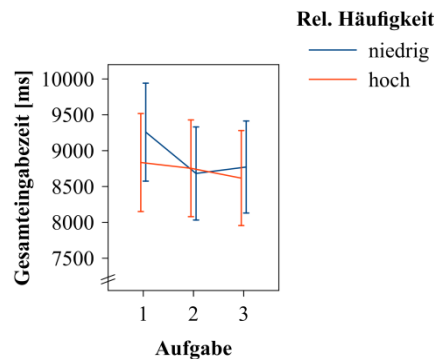


Abbildung 3-13: Mittlere Gesamteingabezeit [ms] in Abhängigkeit von der Aufgabe und der relativen Häufigkeit der Aufgabe. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Es trat wiederum ein signifikanter Unterschied zwischen den Skalierungen der Anzeige ($F(1,27) = 130.41, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.83$) auf: Die Gesamteingabezeit war bei der großen Skalierung geringer. Außerdem zeigte sich ein Effekt der Alterskategorie ($F(1,27) = 16.58, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.38$): Ältere Probanden benötigten mehr Zeit für die Eingabe. Für die Eingabe des gesamten Wortes interagierten (Abbildung 3-14; $F(1,27) = 7.48, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.22$) diese Haupteffekte derart, dass ältere Probanden eine größere Steigerung der Gesamteingabezeit bei kleiner Skalierung der Anzeige zeigten als jüngere Probanden, das heißt, die Verkleinerung wirkte sich bei älteren Probanden negativer aus.

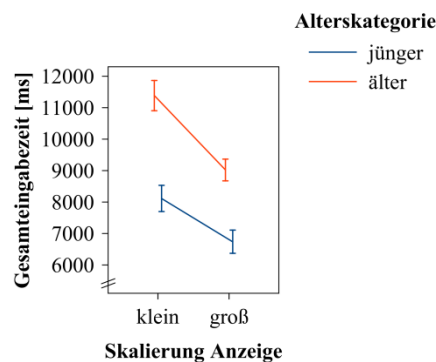


Abbildung 3-14: Mittlere Gesamteingabezeit [ms] in Abhängigkeit von der Skalierung der Anzeige und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Relativer Fehler

Im relativen Fehler der Ersteingaben (Abbildung 3-16 links) zeigte sich ein Effekt der Skalierung der Anzeige: Bei großer Skalierung ($M = 0.053, SD = 0.111$) war der relative Fehler größer als bei kleiner Skalierung ($M = 0.027, SD = 0.070; F(1,28) = 6.77, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.20$).

Die Skalierung der Anzeige interagierte mit dem Faktor Aufgabe (Abbildung 3-15; $F(1.9,53.2) = 5.65, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.17$): Bei großer Skalierung nahm der relative Fehler der Ersteingaben von Aufgabe 1 zu Aufgabe 2 und 3 ab, bei kleiner Skalierung minimal zu.

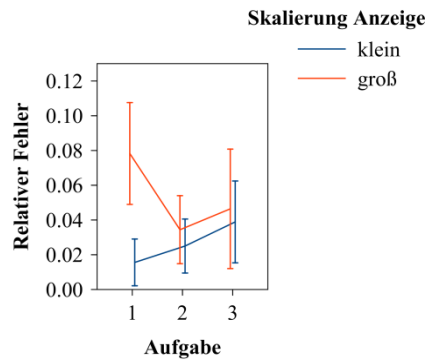


Abbildung 3-15: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des ersten Buchstabens in Abhängigkeit von der Aufgabe und der Skalierung der Anzeige. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

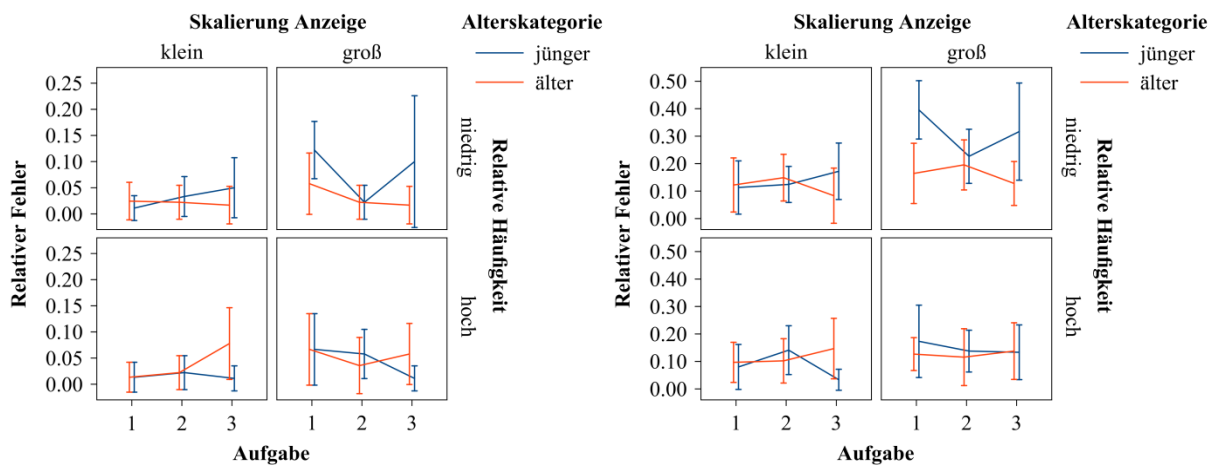


Abbildung 3-16: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit von der Aufgabe, der Skalierung der Anzeige, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Beim Gesamtwort bezieht sich der relative Fehler auf die Zahl der Aufgaben, in denen mindestens ein Fehler aufgetreten ist. Wie in der Analyse von generellen Skalierungseffekten war der relative Fehler erneut ziemlich hoch. In der Eingabe des Gesamtwortes (Abbildung 3-16 rechts) zeigte sich außerdem der Effekt der Anzeigenskalierung ($F(1,28) = 15.80, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.36$): Bei großer Skalierung ($M = 0.188, SD = 0.205$) war der relative Fehler größer als bei kleiner Skalierung ($M = 0.114, SD = 0.157$).

Daneben zeigte sich ein Effekt der Häufigkeit einer Aufgabe ($F(1,28) = 12.53, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.31$), wobei dieser mit der Alterskategorie interagierte (Abbildung 3-17; $F(1,28) = 6.71, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.19$): Jüngere Probanden zeigten bei Aufgaben mit niedriger relativer Häufigkeit einen erhöhten relativen Fehler verglichen mit häufigeren Aufgaben.

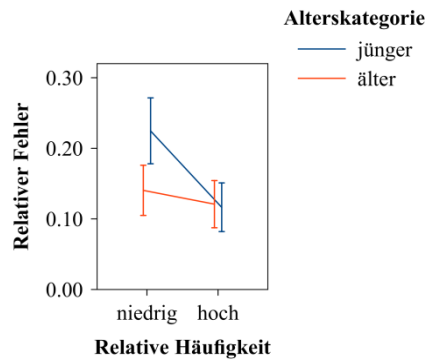


Abbildung 3-17: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des gesamten Wortes in Abhängigkeit von der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Zusätzlich ließ sich eine Interaktion der relativen Aufgabenhäufigkeit, der Aufgabe und der Alterskategorie feststellen (Abbildung 3-18; $F(1.8,51.5) = 3.84$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.12$). Jüngere Probanden zeigten bei seltenen Aufgaben zwischen Aufgabe 1 und 2 eine Abnahme des relativen Fehlers, zwischen Aufgabe 2 und 3 eine Zunahme, ältere Probanden dagegen bei seltenen Aufgaben zwischen Aufgabe 1 und 2 eine leichte Zunahme des relativen Fehlers, zwischen Aufgabe 2 und 3 eine Abnahme.

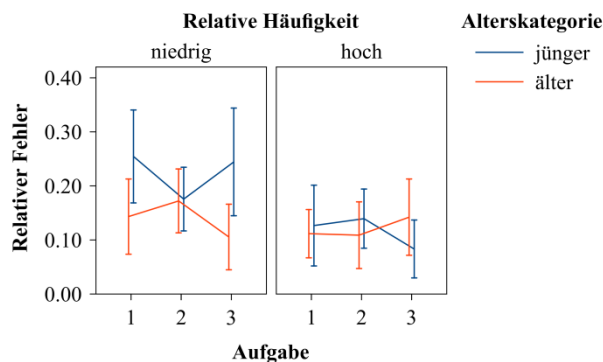


Abbildung 3-18: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des gesamten Wortes in Abhängigkeit von der Aufgabe, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Weg auf dem Touchpad

Im zurückgelegten Weg auf dem Touchpad für den ersten Buchstaben (Abbildung 3-20 links) zeigte sich ein Haupteffekt der Aufgabe ($F(2.0,54.9) = 15.73$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.36$). Post hoc Bonferroni Tests zeigten, dass der Weg auf dem Touchpad in Aufgabe 1 ($M = 31.3$ mm, $SD = 9.8$ mm) länger war als in Aufgabe 2 ($M = 28.4$ mm, $SD = 7.9$ mm; $p < 0.01$) und Aufgabe 3 ($M = 26.9$ mm, $SD = 8.0$ mm; $p < 0.01$). Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen Aufgabe 2 und 3 ($p > 0.1$).

Es zeigte sich eine Interaktion des Faktors Aufgabe zur Skalierung der Anzeige (Abbildung 3-19; $F(1.8,51.6) = 5.14$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.16$): Bei kleiner Skalierung zeigte sich die Reduktion des Touchpadweges zwischen Aufgabe 1 und 2, bei großer Skalierung kontinuierlich von Aufgabe 1 zu Aufgabe 3.

3 Experiment I

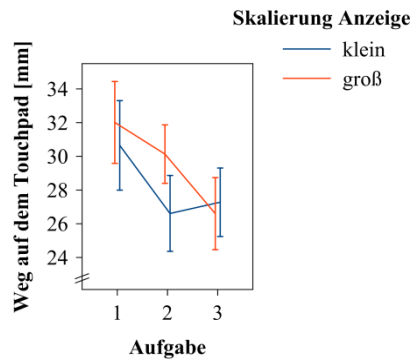


Abbildung 3-19: Mittlerer Weg auf dem Touchpad [mm] für die Eingabe des ersten Buchstabens in Abhängigkeit von der Aufgabe und der Skalierung der Anzeige. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

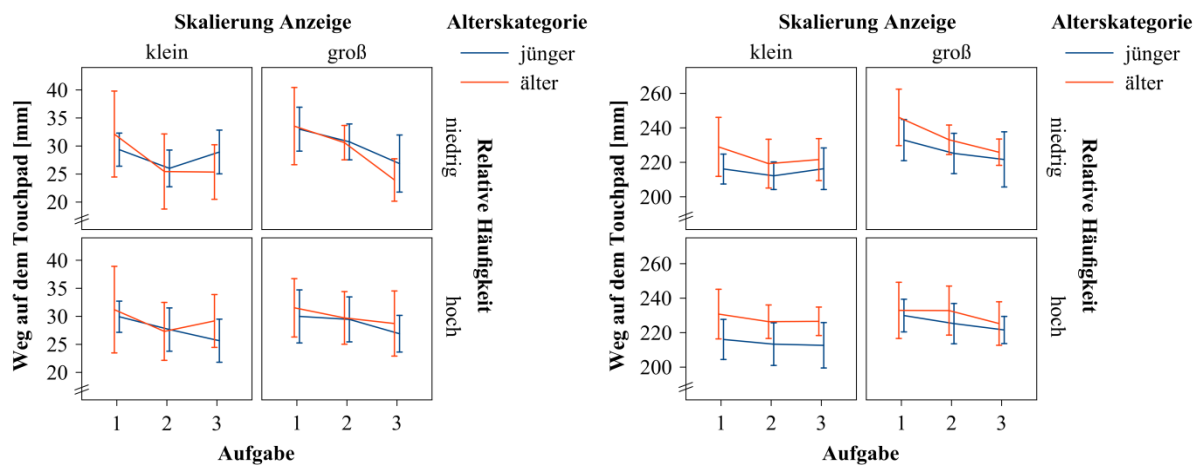


Abbildung 3-20: Mittlerer Weg auf dem Touchpad [mm] für die Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit von der Aufgabe, der Skalierung der Anzeige, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Für die Eingabe des Gesamtwortes (Abbildung 3-20 rechts) zeigten sich die gleichen Effekte. In Aufgabe 1 ($M = 229.2$ mm, $SD = 25.5$ mm; $F(1.5, 41.6) = 15.76$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.37$) legten die Probanden einen längeren Weg auf dem Touchpad zurück als in Aufgabe 2 ($M = 223.4$ mm, $SD = 21.5$ mm; $p < 0.01$) und Aufgabe 3 ($M = 221.4$ mm, $SD = 20.5$ mm; $p < 0.01$). Im post hoc Bonferroni Test gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen Aufgabe 2 und 3 ($p > 0.2$). Aufgabe und Skalierung der Anzeige interagierten (Abbildung 3-21; $F(1.8, 49.5) = 7.62$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.22$) wiederum derart, dass die Abnahme des Touchpadweges bei großer Skalierung kontinuierlich von Aufgabe 1 zu Aufgabe 3 erfolgte, bei kleiner Skalierung nur zwischen Aufgabe 1 und Aufgabe 2.

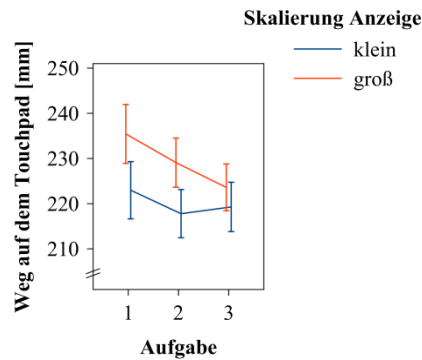


Abbildung 3-21: Mittlerer Weg auf dem Touchpad [mm] für die Eingabe des gesamten Wortes in Abhängigkeit von der Aufgabe und der Skalierung der Anzeige. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Daneben ließ sich ein Haupteffekt der Skalierung der Anzeige ($F(1,27) = 39.54, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.59$) feststellen. Bei großer Skalierung ($M = 229.4$ mm, $SD = 22.6$ mm) war der Touchpadweg länger als bei kleiner Skalierung ($M = 220.0$ mm, $SD = 22.1$ mm).

Spurabweichung

Im Betrag der Spurabweichung (Abbildung 3-22 links) zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Aufgaben ($F(1.7,48.2) = 3.84, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.12$). Post hoc Bonferroni Tests zeigten, dass der Betrag der Spurabweichung bei Aufgabe 1 ($M = 0.59$ m, $SD = 0.24$ m) geringfügig, aber signifikant höher war als bei Aufgabe 3 ($M = 0.56$ m, $SD = 0.23$ m; $p < 0.01$). Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen Aufgabe 1 und 2 ($M = 0.58$ m, $SD = 0.25$ m) beziehungsweise Aufgabe 2 und 3 (jeweils $p > 0.2$). Außerdem wiesen ältere Probanden ($M = 0.66$ m, $SD = 0.27$ m) einen höheren Betrag der Spurabweichung (Abbildung 3-10 links) auf als jüngere Probanden ($M = 0.49$ m, $SD = 0.14$ m; $F(1,28) = 5.74, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.17$). Daneben zeigte sich, dass der Betrag der Spurabweichung bei kleiner Skalierung der Anzeige ($M = 0.59$ m, $SD = 0.24$ m) höher war als bei großer Skalierung ($M = 0.56$ m, $SD = 0.23$ m; $F(1,28) = 9.97, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.26$).

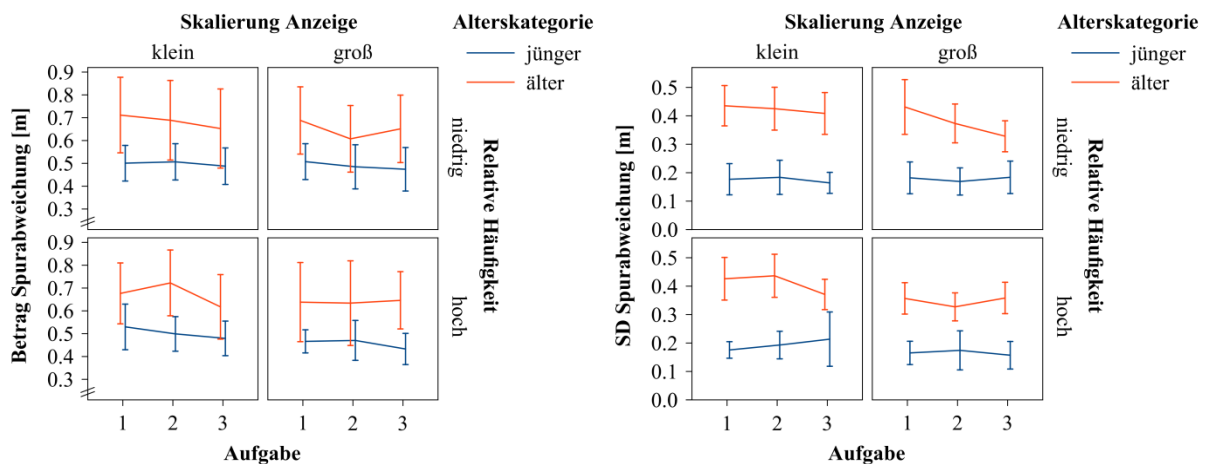


Abbildung 3-22: Mittlerer Betrag der Spurabweichung [m] (links) und mittlere SD der Spurabweichung [m] (rechts) in Abhängigkeit von der Aufgabe, der Skalierung der Anzeige, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

3 Experiment I

Die Faktoren Alterskategorie ($F(1,28) = 52.28, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.65$) und Skalierung der Anzeige ($F(1,28) = 19.03, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.41$) wiesen auch für die SD der Spurabweichung (Abbildung 3-22 rechts) signifikante Unterschiede auf. Ältere ($M = 0.39$ m, $SD = 0.13$ m) zeigten eine höhere SD der Spurabweichung als jüngere Probanden ($M = 0.18$ m, $SD = 0.10$ m). Bei kleiner Skalierung der Anzeige ($M = 0.30$ m, $SD = 0.16$ m) war die SD der Spurabweichung höher als bei großer Skalierung ($M = 0.27$ m, $SD = 0.14$ m). Zusätzlich ließ sich eine Interaktion der Faktoren (Abbildung 3-23; $F(1,28) = 7.44, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.21$) feststellen. Bei älteren Probanden war die SD der Spurabweichung bei kleiner Skalierung überproportional erhöht.

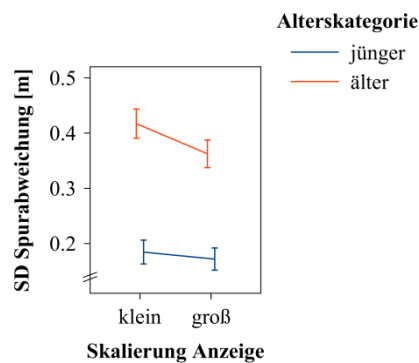


Abbildung 3-23: Mittlere SD der Spurabweichung [m] in Abhängigkeit von der Skalierung der Anzeige und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Fazit Wechselkosten

Nach einem unerwarteten Wechsel der visuellen Skalierung ließen sich bei der Eingabe des ersten Buchstabens Wechselkosten von 145 ms (Unterschied Aufgabe 1 und 2), bei der Eingabe des Gesamtwortes von 329 ms (Unterschied Aufgabe 1 und 2) feststellen. Die Wechselkosten waren in seltenen Aufgaben deutlicher ausgeprägt. Bezüglich des Touchpadweges zeigten sich Wechselkosten von 2.9 und 4.4 mm bei der Eingabe des ersten Buchstabens, von 5.8 und 7.8 mm bei der Eingabe des Gesamtwortes. Abhängig von der gegebenen Skalierung der Anzeige ließen sich diese in der ersten Wiederholung oder in beiden Wiederholungen feststellen. Auch in der Fahraufgabe ließen sich Effekte des unerwarteten Wechsels auf die Spurhaltung zeigen. Der Betrag der Spurabweichung war in der zweiten Wiederholung niedriger als nach dem Wechsel.

In den Fehlermaßen zeigten sich uneinheitliche Effekte: Hinsichtlich der Ersteingaben zeigte sich in der Aufgabe nach einem unerwarteten Wechsel bei großer Skalierung der Anzeige ein erhöhter relativer Fehler, bei kleiner Skalierung zeigten sich eher Wechselgewinne. Für das Gesamtwort ließen sich keine systematisch erklärbaren Effekte zeigen.

Neben den Wechselkosten zeigten sich typische Alterseffekte: Ältere Probanden waren langsamer bei der Ausführung der Aufgabe und zeigten eine höhere Ablenkung als jüngere Probanden.

3.3.4 Mischkosten

Als Nachweis von Mischkosten sollten sich Vorteile der Baseline gegenüber den Wiederholungen in gemischten Blöcken ergeben. Mischkosten wurden daher über den Vergleich der mittleren Leistung in einer Aufgabe (A_B) in der Baseline und der Wiederholung (A_2) dieser Aufgabe in gemischten Blöcken berechnet. Es wurde zusätzlich unterschieden, ob die Aufgabe im gemischten Block eine hohe (0.77) oder niedrige (0.23) relative Häufigkeit hatte.

Im Folgenden sollen nur Ergebnisse berichtet werden, die für die Hypothese von Mischkosten relevant sind, das heißt, bei denen der Faktor Block zu einem signifikanten Effekt führt.

Ersteingabe- und Gesamteingabezeit

In der Ersteingabezeit (Abbildung 3-24 links) zeigte sich ein Effekt des Blocks ($F(1.6,46.0) = 4.28$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.13$). Post hoc Bonferroni Tests zeigten einen Unterschied zwischen Baseline und seltenen Aufgaben im gemischten Block ($p < 0.01$), der allerdings gegen Mischkosten spricht: Die Probanden benötigten in der Baseline ($M = 1793$ ms, $SD = 556$ ms) mehr Zeit für die Eingabe des ersten Buchstabens als bei seltenen Aufgaben im gemischten Block ($M = 1656$ ms, $SD = 541$ ms). Der Unterschied zwischen häufigen Aufgaben im gemischten Block und der Baseline beziehungsweise der Unterschied zwischen den beiden gemischten Blöcken war nicht signifikant (jeweils $p > 0.1$).

Dieser Effekt des Blocks zeigte sich auch ($F(1.9,52.5) = 3.33$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.11$) für die Gesamteingabezeit (Abbildung 3-24 rechts): Die Probanden benötigten in der Baseline ($M = 8990$ ms, $SD = 2459$ ms) tendenziell länger für die Eingabe des gesamten Wortes als bei seltenen Aufgaben im gemischten Block ($M = 8682$ ms, $SD = 2513$ ms; $p < 0.1$). Die anderen post hoc Vergleiche waren erneut nicht signifikant (jeweils $p > 0.2$).

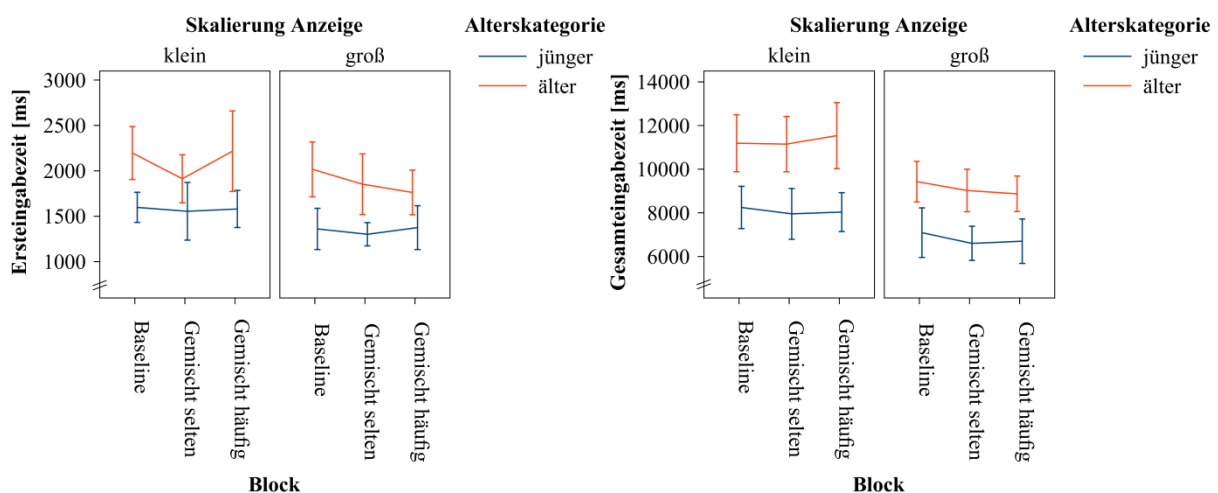


Abbildung 3-24: Mittlere Ersteingabezeit [ms] (links) und Gesamteingabezeit [ms] (rechts) in Abhängigkeit vom Block, der Skalierung der Anzeige und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Relativer Fehler

Im relativen Fehler der Ersteingaben (Abbildung 3-25 links) zeigte sich ein signifikanter Effekt des Blocks ($F(1.7,47.8) = 4.41, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.14$). Post hoc Bonferroni Tests zeigten, dass der relative Fehler in der Baseline ($M = 0.040, SD = 0.046$) signifikant höher war als bei seltenen Aufgaben im gemischten Block ($M = 0.025, SD = 0.060; p < 0.01$) und tendenziell höher war als bei häufigen Aufgaben im gemischten Block ($M = 0.034, SD = 0.075; p < 0.1$). Zwischen den beiden gemischten Blöcken zeigte sich kein Unterschied ($p > 0.2$).

Für die Eingabe des Gesamtwortes (Abbildung 3-25 rechts) zeigte sich ebenfalls ein signifikanter Unterschied zwischen den Blöcken ($F(1.6,43.5) = 8.26, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.23$), wobei der relative Fehler in der Baseline ($M = 0.171, SD = 0.121$) höher als bei häufigen Aufgaben in gemischten Blöcken war ($M = 0.126, SD = 0.156; p < 0.01$). Zwischen der Baseline und den seltenen Aufgaben im gemischten Block ($M = 0.174, SD = 0.157$) und zwischen den beiden gemischten Blöcken zeigte sich kein signifikanter Unterschied im post hoc Test (jeweils $p > 0.1$).

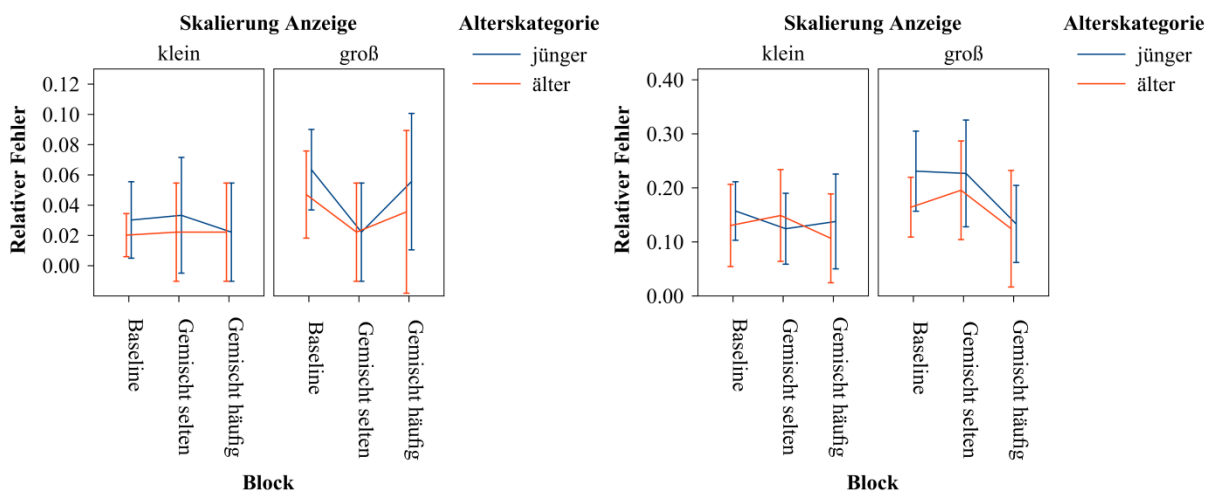


Abbildung 3-25: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit vom Block, der Skalierung der Anzeige und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Fazit Mischkosten

Sowohl in der Bediengeschwindigkeit als auch der Bediengenauigkeit ließen sich keine Mischkosten, also Vorteile der Baseline gegenüber gemischten Blöcken, zeigen. Im Gegenteil benötigten die Probanden in der Baseline sogar länger als in seltenen Aufgaben in gemischten Blöcken. Auch der relative Fehler war in der Baseline verglichen zu den gemischten Blöcken eher erhöht.

3.4 Diskussion

Wie eingangs erläutert, untersucht diese Arbeit - im Kontext der Doppelaufgabensituation Fahren und Bedienen - verschiedene Gestaltungsaspekte von Touchpadbedienkonzepten und deren Auswirkung auf die sensomotorische Leistungsfähigkeit des Nutzers. Ziel des vorliegenden Experiments war es dabei, den Einfluss der Skalierung der Anzeige auf die sensomotorische Leistungsfähigkeit zu prüfen.

Zur Untersuchung des Skalierungseinflusses wurde die Bedienung auf zwei unterschiedlich große Ausschnitte der Anzeige abgebildet und Kenngrößen der sensomotorischen Leistungsfähigkeit des Nutzers erhoben. Eine weitere Fragestellung war es, ob sich variable Skalierungen, die aufgrund der Flexibilität von Touchpadbedienkonzepten denkbar sind, negativ auf die sensomotorische Leistungsfähigkeit auswirken. Um mögliche Kosten variabler Skalierungen zu erfassen, wurde das Wechselkostenparadigma herangezogen. Ein Auftreten von Wechsel- oder Mischkosten in der sensomotorischen Leistungsfähigkeit der Nutzer würde dabei gegen variable Konzepte sprechen. Als Versuchsaufgabe gaben die Probanden über ein Touchpad Ortsnamen auf einer auf der Anzeige dargestellten QWERTZ-Tastatur ein, während sie eine Spurhaltungsaufgabe in der Fahrsimulation ausführten.

3.4.1 Skalierungseffekt der Anzeige

Wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben, zeigten sich deutliche Skalierungseffekte der Anzeige. Wurde die Versuchsaufgabe auf der gesamten Anzeige (800 x 480 px) dargeboten, dauerte die Eingabe sowohl des ersten Buchstabens als auch des gesamten Wortes zu beiden Messzeitpunkten weniger lang als bei kleinerer Skalierung (400 x 240 px) der Anzeige. Dementsprechend schätzten die Probanden die Bearbeitung bei kleinerer Skalierung der Anzeige schwieriger ein als bei Darbietung auf der gesamten Anzeige. Da alle Probanden normalsichtig oder korrigiert normalsichtig waren und einen Visus-Wert (auf Bildschirmdistanz ermittelt) von mindestens 0.8 hatten, sind Probleme mit der generellen Lesbarkeit der Tastatur auf der geringeren Anzeigefläche als Ursache für diese Skalierungseffekte eher unwahrscheinlich. Nachdem die Abläufe und Wege auf der motorischen Ebene in beiden Anzeigebedingungen gleich waren, kann hier ebenfalls keine Ursache der Unterschiede zwischen den Anzeigeskalierungen liegen. Gleichzeitig traten außerdem unerwartete, entgegengesetzte Effekte in den Fehlermaßen auf: Der relative Fehler bei Bearbeitung der Versuchsaufgabe war sowohl beim ersten Buchstaben als auch beim gesamten Wort auf der großen Anzeigefläche höher als bei kleinerer Skalierung der Anzeige. Im Touchpadweg und in der Spurabweichung ließ sich kein Effekt der Anzeigeskalierung feststellen.

Wie eingangs beschrieben, ist allen Bewegungen und insbesondere Zielbewegungen ein Abgleich zwischen Bewegungsgeschwindigkeit und -genauigkeit inhärent, das heißt, dass mit zunehmender Bewegungsgeschwindigkeit die Bewegungsgenauigkeit abnimmt. Die entgegengesetzten Befunde hinsichtlich der Eingabezeit und den auftretenden Fehlern könnten in diesem Zusammenhang interpretiert werden¹⁵: Die Nutzung einer größeren Anzeigeskalierung scheint zu einer schnelleren, aber gleichzeitig ungenaueren Bedienung zu führen, das heißt, dass die Veränderung der Anzeigeskalierung den Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich der Zielbewegung beeinflusst. Die Aufgabe könnte bei kleinerer Anzeigefläche schwieriger erscheinen, was sich auch in der subjektiven Bewertung widerspiegelt. Diese Wahrnehmung einer schwierigeren Aufgabe könnte zu einer (bewussten oder

¹⁵ In der Instruktion wurden die Probanden in beiden Anzeigebedingungen darauf hingewiesen, so schnell und so genau wie möglich zu bedienen.

unbewussten) Verschiebung des Fokus in der Bearbeitung hin zu einer genaueren Bedienung auf Kosten der Geschwindigkeit führen. Dadurch ist bei kleinerer Skalierung der Anzeige der relative Fehler geringer, aber die Ersteingabe- und Gesamteingabezeit erhöht.

Folgt man dieser Interpretation, kann keine generelle Empfehlung hinsichtlich der Skalierung der Anzeige abgeleitet werden und die Vorteile des größeren Anzeigebereichs sollten vorsichtig interpretiert werden: Die Darstellung der Versuchsaufgabe oder einer Bedienaufgabe im späteren Zielsystem auf einem größeren Anzeigebereich scheint eine schnellere Bedienung zu begünstigen, die allerdings fehleranfälliger ist. Allerdings könnte der auftretende Effekt eventuell dazu genutzt werden, beim Nutzer eine bestimmte Bearbeitungsstrategie (schnell vs. genau) zu fördern.

Wie eingangs beschrieben, schaffen Nebenaufgaben in der Fahrsituation eine Mehraufgabensituation und können nach den Ressourcenmodellen zu Leistungseinbußen führen, wenn sie die gleichen Ressourcen benötigen (Wickens, 2008). Bei einer visuell-manuellen Nebenaufgabe, wie sie bei einer Bediensituation mit visuellem Feedback vorhanden ist, kann aufgrund des Bedarfs nach ähnlichen Ressourcen mit Interferenz zur Fahraufgabe gerechnet werden (Mattes & Hallén, 2009; Dingus et al., 2011). Außerdem wird die Leistung in der Primäraufgabe umso geringer, je komplexer die Nebenaufgabe ist.

Als Kenngröße für die Ressourcenanforderung der Bedienaufgabe wurde die Spurabweichung in der Fahraufgabe aufgezeichnet, wobei eine bessere Spurhaltung (niedrigere Spurabweichung) für eine geringere Belastung der Ressourcen durch die Bediensituation spricht, was als eine geringere Ablenkung von der Fahraufgabe gewertet wird. Zwischen den beiden Anzeigebedingungen wurden allerdings keine Unterschiede in der Spurabweichung ermittelt. Es wird daher angenommen, dass sich die Anzeigenskalierungen im Bedarf von Ressourcen nicht unterscheiden und in gleichem Maße von der Fahrsituation ablenken.

3.4.2 Wechselkosten bei Änderung der Skalierung der Anzeige

Neben generellen Effekten der Anzeigeskalierung sollte geprüft werden, wie sich unerwartete Wechsel der Anzeigeskalierung auf die Leistungsfähigkeit auswirken, das heißt, in welchem Rahmen der Nutzer mit der Flexibilität absoluter Touchpadbedienkonzepte umgehen kann. Unerwartete Wechsel der visuellen Skalierung führten zu deutlichen Wechselkosten sowohl in der Ersteingabe- als auch in der Gesamteingabezeit. In der Aufgabe direkt nach einem Skalierungswechsel waren die Ersteingabe- und Gesamteingabezeit verglichen mit der darauffolgenden Wiederholungsaufgabe erhöht. Wechselkosten ließen sich ebenfalls im Touchpadweg - wiederum für die Eingabe des ersten Buchstabens und des Gesamtwortes - feststellen. Der Touchpadweg war in der Aufgabe direkt nach einem Wechsel höher als in der Wiederholungsaufgabe. Abhängig von der Skalierung der Anzeige ließen sich die Wechselkosten in der ersten Wiederholung oder in beiden Wiederholungen feststellen. Dies spricht für eine ungenauere Bedienung in der Aufgabe nach einem Wechsel verglichen zu Wiederholungsaufgaben. Auch im untersuchten angewandten Kontext zeigen sich damit Wechselkosten. Diese entstehen ver-

mutlich dadurch, dass das mentale Aufgaben-Set (Meiran, 2010) den veränderten Aufgabenbedingungen angepasst werden muss, was zu einer verlangsamten (Ersteingabe- und Gesamteingabezeit) und ungenaueren (Touchpadweg) Bedienung führt.

Unerwartet war, dass die beobachteten Wechselkosten in der Ersteingabe- und Gesamteingabezeit in seltenen Aufgaben deutlicher ausgeprägt waren. Der Prozess der retroaktiven Anpassung (Meiran, 1996; Meiran, 2010), der den Wechsel zwischen Aufgaben erschwert, könnte einen Erklärungsansatz für die Befunde bieten. Dieser Prozess beinhaltet, dass sich das kognitive System auf die Ausführung einer Aufgabe A optimiert und die Parameter entsprechend feinjustiert. Diese Feinjustierung behindert die Ausführung einer nachfolgenden Aufgabe B. Bei häufig durchgeführten Aufgaben könnte diese Feinjustierung gegebenenfalls weiter vorangeschritten sein und den Wechsel zu den seltenen Aufgaben damit stärker behindern. Die Anpassung an seltene Aufgaben könnte dagegen weniger stark sein, da diese nicht so häufig am Stück durchgeführt werden.

Auch in der Fahraufgabe ließen sich Effekte des unerwarteten Wechsels auf die Spurhaltung zeigen. Der Betrag der Spurabweichung war in der zweiten Wiederholung niedriger als nach dem Wechsel. Das bedeutet, in der Aufgabe direkt nach einem Wechsel zeigt sich eine schlechtere Spurhaltung und somit eine schlechtere Leistung in der Fahraufgabe.

Wie eingangs erläutert (vgl. Abschnitt 1.1.4), diente die Spurabweichung in der Fahraufgabe als Kenngröße für die Ressourcenanforderung der Bedienaufgabe. Nach den Ressourcenmodellen (Wickens, 2008) zeigen sich in der Mehraufgabensituation Leistungseinbußen verglichen mit der einzelnen Ausführung der Aufgaben, sofern die gleichzeitig ausgeführten Aufgaben ähnliche Ressourcen benötigen. Das Ausmaß des Leistungsabfalls wird durch die beiden Aspekte Ressourcenbedarf und Ressourcenüberlappung bestimmt (Wickens, 2008).

Die Überlappung von Ressourcen zwischen Fahr- und Bedienaufgabe entspricht sich in Aufgaben nach einem Wechsel und in den Wiederholungsaufgaben und kann daher als Ursache für den Leistungsabfall in Aufgaben nach einem Wechsel ausgeschlossen werden. Stattdessen wird der Ressourcenbedarf, also die Menge an benötigten Ressourcen, als Ursache für den Unterschied vermutet. Eine bessere Spurhaltung (niedrigere Spurabweichung) spricht für eine geringere Belastung der Ressourcen durch die Bediensituation, was als eine geringere Ablenkung von der Fahraufgabe gewertet wird. Nachdem die Spurhaltung nach einem Skalierungswechsel schlechter ist als in Wiederholungsaufgaben, scheint die Verarbeitung des Skalierungswechsels mehr Ressourcen zu benötigen als die reine Bedienung in Wiederholungsaufgaben. Durch den erhöhten Ressourcenbedarf lenken Aufgaben nach einem Wechsel stärker von der Fahraufgabe ab, was sich in der schlechteren Spurhaltung niederschlägt. Es ist allerdings anzumerken, dass der beschriebene Unterschied in der Spurabweichung zwischen der Aufgabe nach einem Wechsel und der Wiederholungsaufgabe sehr geringfügig war.

In den Fehlermaßen ließen sich keine einheitlichen Effekte feststellen. In der Aufgabe nach einem unerwarteten Wechsel zeigte sich bei großer Skalierung der Anzeige eine erhöhte relative Häufigkeit

fehlerhafter Eingaben des ersten Buchstabens, bei kleiner Skalierung der Anzeige zeigten sich eher Wechselgewinne. Für das Gesamtwort ließen sich keine systematischen Effekte zeigen.

Insgesamt legen die Befunde nahe, dass unerwartete Wechsel in der Skalierung der Anzeige die Leistungsfähigkeit des Nutzers reduzieren. Nach einem Wechsel wird sowohl langsamer (siehe Erst-eingabe- und Gesamteingabezeit) als auch ungenauer (siehe Touchpadweg) bedient als in Wiederholungs-aufgaben. Außerdem scheinen durch den Wechsel mehr Verarbeitungsressourcen benötigt zu werden als in Wiederholungsaufgaben, was sich in einer geringfügig verschlechterten Leistung in der Fahraufgabe widerspiegelt. Aufgrund der auftretenden Wechselkosten sind gemischte visuelle Skalierungen als ungünstig zu bewerten. Wenn möglich, sollte daher die Skalierung des Anzeigehalts bei absoluter Touchpadbedienung innerhalb eines Menüs konstant gehalten werden.

3.4.3 Mischkosten

Neben der Untersuchung von Wechselkosten im engeren Sinne sollten als weitere Wechseleffekte auftretende Mischkosten betrachtet werden. Mischkosten sind relativ globale Kosten und entstehen dadurch, dass in einem Aufgaben-Block Wechsel auftreten können (Kiesel et al., 2010).

Allerdings ließen sich weder in der Bediengeschwindigkeit noch in der Bediengenauigkeit Mischkosten, also Vorteile der Baseline gegenüber gemischten Blöcken, zeigen. Unerwarteter Weise traten gegenläufige Effekte auf: Die Probanden benötigten in der Baseline sogar mehr Zeit für die Eingabe des ersten Buchstabens sowie des gesamten Wortes als in seltenen Aufgaben in gemischten Blöcken. Auch der relative Fehler war in der Baseline verglichen zu den gemischten Blöcken eher erhöht. Dementsprechend lassen die Ergebnisse nicht auf Mischkosten schließen.

Diese Befunde stehen den Erwartungen auf Grundlage des Wechselkostenparadigmas entgegen. Ein Block, in dem die Probanden immer die gleiche Aufgabenskalierung bearbeiten, sollte gegenüber gemischten Blöcken aus der Sicht des Wechselkostenparadigmas Vorteile oder zumindest keine Nachteile zeigen. Die Probanden können sich in Baseline-Blöcken auf die zu bearbeitenden Aufgaben perfekt vorbereiten und es sind keine Wechsel und damit keine Anpassungen des mentalen Aufgaben-Sets (Meiran, 2010) nötig.

Eine mögliche Erklärung für den gegenläufigen Effekt könnte ein Motivationseffekt der Probanden sein: Die Probanden könnten die gemischten Blöcke als anspruchsvoller einschätzen und auf die vermeintlich höhere Schwierigkeit mit einer gesteigerten Motivation reagieren. Durch eine gesteigerte Anstrengung der Probanden werden Mischeffekte gegebenenfalls kompensiert oder überkompensiert.

Als weitere Ursache für die vereinzelt auftretenden Mischgewinne und für das fehlende Auftreten von Mischkosten könnten methodische Gründe vermutet werden. Es wäre möglich, dass die Bedienung in den kürzeren Baseline-Blöcken (je 10 Aufgaben) nicht mit den längeren gemischten Blöcken (je 78 Aufgaben) vergleichbar war (vgl. Abschnitt 3.2.6, Versuchsablauf). Die länger andauernde Bedienung in gemischten Blöcken hat gegebenenfalls zu einem besseren Bedienfluss geführt, weshalb die Be-

diengeschwindigkeit und -genauigkeit erhöht war. Ein derartiges methodisches Problem ließe sich über eine bessere Vergleichbarkeit hinsichtlich der enthaltenen Aufgabenzahlen zwischen Baseline und gemischten Blöcken lösen.

3.4.4 Alterseffekte

In mehreren Maßen zeigten sich typische Alterseffekte: Ältere benötigten mehr Zeit für die Eingabe, bewerteten die Versuchsaufgabe als schwieriger und zeigten eine höhere Spurabweichung in der Fahraufgabe als jüngere Probanden. Im relativen Fehler trat jedoch kein Altersunterschied auf.

Diese Befunde könnten anhand des Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleichs interpretiert werden. Wie eingangs beschrieben, lassen sich altersbedingte Veränderungen des Bewegungsapparates feststellen, Reaktions- und Bewegungszeiten werden langsamer und die Bewegungsgenauigkeit (im Sinne einer erhöhten Variabilität der Bewegungsendpunkte und der Phasen einer Bewegung) wird geringer (Rinkenauer, 2008; Ketcham & Stelmach, 2004). Dementsprechend zeigen ältere Personen langsamere Zielbewegungen (Heuer & Hegele, 2006). Im Abgleich von Bewegungsgeschwindigkeit und -genauigkeit zeigen Ältere eine Tendenz zur Genauigkeit auf Kosten der Geschwindigkeit und benötigen bei gleichem Präzisionslevel mehr Zeit für die Bewegung als jüngere Probanden (Ketcham & Stelmach, 2004).

Die erhobenen Daten stehen damit im Einklang zu den in der Literatur berichteten Befunden. Ältere scheinen ein Defizit in der Aufgabenbearbeitung durch eine langsamere Bedienung zu kompensieren und eine Verschiebung des Geschwindigkeits-Genauigkeits-Profiles zu zeigen. Bei gleichbleibender Genauigkeit bedienen sie langsamer als jüngere Probanden.

Wie bereits in den vorangehenden Abschnitten erläutert, wurde die Spurabweichung in der Fahraufgabe als Kenngröße für die Ressourcenanforderung (vgl. Theorie multipler Ressourcen; Wickens, 2008) erhoben. Als stabiles Ergebnis wiesen ältere Probanden eine höhere Spurabweichung als jüngere Probanden auf. Ältere haben eventuell generell weniger Ressourcen zur Verfügung und zeigen daher eine geringere Leistung in der Fahraufgabe. Es wäre auch möglich, dass die Aufgabenbearbeitung für ältere Probanden mehr Ressourcen beansprucht, weil diesen die Aufgabe schwerer fällt (vgl. Beurteilung der Versuchsaufgabe), wodurch die Leistung in der Fahraufgabe verringert wird. Zusätzlich könnte ein Effekt der Ressourcenzuteilung auftreten: Um eine gleichbleibende Genauigkeit der Bearbeitung zu ermöglichen (kein erhöhter relativer Fehler verglichen zu jüngeren Probanden), obwohl die Genauigkeit der Bedienung im Alter abnimmt (vgl. Ketcham & Stelmach, 2004), werden mehr Ressourcen in die Bedienaufgabe investiert. Dies könnte nicht nur Auswirkungen auf die Bediengeschwindigkeit (verschobener Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich), sondern zusätzlich auf die Spurhaltung haben. Die genauen Ursachen der verringerten Leistung in der Fahraufgabe können nicht abschließend geklärt werden. Die schlechtere Spurhaltung spricht allerdings für eine erhöhte Ablenkung von der Fahraufgabe durch die Doppelaufgabensituation.

Als Alternativerklärung wäre außerdem denkbar, dass ältere Probanden eine schlechtere Spurhaltung zeigen, weil ihnen der Umgang mit der Fahrsimulation generell schwerer fällt, da sie mit derartigen Settings weniger geübt sind. Dies ließe sich beispielsweise überprüfen, indem eine reine Fahrsituation zwischen jüngeren und älteren Probanden verglichen würde und sollte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

3.4.5 Ausblick

Ein bemerkenswerter Befund, auf den an dieser Stelle hingewiesen werden soll, war der generell hohe relative Fehler bei der Eingabe des gesamten Wortes. Dieser lag bei großer Skalierung der Anzeige bei durchschnittlich 0.197, bei kleiner Skalierung der Anzeige bei durchschnittlich 0.144. Damit tritt in ungefähr jeder fünften oder siebten (je nach Anzeigenskalierung) Aufgabe mindestens ein Fehler auf. Fehlbedienungen sind im Kontext der Doppelaufgabensituation nachteilig, da sie eine Korrekturhandlung erfordern und dadurch die Bedienhandlung verlängern - es ergibt sich also während der Fahraufgabe eine verlängerte Ablenkung. Der erhöhte relative Fehler soll an dieser Stelle noch zu keiner Änderung von Versuchsaufgabe und Bedienkonzept führen, sollte aber im Verlauf der nächsten Experimente weiter beobachtet werden.

Im nächsten Experiment soll als Ergänzung zu den Ergebnissen hinsichtlich der Skalierung der Anzeige und bezüglich Wechseleffekten bei visuellen Skalierungsänderungen der Einfluss der Skalierung des Touchpads und der Einfluss von Wechseleffekten bei motorischen Skalierungsänderungen untersucht werden. Dazu sind methodische Veränderungen erforderlich, die in die Ausgestaltung von Experiment II einfließen und im folgenden Abschnitt beschrieben und begründet werden.

Analog zu den Ergebnissen aus Experiment I wird erwartet, dass sich in Experiment II erneut Skalierungseffekte und Wechselkosten nachweisen lassen. Des Weiteren sollen Empfehlungen hinsichtlich der Skalierung des Touchpads und der Gestaltung des absoluten Bedienkonzeptes, insbesondere der Verwendung variabler Touchpadskalierungen, abgeleitet werden.

4 Experiment II: Motorische Skalierung der Bedienungsaufgabe

4.1 Fragestellung

Wie in der Einleitung erläutert, ist eine der Kernfragen hinsichtlich der Gestaltung des absoluten Bedienkonzepts, wie die sensomotorische Leistungsfähigkeit des Nutzers durch die Skalierung von Bedienelement und Anzeige beeinflusst wird. In Experiment I wurde der Einfluss der Skalierung der Anzeige bereits untersucht, Experiment II soll die Erkenntnisse bezüglich der Skalierung des Touchpads erweitern. Dabei wird vermutet, dass sich auch die Skalierung des Touchpads auf die sensomotorische Leistungsfähigkeit des Nutzers auswirkt.

Um in der folgenden Studie noch genauere Aussagen bezüglich des Skalierungseinflusses auf die Leistungsfähigkeit des Nutzers treffen zu können, werden nicht nur zwei, sondern sechs Touchpadskalierungen in die Untersuchung einbezogen¹⁶. Des Weiteren werden in Experiment II zusätzliche Probandenkennwerte wie ein Motoriktest und Maße zur Größe der Hand und möglicher Bedienfinger eingeführt, um die getestete Stichprobe besser beschreiben zu können. Diese werden in Abschnitt 4.2.5 detailliert erläutert. Um außerdem die sensomotorische Leistungsfähigkeit der Nutzer hinsichtlich der Bediengenauigkeit besser einschätzen zu können, wird im folgenden Experiment eine zusätzliche abhängige Variable betrachtet. Der Abstand zwischen dem Tastendruck und dem Tastenmittelpunkt der bedienten Taste spiegelt die Genauigkeit der Bedienhandlung wider: Ein geringerer Abstand sagt aus, dass die Taste mittiger und damit genauer getroffen wurde als bei einem größeren Abstand. Die Betrachtung der abhängigen Variable Touchpadweg, die in Experiment I als Maß der Bediengenauigkeit erhoben wurde, ist dagegen im folgenden Experiment nicht sinnvoll, da sie von der physikalischen Größe des Touchbereichs abhängt, die im Folgenden aktiv variiert wird. Für eine gute Vergleichbarkeit wird außer den beschriebenen Änderungen die Methodik zwischen Experiment I und II weitestgehend konstant gehalten.

Neben der Betrachtung von Skalierungseffekten des Touchpads soll erneut geprüft werden, in welchem Rahmen der Nutzer mit der Flexibilität absoluter Touchpadbedienkonzepte umgehen kann und wie sich unerwartete Wechsel der Bedienumgebung bezogen auf das Touchpad auf die Leistungsfähigkeit auswirken. Insofern wird anhand des Wechselkostenparadigmas das Auftreten von Wechsel- und Mischkosten bei Änderung der Skalierung des Touchpads untersucht, wobei ein Auftreten von Wechselkosten gegen gemischte oder variable Bedienkonzepte sprechen würde.

¹⁶ Die Anzeigefläche wird dabei konstant gehalten (800 x 480 px).

4.2 Methode

4.2.1 Probanden

Insgesamt 30 Probanden (10 Frauen, 20 Männer) nahmen am Experiment teil. Unter den Probanden war kein Proband aus Experiment I, das heißt, alle Probanden waren naiv. 29 Probanden waren Rechtshänder, ein Proband Linkshänder. Alle Probanden waren normalsichtig oder korrigiert normalsichtig (der auf Bildschirmdistanz ermittelte Visus lag bei allen Probanden bei mindestens 0.8), wobei 15 Probanden keine Sehhilfe benötigten, 2 Personen Kontaktlinsen und 13 Probanden eine Brille (6 mit Gleitsichtbrille) trugen. Im Versuch wurden zwei Alterskategorien (jeweils 15 Probanden) untersucht, eine Gruppe jünger als 30 Jahre, die andere Gruppe älter als 55 Jahre. Die Probanden der jüngeren Gruppe waren zwischen 22 und 30 Jahre alt, bei einem Altersdurchschnitt von 25.9 Jahren und einer Standardabweichung von 3.2 Jahren. Die Probanden der älteren Gruppe waren zwischen 56 und 72 Jahre alt, bei einem Altersdurchschnitt von 60.3 Jahren und einer Standardabweichung von 4.7 Jahren. Die Gruppe der jüngeren Probanden wies eine durchschnittliche Handlänge von 18.9 cm ($SD = 1.1$ cm) auf, bei einer Zeigefingerbreite¹⁷ von 1.6 cm ($SD = 0.2$ cm) und Mittelfingerbreite von 1.7 cm ($SD = 0.2$ cm). Die Gruppe der älteren Probanden wies eine durchschnittliche Handlänge von 18.6 cm ($SD = 1.2$ cm) auf, bei einer Zeigefingerbreite von 1.8 cm ($SD = 0.1$ cm) und Mittelfingerbreite von 1.8 cm ($SD = 0.1$ cm). Die Probanden schätzten ihre Erfahrung mit Touchpadbedienung vor Untersuchungsbeginn auf einer 5-stufigen Skala (gar nicht - sehr viel) ein. Der Median der Erfahrung mit Touchpads lag in der jüngeren Alterskategorie bei 4, das heißt, bei viel Erfahrung. In der älteren Gruppe lag der Median bei 2, also bei wenig Erfahrung. Zusätzlich gaben die Probanden die Anzahl der Stunden an, die sie pro Woche auf einer QWERTZ-Tastatur tippen. Die Probanden der jüngeren Gruppe tippten zwischen 2 und 50 Stunden pro Woche, bei einem Mittelwert von 23.5 Stunden und einer Standardabweichung von 15.2 Stunden. Die Probanden der älteren Gruppe tippten zwischen 1 und 45 Stunden pro Woche, bei einem Mittelwert von 13.3 Stunden und einer Standardabweichung von 13.3 Stunden.

4.2.2 Apparatur

Die Apparatur war wie in Experiment I und wird in Abschnitt 2 (Generelle Methodik) beschrieben.

4.2.3 Versuchsaufgabe

Im Versuch sollten die Probanden wieder zwei Ortsnamen, im ersten Teil des Experiments „Ramels“ und „Maltis“, im zweiten Teil des Experiments "Potsdam" und "Schwerin", möglichst schnell und fehlerfrei mit Hilfe des Touchpads auf einer dargebotenen QWERTZ-Tastatur tippen. Die Tastatur wurde in einem Anzeigebereich von 680 x 408 px dargestellt (die gesamte Anzeige war 800 x 480 px

¹⁷ Die Breite der möglichen Bedienfinger wurde jeweils an der Fingerspitze gemessen.

groß), wobei die entstehende Leerfläche auf der Anzeige schwarz dargestellt war (Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2).

Wie bereits erwähnt, soll der Skalierungseinfluss im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit des Nutzers in Experiment II genauer als in Experiment I untersucht werden. Daher wurden nicht nur zwei, sondern sechs Touchpadskalierungen in die Untersuchung von Skalierungseffekten einbezogen. Um die bisherige Methodik zur Betrachtung von Wechseleffekten durch diese Änderung nicht zu beeinflussen, wurde die Betrachtung der Skalierungseffekte in einem zweiten Teil des Experiments nach den Blöcken mit Skalierungswechseln durchgeführt. In diesem zweiten Teil des Versuchs wurden neue Zielworte („Potsdam“ und „Schwerin“) vorgegeben, um die Anzahl gleicher Eingaben zu reduzieren. In beiden Versuchsteilen wurden zwei Ortsnamen ausgewählt, um jeweils eine Wahlreaktion zu generieren. Die Begriffspaare stimmten in der Gesamtweglänge, die mit dem Cursor abgefahren werden musste, überein.

Beim absoluten Bedienkonzept ist ein Vergleich hinsichtlich der Skalierung des Touchpads auch davon abhängig, wie nahe die zu bedienenden Tasten nebeneinander liegen. Eng nebeneinander liegende Tasten erfordern eine genauere Bedienung als Tasten, zwischen denen mehr Abstand liegt. Die Größe des Abstands ist wiederum stark abhängig von der Anzahl an möglichen Bedienfeldern auf der Anzeige. Je mehr Funktionen auf der Anzeige sind, desto kleiner und näher beieinander müssen diese dargestellt werden. Desto geringer werden außerdem der Abstand zwischen zwei Tasten auf dem Touchpad, das heißt, der Weg, den der Nutzer mit dem Finger abfahren muss, um den Cursor von der einen Taste zur anderen Taste zu bewegen, und die Größe eines der Bedienfelder auf dem Touchpad. Wenn viele Funktionen in Form von Tasten bedient werden, sollte das Touchpad daher größer sein als bei der Bedienung weniger Tasten auf der Anzeige. Die reine Skalierung des Touchpads ist damit als Kenngröße für die Bedienbarkeit nicht ausreichend. Dementsprechend werden im Folgenden neben den Touchpadabmessungen stets die Abstände zwischen zwei Tastenmittelpunkten und die Größe der Zieltasten auf dem Touchpad in die Beschreibung aufgenommen. Da sich Touchpad und Anzeige im Verhältnis Höhe zu Breite im verwendeten Versuchssetting nicht absolut entsprechen, sind horizontale und vertikale Tastenabstände beziehungsweise Höhe und Breite von Zieltasten leicht unterschiedlich und werden getrennt ausgewiesen.

Wie in Experiment I wurde der zu tippende Ortsname über die angeschlossenen Lautsprecher ausgegeben und in der Mitte des Bildschirms angezeigt. Die Ausgangsposition des Fingers vor dem Eintippen war wie in Experiment I nicht kontrolliert, sondern wurde von den Probanden jeweils frei gewählt. Sobald die Probanden den richtigen Begriff fehlerfrei eingetippt hatten, erfolgte ein Bestätigungston und die Aufgabe wurde ausgeblendet. Nach einer kurzen Pause wurde die nächste Aufgabe visuell und akustisch dargeboten.

4 Experiment II

Über eine Korrekturtaste oben rechts in der Tastatur konnte ein Zeichen pro Tastendruck gelöscht werden. Wenn das Touchpad heruntergedrückt wurde, ohne dass der Cursor über einer Taste positioniert war, erfolgte ein Fehlerton.

Um die Frage nach Wechselkosten von Skalierungswechseln zu beantworten, wurden im ersten Teil des Experiments die Aufgaben entweder auf dem gesamten Touchpad bearbeitet (5.0 x 7.3 cm; vertikaler Tastenabstand 7.8 mm; horizontaler Tastenabstand 6.9 mm), oder es stand den Probanden 49% der Touchpadfläche (3.5 x 5.1 cm; vertikaler Tastenabstand 5.5 mm; horizontaler Tastenabstand 4.8 mm) zur Verfügung. Den Hinweis auf die aktuelle Touchpadskalierung gaben die Position der Tastatur und Richtungspfeile (Abbildung 4-1).

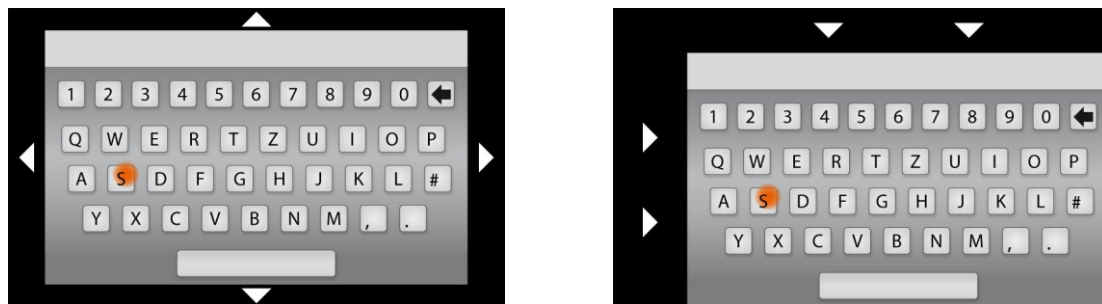


Abbildung 4-1: Auf der Anzeige dargestellte Tastaturen zur Untersuchung von Effekten des Skalierungswechsels

Bei großer Skalierung des Touchpads war die Tastatur mittig auf der Anzeige dargestellt mit Pfeilen in alle vier Richtungen nach außen, bei kleiner Skalierung des Touchpads war die Tastatur in der unteren, rechten Ecke dargestellt und es zeigten Pfeile in diese Ecke. Die abgebildete Größe der Tastatur (680 x 408 px) blieb bei beiden Touchpadskalierungen konstant.

Im zweiten Teil des Experiments wurden in sechs Blöcken nacheinander sechs Touchpadskalierungen mit jeweils entsprechenden Abständen zwischen zwei Tastenmittelpunkten dargeboten (siehe Tabelle 4-1). Die auf der Anzeige dargestellte Tastatur blieb jeweils identisch (Abbildung 4-2).

Tabelle 4-1: Untersuchte Touchpadskalierungen [cm], entsprechende Abstände zwischen zwei benachbarten Tastenmittelpunkten [mm] und Größenverhältnisse der Zieltasten auf dem Touchpad [mm]

Skalierung	Skalierung [cm]	Vertikaler Tastenabstand [mm]	Horizontaler Tastenabstand [mm]	Höhe einer Zieltaste [mm]	Breite einer Zieltaste [mm]
1	2.5 x 3.7	3.9	3.4	3.4	3.0
2	3.0 x 4.4	4.7	4.1	4.1	3.6
3	3.5 x 5.1	5.5	4.8	4.8	4.2
4	4.0 x 5.8	6.3	5.5	5.5	4.8
5	4.5 x 6.6	7.1	6.2	6.2	5.4
6	5.0 x 7.3	7.8	6.9	6.9	6.0

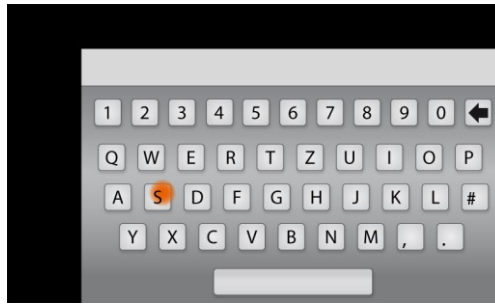


Abbildung 4-2: Auf der Anzeige dargestellte Tastatur zur Untersuchung von Skalierungseffekten (zweiter Teil des Experiments)

Die Reihenfolge der Darbietung war über die Probanden randomisiert. Für jede Touchpadskalierung wurden getrennt Bedienmaße (Ersteingabe- und Gesamteingabezeit, relativer Fehler), Leistung in der Fahraufgabe (Spurabweichung) und Akzeptanz (diverse Fragebogenitems) gemessen.

4.2.4 Ablauf einer Aufgabe

Der Ablauf einer Aufgabe entsprach dem aus Experiment I (3.2.4 Ablauf einer Aufgabe).

4.2.5 Versuchsdesign

Wie bereits beschrieben, wurden zur genaueren Untersuchung von Skalierungseffekten nicht nur zwei, sondern sechs Touchpadskalierungen einbezogen. Um die bisherige Methodik zur Betrachtung von Wechselwirkungen durch diese Änderung nicht zu beeinflussen, wurde die Betrachtung der Skalierungseffekte in einem zweiten Teil des Experiments nach den Blöcken mit Skalierungswechseln durchgeführt.

In der folgenden Beschreibung von Versuchsdesign und Ergebnissen wird von der chronologischen Abfolge der Durchführung abgewichen. Obwohl zuerst die Blöcke zur Untersuchung von Wechselwirkungen und danach von Skalierungseffekten durchgeführt wurden, werden im Versuchsdesign und im Ergebnisbericht erst die Skalierungsfragestellung und dann die Wechselkostenfragestellung berichtet, um zu Experiment I einen konsistenten Aufbau des Berichts zu erhalten.

Unabhängige Variablen

Um Skalierungseffekte des Touchpads auf die Leistung des Nutzers zu untersuchen, wurde ein 2 (*Alterskategorie*) x 6 (*Skalierung Touchpad*) faktorielles Design verwendet.

- Als between-Faktor wurden zwei Alterskategorien untersucht: Eine Gruppe jüngerer und eine Gruppe älterer Versuchsteilnehmer.
- Die zweite unabhängige Variable war die Skalierung des Touchpads (within-Faktor), die in sechs Stufen variiert wurde (Tabelle 4-1).

Die Reihenfolge der Darbietung wurde randomisiert.

4 Experiment II

Um das Auftreten sensomotorischer Wechselkosten zu untersuchen, wurde ein 2 (*Alterskategorie*) x 2 (*Skalierung Touchpad*) x 2 (*Relative Häufigkeit*) x 3 (*Anzahl gleicher Aufgaben*¹⁸) faktorielles Design verwendet.

- Ein between-Faktor war wiederum die Alterskategorie der Probanden (jünger vs. älter).
- Die zweite unabhängige Variable war die Skalierung des Touchpads (within-Faktor): 100% (A; 5.0 x 7.3 cm; vertikaler Tastenabstand 7.8 mm; horizontaler Tastenabstand 6.9 mm) vs. 49% (B; 3.5 x 5.1 cm; vertikaler Tastenabstand 5.5 mm; horizontaler Tastenabstand 4.8 mm).
- Als dritter Faktor wurde die relative Häufigkeit der Skalierungen als within-Faktor variiert. In einem Block wurde die auf 100% skalierte Aufgabe mit einer relativen Häufigkeit von 0.77, die auf 49% skalierte Aufgabe zu 0.23 dargeboten, im anderen Block waren die relativen Häufigkeiten getauscht (Abbildung 4-3).
- Die Anzahl aufeinanderfolgend gleicher Skalierungen war ein weiterer within-Faktor. Die Aufgabenskalierungen wurden im Mittelwert im Verhältnis 10:3 abgewechselt, um ein Mit-zählen der Bedingungen durch die Probanden zu verhindern (Abbildung 4-3). Wechseleffekte wurden allerdings nur in den ersten drei Aufgaben nach einem Skalierungswechsel erwartet, das heißt, in den Aufgaben A₁ und B₁ (nach einem Wechsel), A₂ und B₂ (in der ersten Wiederholung) sowie A₃ und B₃ (in der zweiten Wiederholung). Spätere Aufgaben identischer Skalierung (A₄ - A₁₀ und B₄ - B₁₀) wurden für die Analyse von Wechselkosten daher nicht betrachtet.

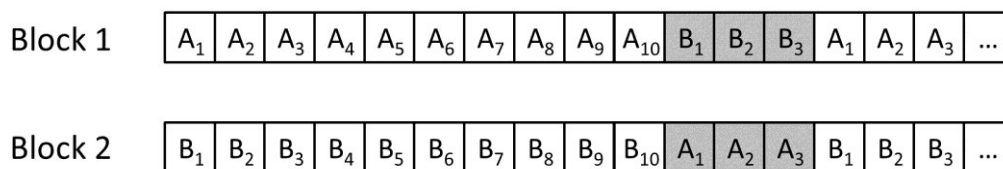


Abbildung 4-3: Beispielhafte Darstellung der Einzelaufgaben-Abfolgen, wobei A (100 %) und B (49%) die beiden Aufgabenskalierungen repräsentieren. Im Mittelwert war die Aufgabenabfolge im einen Block 10 Aufgaben A, 3 Aufgaben B, 10 Aufgaben A etc., im anderen Block 10 Aufgaben B, 3 Aufgaben A, 10 Aufgaben B etc.

Zur Untersuchung von Mischkosten wurde ein 2 (*Alterskategorie*) x 2 (*Skalierung Touchpad*) x 3 (*Block*) faktorielles Design verwendet.

- Die ersten beiden Faktoren waren wiederum die beiden Alterskategorien (between-Faktor) und die beiden Skalierungen des Touchpads (within-Faktor).
- Als dritter Faktor wurde die Bedienung in den verschiedenen Blöcken (within-Faktor) betrachtet: Die Aufgaben der Baseline (A_B) wurden mit entsprechenden Wiederholungsaufgaben (A₂

¹⁸ Wie in Experiment I bezieht sich die im Folgenden verwendete Aufgabennummerierung nicht auf die Anzahl an Wiederholungen (0, 1, 2) einer Aufgabe, sondern auf die Anzahl gleicher Aufgaben, das heißt, Aufgabe 1 ist die Aufgabe nach einem Wechsel, Aufgabe 2 ist die erste Wiederholung, Aufgabe 3 ist die zweite Wiederholung.

häufig), die im gemischten Block häufig¹⁹ waren, und mit entsprechenden Wiederholungsaufgaben (A_2 selten), die im gemischten Block selten²⁰ waren, verglichen.

Das Zielwort wurde nicht als Faktor in die Analyse aufgenommen, da die Begriffe in der Eingabecharakteristik bestmöglich übereinstimmten und die Probanden sich auf das jeweilige Zielwort vorbereiten konnten, so dass keine Effekte erwartet wurden.

Die Abfolge der 10:3 Skalierungs-Sequenzen und die Abfolge von Baseline und Wechselblöcken wurden über die Probanden randomisiert, um Reihenfolgeeffekte auszugleichen.

Abhängige Variablen

Wie in Abschnitt 2.5.2 erläutert, wurden wie in Experiment I während der Bedienung Bedienmaße wie die Ersteingabe- und Gesamteingabezeit sowie der relative Fehler erhoben. Außerdem wurde die Leistung in der Fahraufgabe über die Spurabweichung gemessen. In Experiment II war ein Vergleich des Touchpadweges zwischen den Bedingungen nicht sinnvoll, da diese Kenngröße abhängig von der Skalierung des Touchpads ist, die in Experiment II aktiv variiert wurde.

Zur Untersuchung der verschiedenen Touchpadskalierungen wurde als zusätzliches Maß der Bediengenauigkeit der Abstand zwischen Tastendruck und Tastenmittelpunkt (in [px]; je größer der Abstand, desto ungenauer die Bedienung) betrachtet (Abbildung 4-4). Dieser konnte bei jedem Tastendruck Werte im Bereich von 0 und 25 px einnehmen.²¹



Abbildung 4-4: Veranschaulichung des Abstands [px] zwischen Tastendruck und Mittelpunkt der gedrückten Taste auf der Anzeige

Nach den Baselines wurde die subjektive Schwierigkeit der Aufgabe auf einer Skala von 1 (gar nicht schwierig) bis 5 (sehr schwierig) erfragt.

Zur Betrachtung von Skalierungseffekten wurde von den Probanden zu jeder der 6 Touchpadskalierungen ein Akzeptanzfragebogen ausgefüllt. Dieser enthielt diverse Items wie beispielsweise "Diese Version wirkt benutzerfreundlich.", denen die Probanden auf einer Skala von 1 (trifft völlig zu) bis 5 (trifft überhaupt nicht zu) zustimmen konnten (vgl. Anhang, Abbildung 8-1: Akzeptanzfragebogen für die jeweilige Touchpadskalierung).

¹⁹ Häufig bedeutet wie in Experiment I im Folgenden, dass die Aufgabe im gemischten Block mit einer relativen Häufigkeit von 0.77 auftrat.

²⁰ Selten bedeutet wie in Experiment I im Folgenden, dass die Aufgabe im gemischten Block mit einer relativen Häufigkeit von 0.23 auftrat.

²¹ Die Betrachtung dieser Variablen war in Experiment I nicht sinnvoll, da der Abstand abhängig von der visuellen Skalierung ist, die in Experiment I aktiv variiert wurde: Bei einem kleineren Anzeigebereich werden automatisch kleinere Abstände erzeugt (die Tasten sind auf der visuellen Ebene kleiner) als bei einem größeren Anzeigebereich.

Probandenkennwerte (als Erweiterung zu Experiment I)

Wie bereits erwähnt, wurde zur besseren Beschreibung der Stichprobe (zum Beispiel Unterschiede zwischen den beiden Alterskategorien) und zur Prüfung der Eignung der Probanden ein Motoriktest gestaltet und durchgeführt. Um das Versuchssetting mit Experiment I vergleichbar zu halten, wurde er erst nach den Blöcken mit Skalierungswechseln eingeführt.

Die Probanden sollten 30 s lang einen Zielreiz (weißer Punkt, siehe Abbildung 4-5), der sich mit einer Geschwindigkeit von 60 °/s im Uhrzeigersinn auf einer Kreislinie (Kreisradius = 160 px, Linienstärke 1 px) bewegte, mit dem Finger auf dem Touchpad so verfolgen, dass die Distanzen vom Cursor zum Zielreiz und zur dargestellten Kreislinie minimal sind. Aufgezeichnet wurde die Summe der quadrierten Abweichungen im Verhältnis zur Anzahl der Aufzeichnungen minus 1 in der Einheit Pixel - getrennt für die Kreislinie und den Zielreiz (Formel (10)); $(X-Y)$ stellt die Abweichung zur Idealposition dar, n die Anzahl der Aufzeichnungen).

$$D = \frac{\sum(X - Y)^2}{n - 1} \quad (10)$$

Aus den Abweichungswerten für Kreislinie und Zielreiz wurde die Wurzel gezogen und beide Werte summiert (Formel (11)). Daraus ergab sich eine standardisierte Abweichung im Motoriktest in Pixeln pro Proband.

$$d = \sqrt{D_{Kreis}} + \sqrt{D_{Ziel}} \quad (11)$$

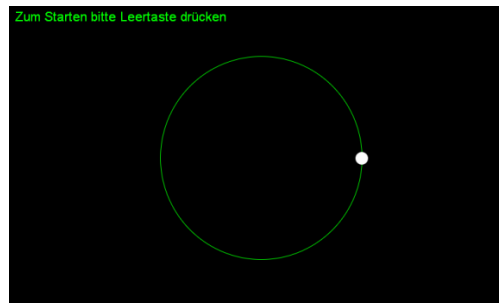


Abbildung 4-5: Motoriktest

Ebenfalls zur Beschreibung der Stichprobe wurden Maße zur Größe der Hand (Handlänge) und möglicher Bedienfinger (Fingerbreite) erfasst und die Handhaltung während der Eingabe beobachtet. Diese wurden außerdem erhoben, um bei gegebenenfalls auftretenden, ungewöhnlichen Versuchsergebnissen Erklärungsansätze zu bieten. Hintergrund ist, dass Personen mit sehr großen Händen oder Fingern eventuell schlechter mit besonders kleinen Skalierungen des Touchpads umgehen können als Personen mit kleinen Händen und Fingern.

4.2.6 Versuchsablauf

Nach der Begrüßung wurden die Probanden nach Alter, Händigkeit, Erfahrung mit Touchpadbedienung, wöchentliche Tippdauer auf einer QWERTZ-Tastatur und dem Tragen von Sehhilfen (Brille, Kontaktlinsen) befragt.

Daraufhin wurden die Probanden instruiert, mit Hilfe des Touchpads je eine von zwei Ortsbezeichnungen einzugeben, um die Bedienung eines Navigationssystems zu testen. Dazu wurde Ihnen das absolute Bedienprinzip erklärt (vgl. Abschnitt 2.4, Absolutes Bedienkonzept).

Im ersten Teil des Experiments wurden Effekte von Skalierungswechseln untersucht. Dazu wurde der Ablauf der Aufgaben insgesamt jeweils zehnmal pro Ortsbezeichnung und je zehnmal pro Touchpadskalierung geübt. Die Probanden wurden instruiert, möglichst schnell und genau zu bedienen. Die rechte, bedienende Hand sollte wie in Experiment I zwischen den Aufgaben nicht zum Lenkrad geführt, sondern am Touchpad liegen gelassen werden.

Nach der Eingabeübung folgte erst eine separate Übung der Fahraufgabe (2.2 Fahraufgabe), dann wurde die Eingabe während des Fahrens geübt. Vor den Testblöcken wurden die Probanden instruiert, dass die Fahraufgabe Vorrang hat, sie aber dennoch möglichst schnell und fehlerfrei eingeben sollen. Nach den jeweiligen Baseline-Messungen, in denen nur entweder die große oder die kleine Touchpadskalierung dargeboten wurde, beurteilten die Probanden die Schwierigkeit der Aufgabe. Nach jedem Wechselblock (je 78 Aufgaben) wurden die Probanden hinsichtlich ihrer Präferenz bezüglich der Touchpadskalierung befragt und, ob der Skalierungswechsel aufgefallen ist und gestört hat. Zwischen den beiden Wechselblöcken war eine Pause vorgesehen. Nach den Blöcken zur Untersuchung von Wechseleffekten wurden der Motoriktest (siehe Probandenkennwerte) und ein Visustest durchgeführt, der speziell für die Bildschirmdistanz von 80 cm geeignet war.

In einem zweiten Teil des Experiments wurden zur Betrachtung von Skalierungseffekten sechs Skalierungen des Touchpads hinsichtlich Bedienbarkeit und Akzeptanz untersucht. Dazu gaben die Probanden während der Fahraufgabe die Ziele "Schwerin" oder "Potsdam" ein. Nach jeweils 10 Aufgaben pro Skalierung sollten die Probanden die Touchpadskalierung anhand eines Akzeptanzfragebogens bewerten. Zu Versuchsabschluss wurden Hand- und Fingerlänge und die Fingerbreite der Probanden gemessen.

Das Experiment dauerte insgesamt ungefähr 120 Minuten. Abbildung 4-6 bietet einen Überblick über den Ablauf.

In der folgenden Beschreibung der Ergebnisse wird von der hier beschriebenen, chronologischen Abfolge der Durchführung abgewichen. Obwohl zuerst die Blöcke zur Untersuchung von Wechseleffekten und danach von Skalierungseffekten durchgeführt wurden²², werden im folgenden Ergebnisteil zuerst die Skalierungseffekte und dann die Wechseleffekte berichtet, um zu Experiment I einen konsistenten Aufbau des Berichts zu erhalten.

²² Durch diese Reihenfolge wurde ein Einfluss der geänderten Methodik, die für eine detailliertere Betrachtung von Skalierungseffekten angepasst wurde, auf die Ergebnisse hinsichtlich Wechseleffekten vermieden.

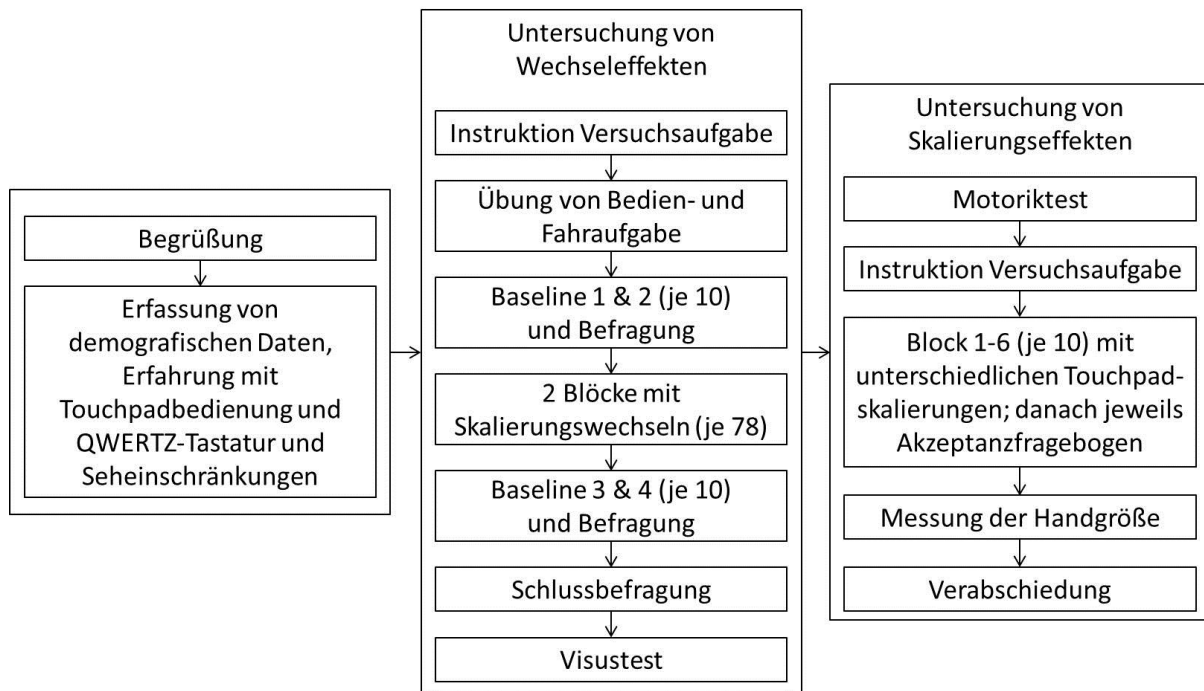


Abbildung 4-6: Grafische Darstellung des Versuchsablaufs von Experiment II

4.2.7 Datenanalyse

Alle Faktoren in den Analysen außer der Alterskategorie der Probanden waren within-Faktoren. Als Hauptanalyse wurde eine gemischte Varianzanalyse mit Messwiederholung berechnet, wobei die Alterskategorie als between-Faktor in die Berechnung einging. Es wurden jeweils Greenhouse-Geisser korrigierte Freiheitsgrade verwendet und als Level für statistische Signifikanz wurde $p < 0.05$ festgelegt. Um bei einem signifikantem Haupteffekt eines Faktors mit mehr als zwei Stufen zu testen, zwischen welchen Stufen der signifikante Unterschied liegt, wurden post hoc paarweise Mittelwertvergleiche mit Bonferroni-Adjustierung berechnet (zum Beispiel bei der Bestimmung der Wechselkosten).

Der relative Fehler wurde für die inferenzstatistischen Auswertungen gemäß Winer (1971) sinustransformiert²³. Bearbeitungsmaße (Eingabezeit, relativer Fehler etc.) wurden einerseits für die Eingabe des ersten Buchstabens andererseits für die Eingabe des Gesamtwortes betrachtet.

Die Spurabweichung in der Fahraufgabe wurde jeweils nur für die Dauer der Eingabe des gesamten Wortes berechnet, da der Aufzeichnungszeitraum für die Eingabe des ersten Buchstabens sehr kurz und die entsprechende Spurabweichung damit nicht aussagekräftig war. Als Maße der Spurabweichung wurden erneut der Betrag und die Standardabweichung berechnet, um einerseits Aussagen über den absoluten Versatz und andererseits über ihre Variabilität treffen zu können.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden im folgenden Ergebnisbericht nur signifikante Effekte und Interaktionen berichtet.

²³ Die deskriptive Statistik (Grafische Darstellungen, Mittelwerte, Standardabweichungen) des relativen Fehlers basiert jeweils auf nicht transformierten Werten.

Motoriktest

Wie bereits erwähnt, wurde zur Beschreibung der Stichprobe (Unterschiede zwischen den beiden Alterskategorien) und zur Prüfung der Eignung der Probanden ein Motoriktest durchgeführt. In der standardisierten Abweichung im Motoriktest ließen sich in den beiden Altersgruppen keine Ausreißer²⁴ feststellen. Daher waren alle Probanden zur Teilnahme am Experiment geeignet. Ältere Probanden ($M = 32.1$ px, $SD = 7.2$ px) zeigten wie erwartet eine signifikant größere Abweichung zur Ideallinie im Motoriktest als jüngere Probanden ($M = 22.5$ px, $SD = 4.7$ px) ($t(24.0) = -4.38, p < 0.01$).

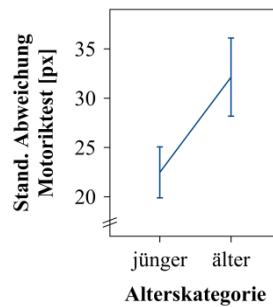


Abbildung 4-7: Mittlere standardisierte Abweichung im Motoriktest in Pixel [px] in Abhängigkeit von der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Ausgeschlossene Daten

Wie in Experiment I wurden Aufgaben, in denen eine Störung des Ablaufs auftrat, vom Versuchsleiter während der Versuchsdurchführung markiert und von der Auswertung ausgeschlossen. Daneben wurde getrennt pro Proband, Alterskategorie, Block und Touchpadskalierung eine Ausreißer-Korrektur durchgeführt: Aufgaben, in denen die Ersteingabe- beziehungsweise Gesamteingabezeit mehr als drei Standardabweichungen größer als der Mittelwert war, wurden aus den Analysen ausgeschlossen. Für die Betrachtung der Ersteingabe- und Gesamteingabezeit wurden außerdem nur fehlerfreie Aufgaben einbezogen.

Die Berechnungen zur Spurabweichung beruhen auf Daten ohne Ausreißer-Korrektur, das heißt, die Spurrhaltung während fehlerhafter Eingaben oder sehr langen Aufgaben wird berücksichtigt. Nur als ungültig markierte Aufgaben wurden ausgeschlossen.

4.3.2 Skalierungseffekt des Touchpads

Eine Übersicht der untersuchten sechs Touchpadskalierungen findet sich in Abschnitt 4.2.3 in Tabelle 4-1.

²⁴ Als Ausreißer wurden Werte definiert, die mehr als drei Standardabweichungen größer oder kleiner als der Mittelwert waren.

Ersteingabe- und Gesamteingabezeit

In der Ersteingabezeit (Abbildung 4-8 links) ließ sich ein Effekt der Touchpadskalierung ($F(3.5,94.7) = 7.29, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.21$) feststellen. Post hoc Bonferroni Tests zeigten, dass bei Skalierung 1 ($M = 1944$ ms, $SD = 536$ ms) signifikant langsamer bedient wurde als bei den Skalierungen 4 ($M = 1647$ ms, $SD = 599$ ms; $p < 0.05$), 5 ($M = 1653$ ms, $SD = 650$ ms; $p < 0.01$) und 6 ($M = 1591$ ms, $SD = 489$ ms; $p < 0.01$). Die übrigen post hoc Tests waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.1$).

Der Unterschied hinsichtlich der Touchpadskalierung ($F(3.7,89.6) = 9.16, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.28$) zeigte sich ebenfalls für die Eingabe des Gesamtwortes (Abbildung 4-8 rechts). Post hoc Bonferroni Tests zeigten, dass die Gesamteingabezeit bei Skalierung 1 ($M = 9779$ ms, $SD = 2747$ ms) signifikant höher war als bei den Skalierungen 4 ($M = 8515$ ms, $SD = 2430$ ms; $p < 0.01$), 5 ($M = 8532$ ms, $SD = 2519$ ms; $p < 0.01$) und 6 ($M = 8435$ ms, $SD = 2153$ ms; $p < 0.01$). Bei Skalierung 2 ($M = 9329$ ms, $SD = 2486$ ms) wurde außerdem signifikant langsamer bedient als bei Skalierung 6 ($p < 0.05$) und tendenziell langsamer als bei den Skalierungen 4 und 5 (jeweils $p < 0.1$). Die übrigen post hoc Tests waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.1$).

Sowohl für die Ersteingabezeit ($F(1,27) = 23.09, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.46$) als auch die Gesamteingabezeit ($F(1,24) = 51.98, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.68$) zeigte sich ein signifikanter Effekt der Alterskategorie. Ältere benötigten mehr Zeit für die Eingabe als jüngere Probanden.

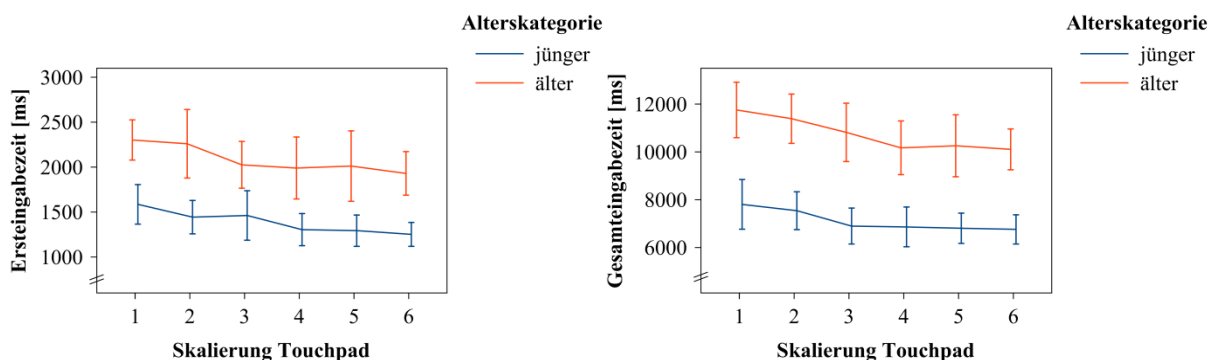


Abbildung 4-8: Mittlere Ersteingabezeit [ms] (links) und Gesamteingabezeit [ms] (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung des Touchpads und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Relativer Fehler

Wie in Abschnitt 2.5.2 beschrieben, wurden für die Eingabe des ersten Buchstabens und des Gesamtwortes Fehlermaße berechnet. Im relativen Fehler der Ersteingaben (Abbildung 4-9 links) zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Touchpadskalierungen ($F(4.2,112.7) = 8.49, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.24$): Bei Skalierung 1 ($M = 0.114, SD = 0.116$) war der relative Fehler höher (jeweils $p < 0.01$) als bei den Skalierungen 3 ($M = 0.035, SD = 0.055$), 5 ($M = 0.027, SD = 0.052$) und 6 ($M = 0.020, SD = 0.048$), bei Skalierung 2 ($M = 0.090, SD = 0.116$) war der relative Fehler ebenfalls höher als bei den Skalierungen 5 ($p < 0.05$) und 6 ($p < 0.01$). Die übrigen post hoc Tests waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.1$).

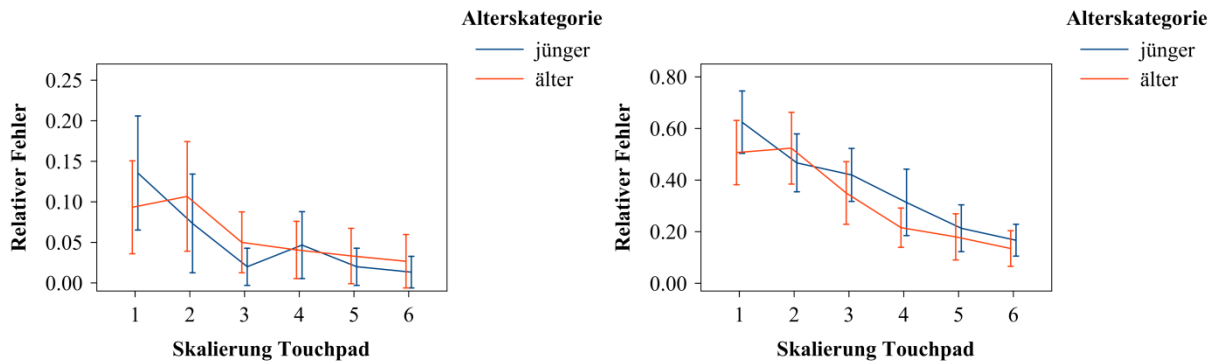


Abbildung 4-9: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung des Touchpads und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Im relativen Fehler für die Eingabe des Gesamtwortes (Abbildung 4-9 rechts) zeigte sich ebenfalls der Unterschied zwischen den Touchpadskalierungen ($F(3.8, 102.1) = 39.09, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.59$). Nominell lässt sich folgender Zusammenhang festhalten: Je größer das Touchpad war, desto geringer war der relative Fehler. In den post hoc Bonferroni Tests war der Unterschied zwischen allen Paarvergleichen signifikant (jeweils $p < 0.05$) außer zwischen Skalierung 1 und 2, Skalierung 3 und 4, Skalierung 4 und 5 und Skalierung 5 und 6 (jeweils $p > 0.1$).

Zu beachten ist der generell hohe relative Fehler bei der Eingabe des Gesamtwortes: Bei Skalierung 6 lag der relative Fehler durchschnittlich bei 0.151 ($SD = 0.117$), bei Skalierung 1 sogar bei 0.566 ($SD = 0.226$). Damit trat bei der kleinsten Skalierung des Touchpads in mehr als der Hälfte der Aufgaben ein Fehler auf.

Abstand zwischen Tastendruck und Tastenmittelpunkt

Als Maß der Genauigkeit der Bedienung wurde neben der Betrachtung des relativen Fehlers der Abstand zwischen Tastendruck und Mittelpunkt der gedrückten Taste (in [px]; je größer der Abstand, desto ungenauer die Bedienung; Abbildung 4-4) auf der Anzeige berechnet, der im Folgenden auch als „Abstand zum Tastenmittelpunkt“ bezeichnet wird.

Im Abstand zum Tastenmittelpunkt zeigte sich für die Eingabe des ersten Buchstabens (Abbildung 4-10 links) ein Effekt der Touchpadskalierung ($F(3.9, 104.7) = 11.95, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.31$). Nominell war der Abstand geringer, je größer das Touchpad war. In den post hoc Bonferroni Tests war der Unterschied zwischen allen Paarvergleichen signifikant (jeweils $p < 0.05$) oder marginalsignifikant (Vergleich Skalierung 3 und 6; $p < 0.1$) außer zwischen Skalierung 1 und 2, Skalierung 2 und 3, Skalierung 3 und 4, Skalierung 3 und 5 und zwischen den drei größten Skalierungen (jeweils $p > 0.1$).

Ein Effekt der Touchpadskalierung ($F(3.9, 94.0) = 21.57, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.47$) zeigte sich im Abstand zum Tastenmittelpunkt auch für die Eingabe des Gesamtwortes²⁵ (Abbildung 4-10 rechts). Nominell war der Abstand geringer, je größer das Touchpad war und die meisten Paarvergleiche in den post hoc

²⁵ Für die Betrachtung der Gesamteingabe wurde der jeweilige Abstand der enthaltenen Tastendrucke aufsummiert.

Bonferroni Tests zeigten signifikante Unterschiede. Jeweils direkt aufeinanderfolgende Skalierungen unterschieden sich jedoch nicht signifikant (jeweils $p > 0.1$) außer beim Vergleich von Skalierung 4 und 5 ($p < 0.05$). Zusätzlich gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen Skalierung 2 und 4 ($p > 0.1$). Alle weiteren Paarvergleiche waren marginalsignifikant (Vergleich Skalierung 4 und 6; $p < 0.1$) oder signifikant (jeweils $p < 0.05$).

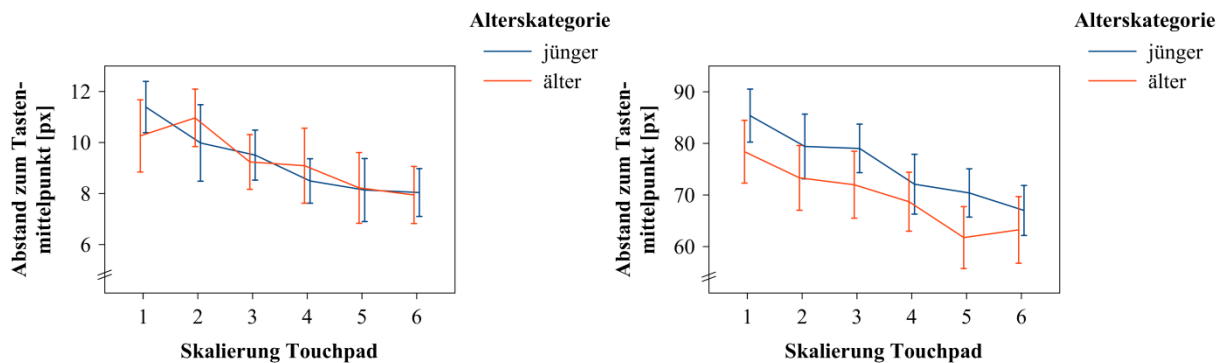


Abbildung 4-10: Mittlerer Abstand zum Tastenmittelpunkt [px] für die Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung des Touchpads und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Im Abstand zwischen Tastendruck und Mittelpunkt der gedrückten Taste zeigte sich für die Eingabe des gesamten Wortes außerdem ein Unterschied hinsichtlich der Alterskategorie ($F(1,24) = 5.72$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.19$). Ältere Probanden ($M = 69.3$ px, $SD = 12.0$ px) wiesen einen kleineren Abstand und damit eine höhere Bediengenaugigkeit auf als jüngere Probanden ($M = 75.4$ px, $SD = 11.1$ px).

Spurabweichung

Hinsichtlich der Touchpadskalierung zeigte sich ein signifikanter Unterschied im Betrag der Spurabweichung ($F(4.0,102.9) = 3.61$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.12$; Abbildung 4-11 links). Post hoc Bonferroni Tests zeigten, dass der Betrag der Spurabweichung bei Skalierung 1 ($M = 0.61$ m, $SD = 0.32$ m) verglichen zu Skalierung 2 ($M = 0.54$ m, $SD = 0.26$ m; $p < 0.05$) und 6 ($M = 0.53$ m, $SD = 0.25$ m; $p < 0.05$) erhöht war. Die anderen Paarvergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.2$).

Auch in der SD der Spurabweichung (Abbildung 4-11 rechts) ließ sich ein Effekt der Touchpadskalierung ($F(3.7,97.1) = 12.88$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.33$) feststellen. Skalierung 1 ($M = 0.44$ m, $SD = 0.26$ m) wies eine höhere SD der Spurabweichung auf als alle anderen Skalierungen (jeweils $p < 0.05$), Skalierung 2 ($M = 0.39$ m, $SD = 0.21$ m) zeigte eine höhere SD der Spurabweichung als Skalierung 4 ($M = 0.33$ m, $SD = 0.19$ m; $p < 0.01$) und 6 ($M = 0.32$ m, $SD = 0.20$ m; $p < 0.01$). Die anderen post hoc Paarvergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.1$).

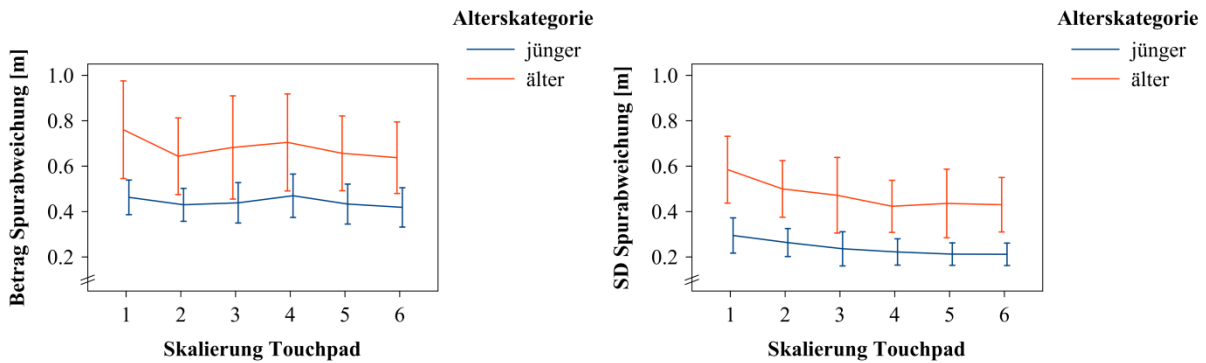


Abbildung 4-11: Mittlerer Betrag der Spurabweichung [m] (links) und mittlere SD der Spurabweichung [m] (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung des Touchpads und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

In beiden Spurabweichungsmaßen zeigte sich ein signifikanter Alterseffekt. Ältere Probanden zeigten einen höheren Betrag der Spurabweichung ($F(1,26) = 5.84, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.18$) und eine höhere SD ($F(1,26) = 10.51, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.29$) als jüngere Probanden.

Akzeptanzbewertung

In der subjektiven Bewertung (Abbildung 4-12) zeigte sich ein signifikanter Effekt der Touchpadskalierung ($F(4.2,112.9) = 14.93, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.36$). Nominell zeigte sich, dass geringere Akzeptanzwerte erzielt wurden, je kleiner das Touchpad war. Post hoc Bonferroni Tests zeigten, dass Skalierung 1 ($M = 2.72, SD = 1.09$) marginalsignifikant schlechter bewertet wurde als Skalierung 2 ($M = 3.37, SD = 0.91; p < 0.1$) und signifikant schlechter als alle anderen Skalierungen (jeweils $p < 0.05$). Skalierung 2 wurde signifikant schlechter bewertet als Skalierung 5 ($M = 3.93, SD = 0.63; p < 0.05$) und 6 ($M = 3.95, SD = 0.81; p < 0.05$). Skalierung 3 ($M = 3.48, SD = 0.87$) wurde marginalsignifikant schlechter bewertet als Skalierung 5 ($p < 0.1$) und signifikant schlechter als Skalierung 6 ($p < 0.05$). Die anderen post hoc Paarvergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.2$).

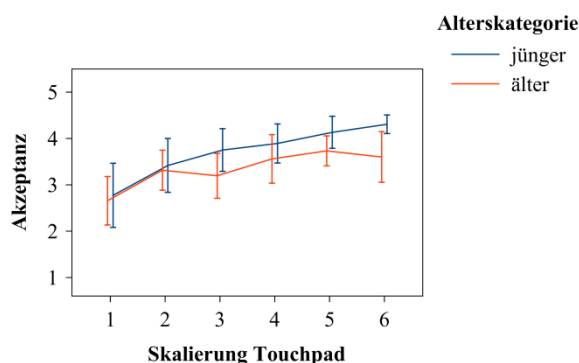


Abbildung 4-12: Mittelwert der subjektiven Akzeptanz in Abhängigkeit von der Skalierung des Touchpads und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Zusatzanalyse: Präferenz hinsichtlich der Touchpadskalierung nach länger andauernder Bedienung

Im anderen Teil der Untersuchung, der zur Betrachtung von Wechselwirkungen durchgeführt wurde, wurden nur zwei Touchpadskalierungen (5.0 x 7.3 cm vs. 3.5 x 5.1 cm) verwendet. Nach jedem Wechselblock, der aus je 78 Aufgaben bestand, wurden die Probanden nach der präferierten Skalie-

rung befragt. In der Anzahl der Nennungen (Abbildung 4-13) zeigte sich, dass die Mehrheit der Probanden die kleinere von beiden Touchpadskalierungen (5.0 x 7.3 cm vs. 3.5 x 5.1 cm) vorzog, wobei die Präferenz dadurch moderiert wurde, welche Skalierung im vorangegangenen Abschnitt häufiger bedient worden war.

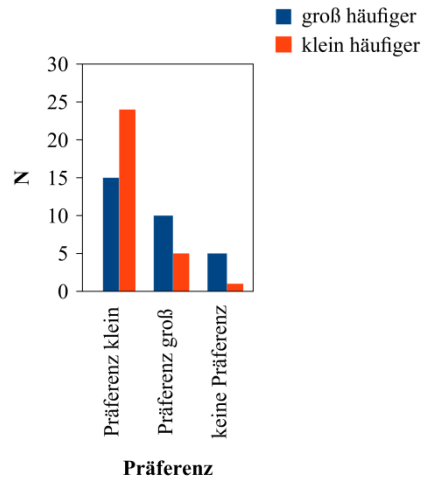


Abbildung 4-13: Häufigkeit der Nennungen hinsichtlich der präferierten Touchpadskalierung in Abhängigkeit davon, welche Skalierung im vorangegangenen Block häufiger bedient wurde.

Nachdem häufiger auf der größeren Skalierung des Touchpads bedient worden war, präferierten 15 Probanden die kleine Skalierung und 10 Probanden die große Skalierung - 5 Probanden zeigten keine Präferenz. Nachdem häufiger auf der kleineren Skalierung des Touchpads bedient worden war, zogen 24 Probanden die kleinere Skalierung vor und 5 Probanden die größere Skalierung - ein Proband zeigte keine Präferenz.

Fazit Skalierungseffekte

Beim Vergleich von sechs Touchpadskalierungen zeigte sich, dass die Leistungsfähigkeit bei kleineren Skalierungen des Touchpads niedriger ist. Es traten längere Eingabezeiten (Ersteingabe- und Gesamteingabezeit), ein erhöhter relativer Fehler, ein erhöhter Abstand zwischen Tastendruck und Mittelpunkt der Zieltaste und eine höhere Spurabweichung auf. Die größten zwei oder drei Skalierungen des Touchpads unterschieden sich in den meisten Vergleichen nicht. Die Skalierung des Touchpads hat damit einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Nutzers. Ein größeres Touchpad mit größeren Abständen zwischen den Tasten führt zu einer besseren Leistung.

Alterseffekte zeigten sich in der benötigten Zeit für die Eingabe des ersten Buchstabens sowie des gesamten Wortes, in der Spurabweichung und im Abstand zwischen Tastendruck und Tastenmittelpunkt, jedoch nicht im relativen Fehler. Mögliche Erklärungen dieser Effekte werden in der Diskussion erläutert.

In der subjektiven Bewertung zeigte sich eine positivere Gesamtbewertung, je größer das Touchpad war. Zu beachten ist hierbei, dass für den Vergleich der sechs Skalierungen nur kurze Bedienblöcke durchgeführt wurden. Zur Untersuchung von Wechseleffekten waren die Bedienblöcke dagegen län-

ger. In der Nennung der Präferenz hinsichtlich der Skalierung des Touchpads (Vergleich von 5.0 x 7.3 cm vs. 3.5 x 5.1 cm) nach jedem Wechselblock bevorzugte die Mehrheit der Probanden das kleinere Touchpad, vermutlich aufgrund der kürzeren Bedienwege, die sich in den langen Blöcken als deutlicher Vorteil zeigten. Auf diesen Aspekt wird in der Diskussion genauer eingegangen.

4.3.3 Wechselkosten bei Änderung der Skalierung des Touchpads

Zur Berechnung von Wechselkosten (im engeren Sinne) wurden die Daten innerhalb einer Bediensequenz verglichen: Die Leistung in einer Aufgabe A (100%) und B (49%) nach einem Wechsel (von A nach B oder B nach A), das heißt, die Leistung in A_1 und B_1 , wurde mit der Leistung in der ersten (A_2 und B_2) und in der zweiten Wiederholung (A_3 und B_3) verglichen. Die Versuchsaufgabe, das Eintippen von Ortsnamen auf einer QWERTZ-Tastatur, wurde in den Abschnitten 4.2.3 und 4.2.4, die Abfolge der Einzelaufgaben in Abschnitt 4.2.5 näher beschrieben.

Wie bereits bei der Beschreibung von Experiment I erwähnt, beinhaltet die Analyse von Wechselkosten meist nur den Vergleich der Aufgabe nach einem Wechsel mit der ersten Wiederholung und erwartet in der Wiederholungsaufgabe eine höhere Leistung. Wie vermutet wurde und sich auch in Experiment I gezeigt hat, können Wechseleffekte auch noch in der zweiten Wiederholung auftreten, das heißt, nicht nur eine höhere Leistung in A_2 verglichen zu A_1 , sondern zusätzlich eine höhere Leistung in A_3 verglichen zu A_2 . Um diesen Aspekt zu betrachten, wurden die zweiten Wiederholungen wie in Experiment I zusätzlich in die Analyse einbezogen.

Des Weiteren sollen in den folgenden Abschnitten nicht nur die Wechselkosten betrachtet werden, sondern zusätzlich generelle Wechseleffekte beispielsweise bei der Betrachtung von Interaktionen.

Ersteingabe- und Gesamteingabezeit

Für die Ersteingabezeit (Abbildung 4-14 links) ließ sich ein Haupteffekt der Aufgabe ($F(1,9,53.1) = 24.69, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.47$) im Sinne von Wechselkosten feststellen: Post hoc Bonferroni Tests zeigten, dass die Probanden in Aufgabe 1 ($M = 1695$ ms, $SD = 461$ ms) länger brauchten als bei Aufgabe 2 ($M = 1551$ ms, $SD = 484$ ms; $p < 0.01$) und Aufgabe 3 ($M = 1510$ ms, $SD = 478$ ms; $p < 0.01$). Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen Aufgabe 2 und 3 ($p > 0.2$). Daneben zeigte sich ein Haupteffekt der Touchpadskalierung ($F(1,28) = 6.73, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.19$). Bei kleiner Touchpadskalierung ($M = 1613$ ms, $SD = 473$ ms) dauerte die Eingabe länger als bei großer Touchpadskalierung ($M = 1557$ ms, $SD = 486$ ms). Als weiterer Haupteffekt zeigte sich ein Unterschied zwischen den Alterskategorien ($F(1,28) = 37.94, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.58$). Ältere Probanden ($M = 1890$ ms, $SD = 444$ ms) brauchten mehr Zeit für die Eingabe als jüngere Probanden ($M = 1280$ ms, $SD = 278$ ms).

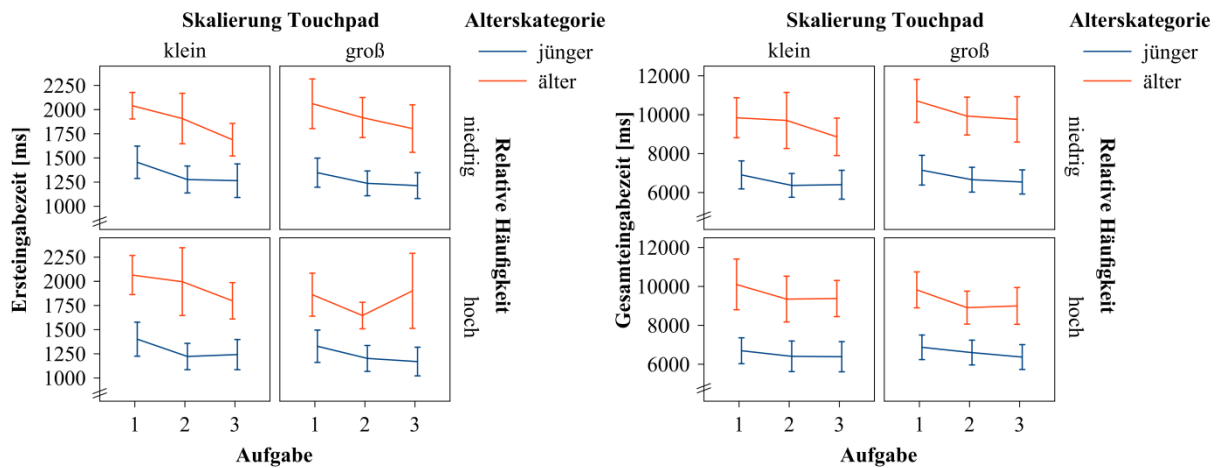


Abbildung 4-14: Mittlere Ersteingabezeit [ms] (links) und Gesamteingabezeit [ms] (rechts) in Abhängigkeit von der Aufgabe, der Skalierung des Touchpads, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Der Effekt der Aufgabe ($F(1.5,33.8) = 25.09, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.52$) zeigte sich ebenfalls für die Gesamteingabezeit (Abbildung 4-14 rechts). In Aufgabe 1 ($M = 8504$ ms, $SD = 2265$ ms) brauchten die Probanden länger als bei Aufgabe 2 ($M = 7990$ ms, $SD = 2228$ ms; $p < 0.01$) und Aufgabe 3 ($M = 7834$ ms, $SD = 2073$ ms; $p < 0.01$). Der post hoc Vergleich von Aufgabe 2 und 3 war nicht signifikant ($p > 0.2$). Es ließ sich außerdem ein Effekt der relativen Aufgabenhäufigkeit feststellen ($F(1,23) = 10.09, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.31$). In Aufgaben mit niedriger relativer Häufigkeit (0.23) brauchten die Probanden länger für die Eingabe als in Aufgaben mit hoher relativer Häufigkeit (0.77). Dabei trat eine Interaktion (Abbildung 4-15) zwischen den Faktoren Aufgabe und relative Aufgabenhäufigkeit ($F(1.7,38.7) = 3.77, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.14$) auf. Die Abnahme der Gesamteingabezeit über die Aufgaben trat bei hoher relativer Aufgabenhäufigkeit (0.77) nur zwischen Aufgabe 1 und 2 auf, bei niedriger relativer Aufgabenhäufigkeit (0.23) kontinuierlich von Aufgabe 1 zu Aufgabe 3.

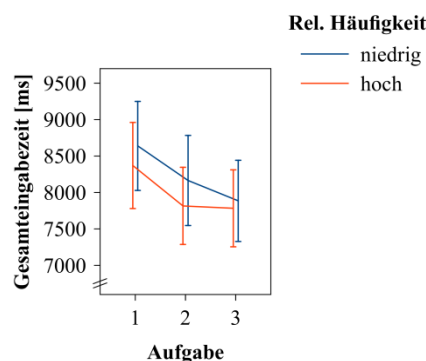


Abbildung 4-15: Mittlere Gesamteingabezeit [ms] in Abhängigkeit von der Aufgabe und der relativen Häufigkeit der Aufgabe. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Auch der Haupteffekt Touchpadskalierung ($F(1,23) = 4.51, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.16$) war signifikant, interagierte (Abbildung 4-16; $F(1,23) = 6.53, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.22$) allerdings ebenfalls mit der relativen Aufgabenhäufigkeit. Bei großer Touchpadskalierung und seltenen Aufgaben brauchten die Probanden - unerwartet und entgegen den Befunden zu Skalierungseffekten (vgl. Abschnitt 4.3.2) - am meisten Zeit für die Eingabe des Gesamtwortes, bei häufigen Aufgaben nominell am wenigsten Zeit.

Die Gesamteingabezeit bei kleiner Touchpadskalierung lag dazwischen, wobei es keine Unterschiede zwischen den relativen Aufgabenhäufigkeiten gab. Auf diesen Effekt wird in der Diskussion tiefer eingegangen.

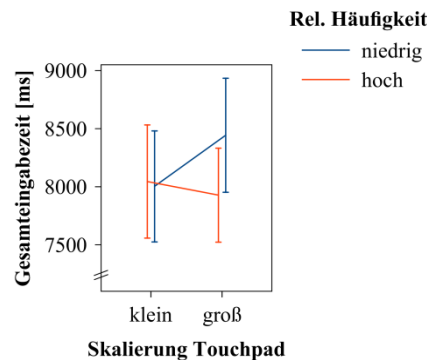


Abbildung 4-16: Mittlere Gesamteingabezeit [ms] in Abhängigkeit von der Skalierung des Touchpads und der relativen Häufigkeit der Aufgabe. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Daneben zeigte sich ein signifikanter Alterseffekt ($F(1,23) = 31.90, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.58$). Ältere Probanden ($M = 9608$ ms, $SD = 1932$ ms) brauchten deutlich mehr Zeit für die Eingabe des gesamten Wortes als jüngere Probanden ($M = 6611$ ms, $SD = 1218$ ms).

Relativer Fehler

Im relativen Fehler der Ersteingaben (Abbildung 4-17 links) trat nur ein Effekt der Touchpadskalierung auf ($F(1,28) = 37.17, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.57$). Bei großer Touchpadskalierung ($M = 0.026$, $SD = 0.071$) war der relative Fehler geringer als bei kleiner Skalierung ($M = 0.126$, $SD = 0.156$).

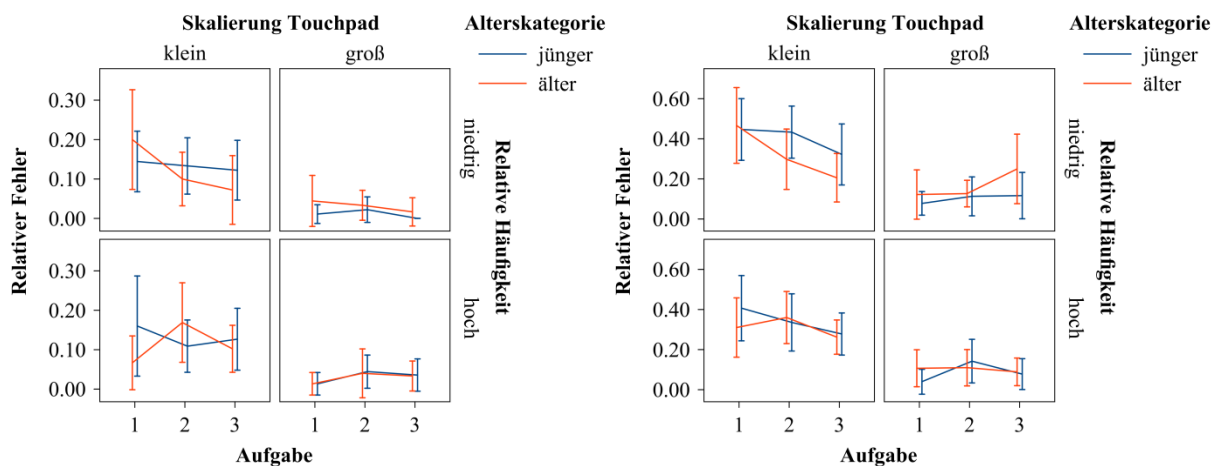


Abbildung 4-17: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit von der Aufgabe, der Skalierung des Touchpads, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Dies zeigte sich ebenfalls im relativen Fehler bei der Eingabe des Gesamtwortes (Abbildung 4-17 rechts). Bei großer Skalierung des Touchpads war der relative Fehler geringer als bei kleiner Skalierung ($F(1,28) = 80.40, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.74$). Dabei zeigte sich eine Interaktion zur Aufgabe (Abbildung 4-18; $F(1.9,52.0) = 6.37, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.19$). Bei großer Touchpadskalierung nahm die

Fehlerhäufigkeit von Aufgabe 1 zu Aufgabe 3 minimal zu, bei kleiner Touchpadskalierung zeigte sich eine starke Abnahme des relativen Fehlers von Aufgabe 1 zu Aufgabe 3.

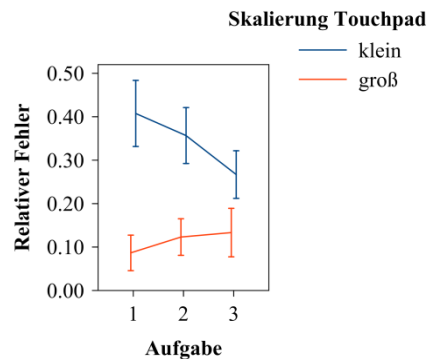


Abbildung 4-18: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des gesamten Wortes in Abhängigkeit von der Aufgabe und der Skalierung des Touchpads. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Zu beachten ist erneut die Größe des relativen Fehlers bei der Eingabe des Gesamtwortes: Bei großer Touchpadskalierung lag der relative Fehler durchschnittlich bei 0.114 ($SD = 0.181$), bei kleiner Touchpadskalierung sogar bei 0.344 ($SD = 0.259$).

Spurabweichung

Im Betrag der Spurabweichung (Abbildung 4-20 links) zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Alterskategorien ($F(1,28) = 6.29$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.18$). Ältere Probanden wiesen einen höheren Betrag der Spurabweichung auf als jüngere Probanden. Daneben zeigte sich eine signifikante Interaktion (Abbildung 4-19) zwischen der Touchpadskalierung und der Aufgabe ($F(1,9,54.5) = 5.7$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.17$). Bei großer Touchpadskalierung nahm der Betrag der Spurabweichung von Aufgabe 1 zu 3 minimal ab, bei kleiner Skalierung von Aufgabe 1 zu Aufgabe 3 minimal zu.

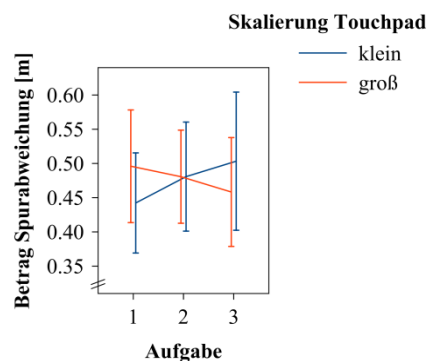


Abbildung 4-19: Mittlerer Betrag der Spurabweichung [m] in Abhängigkeit von der Aufgabe und der Skalierung des Touchpads. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

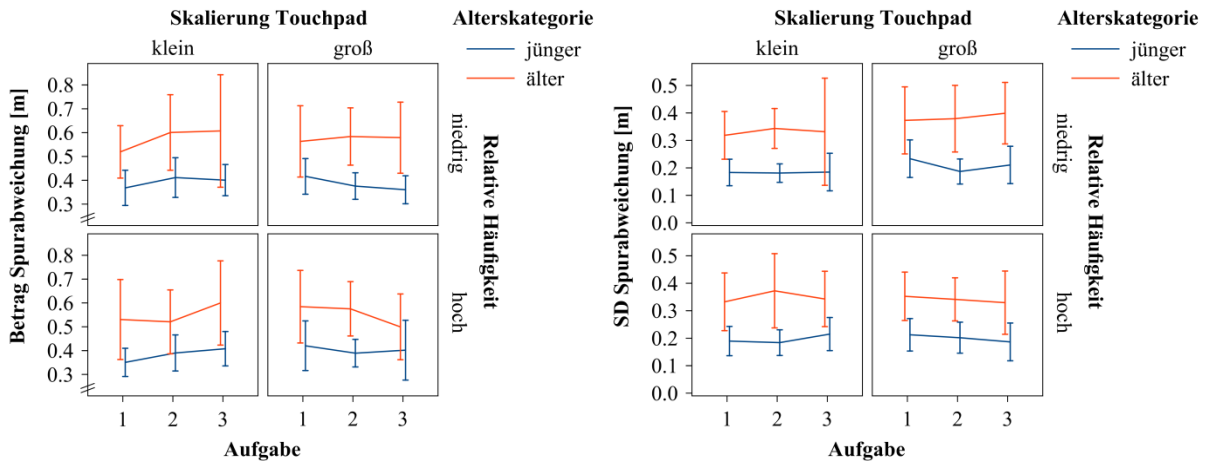


Abbildung 4-20: Mittlerer Betrag der Spurabweichung [m] (links) und mittlere *SD* der Spurabweichung [m] (rechts) in Abhängigkeit von der Aufgabe, der Skalierung des Touchpads, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

In der *SD* der Spurabweichung (Abbildung 4-20 rechts) zeigte sich wiederum der bereits für den Betrag der Spurabweichung beschriebene Alterseffekt ($F(1,28) = 8.85, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.24$). Es trat ferner ein Effekt der Touchpadskalierung ($F(1,28) = 5.25, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.16$) auf, der jedoch mit der relativen Aufgabenhäufigkeit interagiert (Abbildung 4-21; $F(1,28) = 5.19, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.16$). In häufigen Aufgaben war die *SD* der Spurabweichung für beide Skalierungen gleich hoch, bei seltenen Aufgaben war sie für die größere Skalierung minimal höher, für die kleinere Skalierung minimal niedriger als in den häufigen Aufgaben.

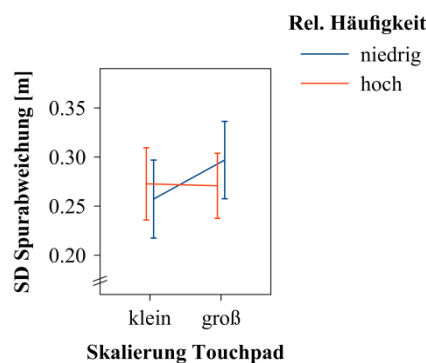


Abbildung 4-21: Mittlere *SD* der Spurabweichung [m] in Abhängigkeit von der Skalierung des Touchpads und der relativen Häufigkeit der Aufgabe. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Fazit Wechselkosten

Nach einem unerwarteten Wechsel der motorischen Skalierung ließen sich sowohl in der Ersteingabe als auch der Gesamteingabezeit Wechselkosten feststellen. Abhängig von der relativen Häufigkeit der Aufgabe traten diese in Wiederholung 1 oder in beiden Wiederholungen auf. Entgegen den Ergebnissen hinsichtlich genereller Effekte der Touchpadskalierung (Abschnitt 4.3.2) ließ sich in der Analyse von Wechseleffekten in seltenen Aufgaben bei großer Touchpadskalierung die höchste Gesamteingabezeit feststellen. Auf diesen Befund wird in der Diskussion genauer eingegangen. Für das Gesamtwort ließen sich außerdem Wechselkosten in der relativen Fehlerhäufigkeit abhängig von der Touchpadskalierung zeigen. Bei großer Skalierung des Touchpads blieb die Fehlerhäufigkeit über die Auf-

gaben annähernd konstant, bei kleiner Skalierung des Touchpads nahm sie von Aufgabe 1 zu Aufgabe 3 deutlich ab. In der Spurhaltung ließen sich keine einheitlichen Effekte feststellen.

Neben den Wechselkosten zeigten sich typische Alterseffekte: Ältere Probanden waren langsamer bei der Ausführung der Aufgabe und zeigten eine höhere Ablenkung als jüngere Probanden.

4.3.4 Mischkosten

Neben der Untersuchung von Wechselkosten im engeren Sinne sollten als weitere Wechseleffekte wie in Experiment I auftretende Mischkosten betrachtet werden. Mischkosten sind relativ globale Kosten und entstehen dadurch, dass in einem Aufgaben-Block Wechsel auftreten können (Kiesel et al., 2010). Als Nachweis von Mischkosten sollten sich daher Vorteile der Baseline gegenüber den Wiederholungen in gemischten Blöcken ergeben. Mischkosten wurden daher über den Vergleich der mittleren Leistung in einer Aufgabe (A_B) in der Baseline und der Wiederholung (A_2) dieser Aufgabe in gemischten Blöcken berechnet. Es wurde zusätzlich unterschieden, ob die Aufgabe im gemischten Block eine hohe (0.77) oder niedrige (0.23) relative Häufigkeit hatte.

In den Maßen für die Eingabezeit, den relativen Fehler und die Spurabweichung führte der Faktor Block allerdings nie zu signifikanten Unterschieden. Gemischte und reine Blöcke unterscheiden sich also nicht signifikant, das heißt, es lassen sich keine Mischkosten feststellen.

4.4 Diskussion

Das Experiment sollte dazu dienen, die bisherigen Ergebnisse hinsichtlich Skalierungs- und Wechselwirkungen der Anzeigenskalierung auf die sensomotorische Leistungsfähigkeit um Erkenntnisse hinsichtlich der Touchpadskalierung zu ergänzen. Dazu wurde auf sechs unterschiedlich großen Touchpads bedient und die entsprechende sensomotorische Leistungsfähigkeit der Nutzer betrachtet. Analog zu Experiment I sollte zusätzlich die Nutzung variabler Skalierungen untersucht werden, wozu wiederum das Wechselkostenparadigma herangezogen wurde. Ein Auftreten von Wechsel- oder Mischkosten in der sensomotorischen Leistungsfähigkeit der Nutzer würde gegen variable Konzepte hinsichtlich der Handlungsausführung sprechen. Als Versuchsaufgabe gaben die Probanden wie in Experiment I über ein Touchpad Ortsnamen auf einer auf der Anzeige dargestellten QWERTZ-Tastatur ein, während sie eine Spurhaltungsaufgabe in der Fahrsimulation ausführten.

In der Methodik ergaben sich von Experiment I zu Experiment II (neben dem Fokus auf die Skalierung des Touchpads) ein paar Änderungen: Zur genaueren Differenzierung wurden sechs Touchpadskalierungen (in Experiment I nur zwei Anzeigenskalierungen) in die Untersuchung einbezogen. Weiterhin wurde zur Stichprobenbeschreibung ein Motoriktest eingeführt. Neben den zu erwartenden Unterschieden zwischen den Altersgruppen ließen sich darin allerdings keine Auffälligkeiten einzelner Probanden feststellen. Ebenfalls zur Beschreibung der Stichprobe wurden Maße der Handgröße sowie

der Länge und Breite möglicher Bedienfinger erfasst. In diesen Maßen zeigten sich ebenfalls keine Auffälligkeiten, das heißt, die Stichprobe war homogen.

Analog zu den Ergebnissen aus Experiment I wurde erwartet, dass sich erneut Wechselkosten und Skalierungseffekte nachweisen lassen. Des Weiteren sollen Empfehlungen hinsichtlich der Touchpadskalierung und zur Gestaltung des absoluten Bedienkonzeptes, insbesondere der Verwendung variabler Touchpadskalierungen, abgeleitet werden.

4.4.1 Skalierungseffekt des Touchpads

Wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben, ist die sensomotorische Leistungsfähigkeit stark von der Skalierung des Touchpads abhängig: Beim Vergleich von sechs Skalierungen zeigte sich eine niedrigere Leistungsfähigkeit der Nutzer bei kleineren Skalierungen des Touchpads in Form von längeren Ersteingabe- sowie Gesamteingabezeiten, einem erhöhten relativen Fehler und einem erhöhten Abstand zwischen Tastendruck und Mittelpunkt der Zieltaste. Die größten zwei oder drei Touchpadskalierungen unterschieden sich in vielen Vergleichen nicht.

Diese Unterschiede in der sensomotorischen Leistungsfähigkeit wurden in der subjektiven Bewertung widergespiegelt. Zusammenfassend zeigte sich eine positivere Bewertung, je größer das untersuchte Touchpad war. Zu beachten ist hierbei, dass für den Vergleich der sechs Touchpadskalierungen nur kurze Bedienblöcke durchgeführt wurden.

Entgegen den Befunden zu Skalierungseffekten der Anzeige, die durch einen Abgleich von Geschwindigkeit und Genauigkeit interpretiert wurden, scheinen die Ergebnisse zur Touchpadskalierung eindeutig: Touchpads von geringerer Skalierung sind schwieriger zu bedienen (objektiv und subjektiv) als größere Touchpadskalierungen. Die schlechtere Bedienbarkeit zeigt sich sowohl in der Geschwindigkeit (Ersteingabe- und Gesamteingabezeit) als auch der Genauigkeit (Abstand zwischen Tastendruck und Mittelpunkt, relativer Fehler) der Bedienung.

Betrachtet man diese Ergebnisse im Kontext von Fitts' Law, lassen sich die Befunde nicht erklären: Nach Fitts' Law, das in den folgenden Studien genauer aufgegriffen wird, bleibt die Schwierigkeit einer Zielbewegung konstant, wenn man Zielgröße und Zielentfernung im gleichen Verhältnis skaliert - wie es in der vorliegenden Studie bei den untersuchten Touchpadskalierungen der Fall war. Dementsprechend sollte trotz Skalierung die Bedienbarkeit konstant bleiben. Dennoch wird die Ursache der Ergebnisse dieser Untersuchung in den höheren Anforderungen an die Motorik bei Bedienung auf sehr kleinen Touchpads vermutet, das heißt, in einer höheren Schwierigkeit der Zielbewegung auf kleinen Touchpads. In diesem Zusammenhang konnten, wie eingangs beschrieben, bereits mehrere Studien nachweisen (Chapuis & Dragicevic, 2011; Sutter & Ziefle, 2004), dass sehr kleine Ziele zu überproportionalen Leistungseinbußen führen und die Skalierungsinvarianz, die Fitts' Law postuliert, nicht für sehr kleine Ziele gilt. Dieser Effekt scheint auch in der vorliegenden Studie aufzutreten. Die Zieltasten sind bei sehr kleinen Skalierungen des Touchpads so klein, dass hohe Anforderungen an die Bedien-

genauigkeit entstehen. Trotz geringerer Zielentfernung, die sich auf kleineren Touchpads beim absoluten Bedienprinzip ergibt, wird die Skalierungsinvarianz aufgehoben und die Bedienung schwieriger als auf größeren Touchpads.

Neben den direkten Effekten der Touchpadskalierung auf die Bedienbarkeit zeigten sich (im Gegensatz zu Experiment I) gleichgerichtete Effekte auf die Primäraufgabe des Fahrens. Die Spurabweichung in der Fahraufgabe diente wiederum als Kenngröße für die Ressourcenanforderung der Bedienungsaufgabe. Das Ausmaß des Leistungsabfalls in Mehraufgabensituationen wird dabei generell durch die beiden Aspekte Ressourcenbedarf und Ressourcenüberlappung bestimmt (vgl. Ressourcenmodelle; Wickens, 2008). Die Überlappung von Ressourcen zwischen Fahr- und Bedienungsaufgabe entspricht sich bei den verschiedenen Touchpadskalierungen und kann daher als Ursache für Leistungsunterschiede ausgeschlossen werden. Der auftretende Effekt, dass bei Bedienung auf den kleinsten Touchpadskalierungen die Spurabweichung höher ist als bei den größten Touchpadskalierungen, wird daher durch den Ressourcenbedarf erklärt: Die Leistung in einer Primäraufgabe wird umso geringer, je mehr Ressourcen die Nebenaufgabe beansprucht. Eine bessere Spurhaltung (niedrigere Spurabweichung) spricht für eine geringere Belastung der Ressourcen durch die Bediensituation, was als eine geringere Ablenkung von der Fahraufgabe gewertet wird. Die Bedienung auf kleineren Touchpadskalierungen ist verbunden mit einer etwas höheren Spurabweichung und scheint demnach höhere Anforderungen an die Ressourcen zu stellen. Sie lenkt daher minimal stärker ab als die Bedienung auf größeren Touchpadskalierungen.

4.4.2 Wechselkosten bei Änderung der Skalierung des Touchpads

Analog zu Experiment I sollte zusätzlich zu generellen Effekten der Touchpadskalierung die Nutzung variabler Skalierungen untersucht werden, wozu wiederum das Wechselkostenparadigma herangezogen wurde. Nach einem unerwarteten Wechsel der motorischen Skalierung ließen sich sowohl in der Ersteingabe- als auch in der Gesamteingabezeit deutliche Wechselkosten feststellen. In der Aufgabe direkt nach einem Skalierungswechsel waren die Ersteingabe- und Gesamteingabezeit verglichen mit der darauffolgenden Wiederholungsaufgabe erhöht. Abhängig von der relativen Häufigkeit der Aufgabe traten diese Wechselkosten in der ersten (hohe relative Aufgabenhäufigkeit (0.77)) oder in beiden Wiederholungen auf (niedrige relative Aufgabenhäufigkeit (0.23)). Eine mögliche Erklärung dafür, dass Wechseleffekte bei seltenen Aufgaben auch noch in der zweiten Wiederholung nachweisbar sind, könnte wie in Experiment I in dem Prozess der retroaktiven Anpassung (Meiran, 1996; Meiran, 2010) liegen, der den Wechsel zwischen Aufgaben erschwert. Wie bereits in Experiment I erläutert, beinhaltet dieser Prozess, dass sich das kognitive System auf die Ausführung einer Aufgabe A optimiert, was die Ausführung einer folgenden Aufgabe B behindert. Bei häufig durchgeführten Aufgaben könnte diese Anpassung gegebenenfalls weiter vorangeschritten sein und den Wechsel zu den seltenen Aufgaben daher auch noch in der zweiten Wiederholung behindern. Man könnte vermuten, dass die Anpassung an seltene Aufgaben weniger vorangeschritten ist, da diese nicht so häufig am Stück durchge-

führt werden. Damit fällt der Wechsel hin zur häufigeren Aufgabe leichter und wirkt sich nur in der Aufgabe direkt nach einem Wechsel aus.

Für das Gesamtwort ließen sich außerdem Wechselkosten im relativen Fehler abhängig von der Touchpadskalierung zeigen. Bei großer Skalierung des Touchpads blieb der relative Fehler über die Aufgaben (Wechsel und Wiederholungen) annähernd konstant, bei kleiner Skalierung des Touchpads nahm er von Aufgabe 1 über Aufgabe 2 zu Aufgabe 3 deutlich ab. Eine mögliche Erklärung könnte darin liegen, dass die Zieltasten bei größerer Touchpadskalierung (beim absoluten Bedienprinzip) größer sind als bei kleinerer Touchpadskalierung (vgl. Abschnitt 4.4.1). Ein Wechsel vom kleinen zum größeren Touchpad führt trotz Verarbeitung des Wechsels nicht zu einer Erhöhung des relativen Fehlers, da bei großer Touchpadskalierung durch die größeren Zieltasten eine ungenauere Bedienung toleriert wird. Beim Wechsel zur kleineren Touchpadskalierung steigen dagegen plötzlich die Genauigkeitsanforderungen der Bedienung, da die Zieltasten (als Fläche auf dem Touchpad) kleiner sind. Auf diese Änderung der Anforderungen muss sich der Nutzer einstellen und das mentale Aufgaben-Set (Meiran, 2010) muss darauf angepasst werden. Bis das Aufgaben-Set angepasst ist, könnten daher verstärkt Fehler entstehen, was das Auftreten von Wechselwirkungen im relativen Fehler beim Wechsel zur kleineren Touchpadskalierung erklären könnte.

Auch beim Wechsel der motorischen Skalierung zeigten sich damit Wechselkosten - auch im untersuchten angewandten Kontext. Diese entstehen vermutlich dadurch, dass das mentale Aufgaben-Set (Meiran, 2010) den veränderten Aufgabenbedingungen angepasst werden muss, was zu einer verlangsamten (Ersteingabe- und Gesamteingabezeit) und - abhängig von der Touchpadskalierung - fehleranfälligeren (relativer Fehler) Bedienung führt.

In der Analyse von Wechselwirkungen ließ sich weiterhin der unerwartete Befund feststellen, dass die Gesamteingabezeit in seltenen Aufgaben bei großer Touchpadskalierung durchschnittlich am höchsten war. Analog zu den Ergebnissen hinsichtlich genereller Skalierungseffekte des Touchpads hätte man erwartet, dass die Gesamteingabezeit bei kleinerer Skalierung höher ist als bei der größeren Skalierung (vgl. Abschnitt 4.4.1). Eine mögliche Erklärung könnte ein Kontrasteffekt sein: Sind die Probanden auf die kleine Touchpadskalierung und die kurzen Bedienwege eingestellt, da häufiger auf dem kleinen Touchpad bedient wird, führt ein Wechsel zur großen Touchpadskalierung mit den entsprechend längeren Bedienwegen zu einer überproportionalen Zunahme der Gesamteingabezeit. Wird häufiger auf der großen Touchpadskalierung bedient, führt ein Wechsel zum kleineren Touchpad nur zu einer geringen Zunahme der Gesamteingabezeit, da die Umstellung im Hinblick auf die Gesamteingabezeit durch kurze Bedienwege erleichtert wird. Durch die in diesem Beispielfall häufigere Bedienung auf dem größeren Touchpad führt der Wechsel zurück zur größeren Touchpadskalierung nicht zu einem übermäßigen Anstieg der Gesamteingabezeit, da die Nutzer an die längeren Bedienwege gewöhnt sind.

In der Spurabweichung zeigten sich gegenläufige Effekte abhängig von der Touchpadskalierung und teils abhängig von der relativen Häufigkeit der Aufgaben. Diese Befunde lassen sich im Kontext der generellen Skalierungseffekte und der auftretenden Wechselkosten nicht erklären, die Unterschiede in der Spurabweichung sind aber auch nur von geringer Größe. Einzig die Altersgruppe führte zu deutlichen Unterschieden in der Spurabweichung, worauf in Abschnitt 4.4.4 eingegangen wird.

4.4.3 Mischkosten

Analog zu Experiment I sollten als weitere Wechseleffekte auftretende Mischkosten betrachtet werden, die dadurch entstehen, dass in einem Aufgaben-Block Wechsel auftreten können. Als Nachweis von Mischkosten sollten sich daher Vorteile der Baseline gegenüber den Wiederholungen in gemischten Blöcken ergeben. In den Maßen der Eingabezeit (Ersteingabe- und Gesamteingabezeit), des relativen Fehlers und der Spurabweichung führte der Faktor Block allerdings nie zu signifikanten Unterschieden. Gemischte und reine Blöcke unterscheiden sich also nicht, das heißt, es lassen sich keine Mischkosten feststellen.

Das fehlende Auftreten von Mischkosten ließ sich bereits in Experiment I feststellen - dort zeigten sich sogar teilweise Mischgewinne, also Vorteile der gemischten Blöcke gegenüber der Baseline. Wie bereits in Experiment I erläutert, lassen sich die Befunde inhaltlich schwer erklären, da ein Block, in dem die Probanden immer die gleiche Aufgabenskalierung bearbeiten, gegenüber gemischten Blöcken aus der Sicht des Wechselkostenparadigmas Vorteile zeigen sollte. Die Probanden können sich in Baseline-Blöcken auf die zu bearbeitenden Aufgaben perfekt vorbereiten und es sind keine Wechsel und damit keine Anpassungen des mentalen Aufgaben-Sets (Meiran, 2010) nötig. In Experiment I wurde als Ursache für das fehlende Auftreten von Mischkosten entweder ein Motivationseffekt, die Probanden reagieren auf die vermeintlich anspruchsvolleren gemischten Blöcke mit einer gesteigerten Motivation, oder die kurze Dauer der Baseline-Blöcke vermutet. Ein Motivationseffekt lässt sich auch bei Experiment II nicht ausschließen. Da außerdem die Methodik zur Betrachtung der Mischkosten aus Zeitgründen nicht optimiert wurde, könnte das fehlende Auftreten von Mischkosten auch erneut der mangelnden Vergleichbarkeit zwischen den kürzeren Baseline-Blöcken (je 10 Aufgaben) und den längeren gemischten Blöcken (je 78 Aufgaben) sowie dem besseren Bedienfluss in den längeren, gemischten Blöcken zugeschrieben werden.

4.4.4 Alterseffekte

Wie in Experiment I zeigten sich in mehreren Maßen typische Alterseffekte: Ältere Probanden brauchten für die Eingabe mehr Zeit und zeigten eine größere Spurabweichung in der Fahraufgabe. Als ein Maß für die Bediengenauigkeit wurde in der vorliegenden Studie der Abstand zwischen Tastendruck und Tastenmittelpunkt erfasst. Hier zeigte sich, dass ältere Probanden genauer bedienen: Der Abstand zwischen Tastendruck und Tastenmittelpunkt war bei älteren Probanden geringer als bei jüngeren Probanden, das heißt, die Zieltaste wurde bei älteren Probanden mittiger getroffen. Das andere vor-

handene Maß der Bediengenauigkeit, der relative Fehler, wies wie in Experiment I keinen Unterschied zwischen den Altersgruppen auf.

Diese Befunde könnten analog zu Experiment I durch eine Verschiebung des Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleichs interpretiert werden (vgl. Abschnitt 3.4.4). Im Abgleich von Bewegungsgeschwindigkeit und -genauigkeit zeigen Ältere eine Tendenz zur Genauigkeit auf Kosten der Geschwindigkeit und benötigen bei gleichem Präzisionslevel mehr Zeit für die Bewegung als jüngere Probanden (Ketcham & Stelmach, 2004). Die an sich reduzierte Bewegungsgenauigkeit älterer Nutzer (vgl. Rinkeauer, 2008; Ketcham & Stelmach, 2004), die sich in der vorliegenden Studie beispielsweise auch in der signifikant geringeren Leistung älterer Probanden im Motoriktest zeigt, könnte somit durch eine langsamere Bedienung kompensiert werden. Damit bedienen Ältere (wie in der vorliegenden Studie) zwar langsamer, zeigen allerdings eine teils höhere (im Abstand zwischen Tastendruck und Tastenmittelpunkt), teils gleich hohe (relativer Fehler) Bediengenauigkeit verglichen zu jüngeren Probanden.

Daneben wiesen ältere Probanden erneut eine höhere Spurabweichung, die als Kenngröße für die Ressourcenanforderung erhoben wurde, auf. Mögliche Ursachen wurden im Kontext von Experiment I (Abschnitt 3.4.4) diskutiert.

4.4.5 Empfehlungen

Neben der Untersuchung von generellen Skalierungs- und Wechseleffekten bestand ein weiteres Ziel der Untersuchung in der Ableitung von Gestaltungsempfehlungen bezüglich Touchpadskalierung und der Nutzung variabler Touchpadskalierungen innerhalb eines Menüs. Hinsichtlich der Touchpadskalierung ließ sich feststellen, dass diese einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Nutzers hat. Ein größeres Touchpad mit größeren Abständen zwischen den Tasten führt zu einer besseren Leistung, wobei sich die größten zwei oder drei getesteten Touchpadskalierungen in mehreren Vergleichen nicht unterschieden.

Drei Aspekte sind jedoch bei einer Gestaltungsempfehlung der Touchpadskalierung zu beachten:

- Der Vergleich hinsichtlich der Touchpadskalierung ist stark abhängig von der Anzahl an möglichen Bedienfeldern auf der Anzeige. Je mehr Funktionen auf der Anzeige sind, desto geringer wird der Abstand zwischen zwei Tasten auf dem Touchpad und desto größer sollte das Touchpad sein. In der Tastaturaufgabe handelt es sich im Fahrzeugkontext um ein sehr anspruchsvolles, extremes Bedienbeispiel mit vielen Tasten. Bei geringeren Tastenzahlen kann ein kleineres Touchpad ausreichen und der Tastenabstand dennoch ausreichend groß gewählt werden. In diesem Fall müsste die Texteingabe über ein alternatives Bedienkonzept realisiert werden.
- Eine Empfehlung hinsichtlich der Touchpadskalierung ist außerdem in starkem Maß abhängig vom getesteten Bedienkonzept. Der hier dargestellte Versuch lässt Empfehlungen für eine ab-

solute Bedienung ableiten. Für andersartige Bedienkonzepte wie beispielsweise Handschrift-eingabe oder relative Bedienkonzepte sind die Ergebnisse kaum übertragbar.

- Weiterhin ist die Kürze der Testblöcke kritisch anzumerken. Diese spiegelt zwar kurze, einzelne Bedienhandlungen wider, kann aber eine Dauerbedienung und die entsprechende Ermüdung bei großer Bedienfläche aufgrund weiter, unkomfortabler Bedienwege nicht abbilden. Dementsprechend kann es abhängig von der Anzahl an Bedienvorgängen zu Unterschieden in Präferenzurteilen hinsichtlich der Skalierung kommen, wie sie in diesem Versuch aufgetreten sind - bei länger andauernder Bedienung (während der eigentlichen Untersuchung von Wechseleffekten) wurde aufgrund des erhöhten Bedienkomforts durch kürzere Bedienwege ein kleineres Touchpad bevorzugt (vgl. Zusatzanalyse: Präferenz hinsichtlich der Touchpadskalierung nach länger andauernder Bedienung). Dieser Aspekt sollte bei einer Skalierungsempfehlung berücksichtigt werden.

Unter der Vermutung, dass im Fahrzeug eher einzelne Bedienhandlungen, beispielsweise zum Verstellen des Radiosenders, ausgeführt werden, wurde der Fokus der Bewertung auf kurze Bedienblöcke gelegt. Hier sind größere Eingabeflächen für die Bedienleistung von Vorteil. Das drittgrößte, in dieser Untersuchung getestete Touchpad (Skalierung 4; Tabelle 4-1) wird nach Betrachtung der beschriebenen Ergebnisse als Untergrenze für eine annehmbare Bedienleistung gewertet, da sich die größten zwei oder drei getesteten Touchpads in mehreren Vergleichen nicht unterschieden. Es sollte daher gewährleistet sein, dass das Touchpad für eine Tastaturaufgabe oder eine Aufgabe mit ähnlich vielen Tasten mindestens 4.0 x 5.8 cm groß ist, der Tastenabstand mindestens 5.5 mm beträgt und die Seiten der Zieltasten mindestens 4.8 mm lang sind. Bei den kleineren Touchpadskalierungen treten deutliche Einbußen hinsichtlich Bediengeschwindigkeit und -genauigkeit auf, da die Bedienung durch höhere motorische Anforderungen schwieriger wird. Diese Werte stehen in Einklang mit den Ergebnissen von Sutter und Ziefle (2004), die empfehlen, dass Bewegungsziele bei Touchpadbedienung größer als 5 mm sein sollten.

Wie in Abschnitt 1.1.5 und 1.2.8 beschrieben, ist Flexibilität einer der Hauptvorteile der Touchpadbedienung. Es war allerdings unklar, inwieweit eine Nutzung dieser Flexibilität beispielsweise durch gemischte Bedienkonzepte sinnvoll ist oder ob Änderungen in der Transformation die Effizienz der Bedienung reduzieren. Neben der Skalierungsfragestellung sollte daher anhand des Wechselkostenparadigmas geprüft werden, in welchem Rahmen der Nutzer mit der Flexibilität absoluter Touchpadbedienkonzepte umgehen kann und wie sich unerwartete Wechsel der Bedienumgebung bezogen auf das Touchpad auf die Leistungsfähigkeit auswirken. Da Wechsel- und Mischkosten bisher hauptsächlich im Grundlagenparadigma untersucht wurden, war fraglich, ob sie auch in einer Bediensituation während einer Doppelaufgabe nachweisbar sind.

Durch den Wechsel der Skalierung des Touchpads entstanden deutliche Kosten in der Bedienleistung in Form von längeren Eingabezeiten (Ersteingabe- und Gesamteingabezeit) und einer erhöhten relati-

ven Fehlerhäufigkeit. Die Befunde legen daher nahe, dass unerwartete Wechsel in der motorischen Skalierung die Leistungsfähigkeit des Nutzers deutlich reduzieren, weshalb gemischte motorische Skalierungen als ungünstig zu bewerten sind. Entsprechende Wechselkosten ließen sich in Experiment I bereits für gemischte visuelle Skalierungen zeigen. Es lässt sich damit festhalten, dass auch in der natürlichen Bediensituation während einer Doppelaufgabe Wechselkosten feststellbar sind. Diese treten auch beim Wechsel der sensomotorischen Transformation durch einen Wechsel visueller oder motorischer Skalierung auf. Damit ist insgesamt von einem Wechsel der Skalierung des Anzeigehaltes und des Touchpads abzuraten, sofern dies im Bedienkonzept nicht unbedingt erforderlich ist. Stattdessen ist eine konstante Skalierung von Anzeigehalt und Touchpad empfehlenswert.

4.4.6 Ausblick

Experiment I und II konnten einerseits Skalierungseffekte von Anzeige und Bedienelement aufzeigen. Andererseits konnte nachgewiesen werden, dass in der Bediensituation während der Fahraufgabe Einbußen der sensomotorischen Leistungsfähigkeit des Nutzers auftreten, wenn die Skalierung der Anzeige oder des Touchpads verändert wird. Die Flexibilität von Touchpadbedienung ist damit im Hinblick auf die Skalierung nicht nutzbar, da Wechsel zu einer schlechteren Bedienbarkeit führen.

Ein Befund, auf den an dieser Stelle erneut hingewiesen werden soll, ist der auch in Experiment II generell hohe relative Fehler, der sich beim absoluten Bedienprinzip zeigt. Bei der kleinsten Touchpadskalierung trat in mehr als der Hälfte der Aufgaben mindestens ein Fehler auf. Deshalb ist es bedeutsam, Möglichkeiten zu untersuchen, die Bediengenauigkeit zu steigern und dem Nutzer die absolute Bedienung zu erleichtern.

Daher soll im folgenden Experiment der Fokus dieser Arbeit auf einen weiteren Aspekt absoluter Touchpadbedienung verlagert werden - die Gestaltung von optimalem Feedback über die Zielerreichung. Experiment III wird zur Untersuchung dieses Aspektes als kleinere Pilotstudie ausgeführt. Dadurch ergeben sich einige methodische Änderungen, die im folgenden Abschnitt erläutert werden.

5 Experiment III: Unterstützung der Bedienungsaufgabe durch visuelles Feedback

5.1 Fragestellung

In Experiment III soll die Möglichkeit untersucht werden, die Zielbewegungen bei absoluter Bedienung durch visuelles Feedback über das Erreichen (Berühren mit dem Cursor) des Bewegungsziels (Targets) zu unterstützen. Weiterhin sollen gegebenenfalls entsprechende Empfehlungen abgeleitet werden.

Wie eingangs erläutert, zeigen sich in der Literatur gegensätzliche Effekte von Feedback: Bei Bedienung mit wenigen Zielen auf der Anzeige führt Feedback zu schnellerer Bedienung; auf dichter belegten Anzeigen führt Feedback zu längeren Auswahlzeiten und scheint den Nutzer eher abzulenken (Akamatsu et al., 1995; Cockburn & Brewster, 2005; vgl. Abschnitt 1.2.7). Allerdings ist dabei der Einfluss unterschiedlicher Modalitäten von Feedback zu berücksichtigen (Cockburn & Brewster, 2005).

Es stellt sich daher die Frage, ob Feedback die Zielerreichung in der Menüaufgabe erleichtern kann und wie das Feedback optimal gestaltet werden sollte. Die folgende Studie konzentriert sich dabei auf die Gestaltung von visuellem Feedback bei Cursorkontakt mit dem Bewegungsziel (Taste). Es soll untersucht werden, ob das temporäre Einfärben der aktuell selektierten Taste, in dieser Arbeit als „Highlight“ bezeichnet, den Nutzer in der Zielbewegung unterstützen und das Erreichen einer Zieltaste verdeutlichen kann. Insgesamt werden drei Kombinationen von Cursor und Tastenhighlight und eine reine Cursor-Bedingung verglichen.

Um die Interaktion bei den zu untersuchenden Feedbackvarianten zu beurteilen, wird in der folgenden Studie Fitts' Law herangezogen. Dabei soll auch beurteilt werden, inwiefern Fitts' Law im vorliegenden Kontext (Menübedienung während der Fahraufgabe)²⁶ gültig ist beziehungsweise angewendet werden kann. Zur Bewertung der Feedbackvarianten sollen einzelne Modellanpassungen aufgestellt und unter anderem hinsichtlich des Durchsatzes (Throughput) verglichen werden (vgl. Abschnitt 1.2.4, Anwendung von Fitts' Law).

Wie eingangs erwähnt, konnten Akamatsu et al. (1995) keine Effekte unterschiedlicher Feedbackvarianten auf den Durchsatz in den Modellanpassungen gemäß Fitts' Law zeigen, was sie auf den Zeitpunkt der Feedbackpräsentation (am Ende der Zielbewegung) zurückführten. Allerdings konnten die Probanden in der genannten Studie die Größe des Ziels bei zusätzlichem Feedback besser ausnutzen, so dass die effektiv genutzte Zielbreite bei zusätzlichem Feedback größer war. In dieser Arbeit wird

²⁶ Es konnte bereits eine Passung des Modells in Mehraufgabensituationen gezeigt werden (Shehab & Schlegel, 1993; Schedlbauer, 2007; vgl. Abschnitt 1.2.5), allerdings mit einer vergleichsweise geringeren Varianzaufklärung und bisher noch nicht für Touchpadbedienung während der Fahraufgabe.

das visuelle Feedback analog zur Studie von Akamatsu et al. (1995) erst am Ende der Zielbewegung gegeben. Daher ließe sich ebenfalls vermuten, dass zwar die Bewegungszeit nicht von der Feedback-Bedingung beeinflusst wird, aber die genutzte Zielbreite (effektive Zielbreite). Man könnte erwarten, dass die Varianten mit zusätzlichem Feedback dem Nutzer besser verdeutlichen, wann eine Taste erreicht wurde und aktivierbar ist, so dass weniger Bediengenauigkeit vom Nutzer erfordert wird und die genutzte Zielbreite vergrößert wird. Dementsprechend soll in der folgenden Studie ergänzend zur Modellierung gemäß Fitts' Law betrachtet werden, ob die untersuchten Varianten mit zusätzlichem, visuellem Feedback zu einer Vergrößerung der effektiv genutzten Zielbreite beitragen können.

Die Modellanpassung von Fitts' Law soll dabei entsprechend der Empfehlungen von Soukoreff und MacKenzie (2004) erfolgen. Um eine für das Fahrzeug realistische Bedienaufgabe zu ermöglichen, werden allerdings Anpassungen hinsichtlich der Tastenanordnungen, der getesteten Werte des Schwierigkeitsindex und der Testaufgabe vorgenommen²⁷. Für die Modellanpassung von Fitts' Law werden (gegenüber Experiment I und II) neue Maße erhoben und berechnet, zum Beispiel die effektiv genutzte Zielbreite (W_e , vgl. Formel (5)). Weitere methodische Änderungen ergeben sich dadurch, dass Experiment III zur Untersuchung der geschilderten Fragestellungen als kleinere Pilotstudie ausgeführt wird: Es werden erstens weniger Probanden in die Untersuchung einbezogen als bei Experiment I und II. Aufgrund der geringeren Anzahl an Probanden werden keine Altersgruppen gebildet, sondern lediglich auf eine gleichmäßige Altersverteilung der Probanden geachtet. Zweitens wird zur Betrachtung der unterschiedlichen Feedbackvarianten ein vorhandenes, realistisches Menüsystem verwendet, in dem beim Fahren häufig durchgeführte Bedienaufgaben wie das Verstellen des Radiosenders ausgeführt werden können. Als zusätzliche methodische Änderung wird zur Betrachtung der Feedbackvarianten die Akzeptanzfragestellung durch eine ausgeweitete Befragung ergänzt.

5.2 Methode

5.2.1 Probanden

Insgesamt 16 Probanden (6 Frauen, 10 Männer) nahmen am Experiment teil. 13 Probanden waren Rechtshänder, 1 Proband Ambidexter und 2 Probanden Linkshänder. Alle Probanden waren normalsichtig oder korrigiert normalsichtig, wobei 7 Probanden keine Sehhilfe benötigten, 1 Person Kontaktlinsen und 8 Probanden eine Brille (4 mit Gleitsichtbrille) trugen. Die Probanden ließen sich in drei Altersgruppen einteilen, die annähernd gleich besetzt waren: 5 Probanden waren jünger als 30 Jahre, 6 Probanden zwischen 30 und 50 Jahren, 5 Probanden zwischen 51 und 63 Jahren. Der Altersmittelwert der Stichprobe lag bei 40.4 Jahren bei einer Standardabweichung von 13.4 Jahren.

Die Probanden schätzten die Nutzungshäufigkeit von technischen Geräten (PC, Laptop mit Touchpad, Tablet, Smartphone etc.) vor Untersuchungsbeginn auf einer 5-stufigen Skala (sehr selten - sehr häu-

²⁷ Es werden Zielbewegungen bei der Bedienung eines realistischen Menüsystems als Datengrundlage erhoben.

fig) ein. Der Median der Erfahrung mit Laptops mit Touchpad lag bei 4, das heißt, bei häufiger Nutzung.

5.2.2 Apparatur

Die Apparatur wird in Abschnitt 2 (Generelle Methodik) beschrieben.

5.2.3 Versuchsaufgabe

Zum Vergleich von vier Feedbackvarianten wurde ein für den Fahrzeugkontext angepasstes Menüsystem verwendet, welches eine typische Testumgebung in der Automobilindustrie darstellt. Dieses war in verschiedene Applikationen (Navigation, Radio, Telefon etc.) gegliedert, die jeweils geöffnet werden konnten und über individuelle Anzeigehalte und virtuelle, also auf der Anzeige dargestellte, Tasten verfügten. Zur Bedienung wurde ein Cursor mittels des Touchpads (absolutes Bedienkonzept, vgl. Abschnitt 1.1.6) über eine virtuelle Taste bewegt. Bei Druck auf das Touchpad wurde die der virtuellen Taste zugeordnete Funktion ausgeführt (beispielsweise der entsprechende Sender abgespielt, Abbildung 5-1). Zwischen den Applikationen wurde gewechselt, indem ein Hauptmenü (als Übersicht aller vorhandenen Applikationen) über eine virtuelle Taste im unteren, rechten Eck der Anzeige geöffnet wurde und darüber die jeweilige Applikation gestartet wurde.

In diesem Menüsystem führten die Probanden während der Fahrt in der Fahrsimulation (vgl. Abschnitt 2.2) verschiedene, typische Bedienaufgaben wie das Wechseln des Radiosenders, das Verstellen des Radioklangs oder das Anrufen einer Telefonnummer aus. Für die Aufgabenbearbeitung mussten die Probanden die entsprechenden Funktionen über virtuelle Tasten bedienen und vorher gegebenenfalls über das Hauptmenü die Applikation wechseln. Das bedeutet, dass eine Bedienaufgabe mehrere Zielbewegungen beinhalten konnte, sofern mehrere virtuelle Tasten zur Aufgabenbearbeitung betätigt werden mussten. Es wurden pro Feedbackvariante die gleichen 14 Aufgaben in gleichbleibender Reihenfolge durchgeführt (vgl. Anhang, Tabelle 8-1). Die Instruktion zur jeweiligen Aufgabe wurde vom Versuchsleiter vorgelesen. Die Probanden wurden darauf hingewiesen, erst nach dem vollständigen Vorlesen einer Aufgabe mit der Bedienung zu beginnen und möglichst schnell und fehlerfrei zu bedienen.



Abbildung 5-1: Beispielanzeige Radiomenü im Menüsystem

Die Aufgabenbearbeitung wurde durch akustisches Feedback unterstützt: Bei Betätigen einer Taste wurde ein Klicklaut dargeboten, wenn die jeweilige Funktion nicht implementiert war, ein Hinweis- ton. Zusätzlich gab es kontextspezifische, akustische Ausgaben wie diverse Musiktitel im Radio und Wählsignale im Telefon, um ein realistisches Menüsystem abzubilden.

5.2.4 Feedbackvarianten

Im Versuch wurden vier Feedbackvarianten (Abbildung 5-2: Variante 1-4 von links oben nach rechts unten) verglichen, deren Reihenfolge über die Probanden randomisiert war. Es handelte sich jeweils um ein absolutes Bedienkonzept (vgl. Abschnitt 2.4).

1. Feedbackvariante: Dezent es Highlight, gleichfarbiger Cursor
2. Feedbackvariante: Dominantes Highlight, gleichfarbiger Cursor
3. Feedbackvariante: Dezent es Highlight, verschiedenfarbiger Cursor
4. Feedbackvariante: Cursor ohne Highlight



Abbildung 5-2: Feedbackvarianten 1-4 (nähere Erläuterungen zu Feedbackvarianten siehe Text)

Bei Feedbackvariante 1 wurde der Cursor dominant, die aktuell selektierte und aktivierbare Taste über eine dezente, rötliche Einfärbung angezeigt. Bei Feedbackvariante 2 wurde die aktuelle Taste deutlich orange eingefärbt, wodurch der in der Taste liegende Cursor fast gänzlich überdeckt wurde. Die Überlegung hierzu war, dass eine genaue Cursor- beziehungsweise Fingerposition für die Bedienung unerheblich ist, sobald die gewünschte Taste erreicht ist, und einen Zwang erzeugen könnte, die Taste genau mittig zu bedienen. Insofern könnte ein dominantes Highlight durch das annähernde „Verschwinden“ des Cursors dazu führen, dass die gesamte Tastengröße besser ausgenutzt wird. Bei Feedbackvariante 3 wurde eine aktivierbare Taste über eine dezente, blaue Einfärbung angezeigt, so dass der Cursor jederzeit deutlich erkennbar blieb. Bei Feedbackvariante 4 wurde keine farbige Rückmeldung der aktuellen Taste gegeben, sondern nur die Fingerposition über den Cursor repräsentiert.

5.2.5 Versuchsdesign

Unabhängige Variablen

Es wurde ein 4 (*Feedbackvariante*) x 14 (*Aufgabentyp*) within-Design verwendet.

- Als erster Faktor wurden vier Feedbackvarianten verglichen (siehe 5.2.4 Feedbackvarianten).
- Die zweite unabhängige Variable war die Art der Bedienungsaufgabe, wie beispielsweise das Wechseln des Radiosenders, das Verstellen des Radioklangs oder das Anrufen einer Telefonnummer (vgl. Anhang, Tabelle 8-1).

In der verwendeten Menüsituation waren unterschiedliche Tastengrößen und -entfernungen enthalten. Aus den untersuchten Aufgaben wurden für die Modellanpassung von Fitts' Law ausgewählte Zielbewegungen herangezogen. Die Auswahlkriterien dieser Zielbewegungen werden in Abschnitt 5.3.1 beschrieben.

Abhängige Variablen

Wie in Abschnitt 2.5.2 dargestellt, wurde für jede Aufgabe die Bearbeitungszeit erhoben. Diese beinhaltet die Zeit zwischen der Präsentation einer Bedienungsaufgabe (vgl. Anhang, Tabelle 8-1) und der vollständigen Bearbeitung durch den Probanden. Eine Bedienungsaufgabe konnte, wie in Abschnitt 5.2.3 beschrieben, mehrere Zielbewegungen beinhalten, sofern mehrere virtuelle Tasten zur Aufgabebearbeitung betätigt werden mussten. Als weiteres Zeitmaß wurde daher pro Zielbewegung die Bewegungszeit erhoben. Für die Modellanpassung von Fitts' Law wurden weitere Maße wie der Durchsatz (vgl. Formel (7)) und die effektiv genutzte Zielbreite (vgl. Formel (5)) berechnet. Daneben wurde die Fehlerhäufigkeit vom Versuchsleiter beobachtet. Außerdem wurde die Leistung in der Fahraufgabe über die Spurabweichung gemessen.

Nach jeder Feedbackvariante wurde ein Akzeptanzfragebogen (vgl. Anhang, Abbildung 8-2) ausgefüllt. Dieser enthielt diverse Items wie beispielsweise „Wie gut gefällt Ihnen diese Darstellungsvariante?“, die anhand einer visuellen Analogskala (0 - 15 cm; Abbildung 5-3) beantwortet werden konnten. Zusätzlich konnten die Probanden Vor- und Nachteile der jeweiligen Feedbackvariante frei benennen.



Abbildung 5-3: Visuelle Analogskala für das Item „Wie gut gefällt Ihnen diese Darstellungsvariante?“

Am Ende des Versuchs wurde der Akzeptanzfragebogen erneut als vergleichende Befragung durchgeführt (vgl. Anhang, Abbildung 8-3). Die Probanden sollten abschließend ihren Gesamteindruck von der Bedienmethode und Darstellung beschreiben. Außerdem wurden die Gründe erfragt, aus denen eine Feedbackvariante dem Probanden am besten oder am schlechtesten gefallen hat.

Probandenkennwerte

Zur Stichprobenbeschreibung und zur Kontrolle von Stichprobenunterschieden sollten die Probanden ihre Nutzungshäufigkeit von Touchpads und weiteren technischen Geräten (Smartphones, PC etc.) auf einer fünfstufigen Skala einschätzen. Außerdem wurde anhand von drei Fragen die Technikaffinität der Probanden erfasst. Zusätzlich wurden Seheinschränkungen der Probanden erfragt.

Um sicherzustellen, dass bei Feedbackvariante 3 (dezent es Highlight, verschiedenfarbiger Cursor) der orange Cursor auf blauem Tasten-Highlight gut wahrgenommen wird, wurde ein kurzer Farbsehtest (Abbildung 5-4) durchgeführt. Die Probanden sollten ein Testwort (Apfel) vorlesen, das im gleichen Orange wie der Cursor auf blauem Hintergrund, entsprechend der Farbe des Tasten-Highlights, geschrieben war.



Abbildung 5-4: Farbsehtest

5.2.6 Versuchsablauf

Nach der Begrüßung wurden die Probanden nach Alter, Händigkeit, Nutzungshäufigkeit von Touchpadbedienung und weiteren technischen Geräten, Technikaffinität und dem Tragen von Sehhilfen (Brille, Kontaktlinsen) befragt. Daraufhin wurden die Probanden instruiert, mit Hilfe des Touchpads verschiedene Menüaufgaben auszuführen, um verschiedene Darstellungsmöglichkeiten einer Touchpadbedienung zu testen. Dazu wurde Ihnen das absolute Bedienprinzip (vgl. Abschnitt 2.4, Absolutes Bedienkonzept) erklärt.

Die Bedienaufgaben (vgl. Anhang, Tabelle 8-1) wurden während der Fahrt jeweils einmal geübt. Im Übungsblock wurde jeweils die Feedbackvariante aus dem ersten Testblock des Probanden verwendet. Die Abfolge der Feedbackvarianten war über die Probanden randomisiert.

Die Probanden wurden instruiert, möglichst schnell und genau zu bedienen. Die rechte, bedienende Hand sollte wie in den vorherigen Experimenten zwischen zwei Aufgaben am Touchpad liegen gelassen werden. Vor den Testblöcken wurden die Probanden instruiert, dass die Fahraufgabe Vorrang hat, sie aber dennoch möglichst schnell und fehlerfrei eingeben sollen.

Nach jedem Testblock sollten die Probanden die Feedbackvariante anhand eines Akzeptanzfragebogens einschätzen und Vor- und Nachteile der Feedbackvariante benennen. Abschließend schätzten die Probanden alle vier Feedbackvarianten auf einem vergleichenden Akzeptanzfragebogen ein. Die Probanden sollten außerdem ihren Gesamteindruck von der Bedienmethode und Darstellung beschreiben und die beste und schlechteste Variante benennen. Die Gründe für die Wahl der besten und schlechtesten Feedbackvariante wurden erfragt.

Das Experiment dauerte insgesamt ungefähr 75 Minuten. Abbildung 5-5 bietet einen Überblick über den Ablauf.

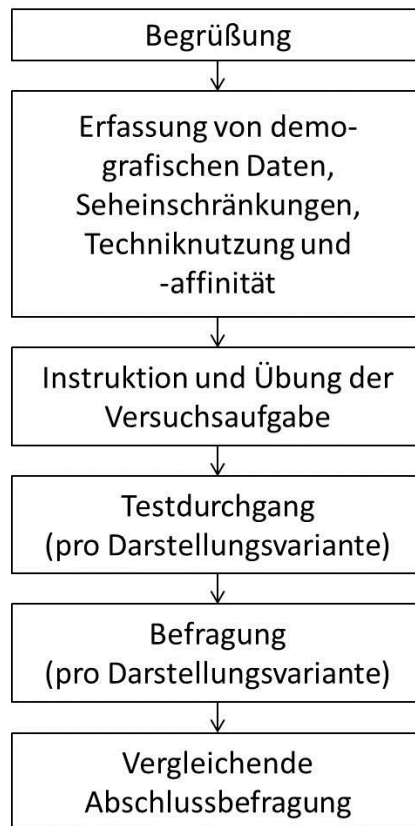


Abbildung 5-5: Grafische Darstellung des Versuchsablaufs von Experiment III

5.2.7 Datenanalyse

Alle Faktoren in den Analysen waren within-Faktoren. Als Hauptanalyse wurde eine Varianzanalyse mit Messwiederholung berechnet. Es wurden jeweils Greenhouse-Geisser korrigierte Freiheitsgrade verwendet und als Level für statistische Signifikanz wurde $p < 0.05$ festgelegt. Um bei einem signifikantem Haupteffekt eines Faktors mit mehr als zwei Stufen zu testen, zwischen welchen Stufen der signifikante Unterschied liegt, wurden post hoc paarweise Mittelwertsvergleiche mit Bonferroni-Adjustierung berechnet.

Der relative Fehler wurde für die inferenzstatistischen Auswertungen gemäß Winer (1971) sinustransformiert. Als Maße der Spurabweichung wurden wiederum der Betrag und die Standardabweichung berechnet, um einerseits Aussagen über den absoluten Versatz und andererseits über ihre Variabilität treffen zu können.

Getrennt für die vier Feedbackvarianten wurden anhand der Zielbewegungen (aus den getesteten Aufgaben) Modellanpassungen an Fitts' Law durchgeführt, um die Bewegungszeit zu erklären.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Ausgeschlossene Daten

Wie in den vorherigen Experimenten wurden Aufgaben, in denen eine Störung des Ablaufs auftrat, vom Versuchsleiter während der Versuchsdurchführung markiert und von der Auswertung ausge-

geschlossen. Daneben wurde getrennt pro Proband und Feedbackvariante eine Ausreißer-Korrektur durchgeführt: Aufgaben, in denen die Bearbeitungszeit mehr als drei Standardabweichungen größer als der Mittelwert war, wurden aus den Analysen ausgeschlossen.

Die Berechnungen zur Spurabweichung beruhen auf Daten ohne Ausreißer-Korrektur, das heißt, die Spurhaltung während fehlerhafter Eingaben oder sehr langen Aufgaben wird in die Analyse einbezogen. Nur als ungültig markierte Aufgaben wurden ausgeschlossen.

Für die Regression der Bewegungszeit in Abhängigkeit des Schwierigkeitsindex gemäß Fitts' Law wurden die in den Aufgaben enthaltenen Zielbewegungen analysiert. Als Datengrundlage für die Berechnung der Modellanpassungen wurden die Bediendaten nach Ausreißer-Korrektur verwendet. Bewegungszeiten, die mehr als drei Standardabweichungen größer als der Mittelwert waren, wurden aus den Analysen ausgeschlossen. Es wurden außerdem nur Zielbewegungen zu quadratischen Tasten analysiert und nur die *ID*-Werte einbezogen, die häufiger als zwanzigmal vorkamen. Bei mehrfacher Betätigung derselben Taste wurde jeweils nur der erste Tastendruck in die Analyse einbezogen. Außerdem wurde die erste Tastenbetätigung nach einem Wechsel der Anzeigekonfiguration ausgeschlossen. Somit wurden nur Aufgaben einbezogen, in denen Start und Ziel der Bewegung von Anfang an sichtbar und in denen eine Zielbewegung nötig war.

5.3.2 Objektive Maße

In den objektiven Maßen Bearbeitungszeit ($p > 0.2$) und Touchpadweg ($p > 0.1$) ließen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Feedbackvarianten feststellen. Es traten lediglich (zu erwartende) Unterschiede zwischen den Aufgaben auf (Beispiel: Bearbeitungszeit ($F(1.7,23.5) = 180.36$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.93$) bei Zieleingabe (Aufgabe 11; $M = 38535$ ms, $SD = 10687$ ms) vs. Senderwechsel (Aufgabe 5; $M = 4514$ ms, $SD = 1177$ ms); $p < 0.01$). Da im Rahmen dieser Arbeit kein Fokus auf die Bedienleistung bei verschiedenen Aufgaben gelegt wird, werden aufgabenbezogene Unterschiede nicht weiterführend berichtet.

Die relative Häufigkeit von Fehlern kann nicht pro Aufgabe und Feedbackvariante berechnet werden, da jede Aufgabe pro Feedbackvariante nur einmal durchgeführt wurde. Um die Feedbackvarianten zu vergleichen, wurde der relative Fehler daher für jede Variante über alle Aufgaben berechnet. In der so ermittelten relativen Häufigkeit motorischer Fehler zeigten sich allerdings keine Unterschiede zwischen den Feedbackvarianten ($p > 0.1$). Die Spurabweichung wurde ebenfalls nur für jede Feedbackvariante - nicht pro Aufgabe - betrachtet, da die Bearbeitungszeit der einzelnen Aufgaben sehr unterschiedlich war. In der Spurabweichung zeigten sich erneut keine Unterschiede zwischen den Feedbackvarianten (Betrag: $p > 0.2$; SD : $p > 0.2$).

5.3.3 Modellanpassungen gemäß Fitts' Law

Die Regression der Bewegungszeit in Abhängigkeit des Schwierigkeitsindex gemäß Fitts' Law basierte auf der im Anhang in Tabelle 8-2 dargestellten Datengrundlage (siehe dazu auch Abschnitt 5.2.7

5 Experiment III

und 5.3.1). Zur Berechnung des ID wurde die Shannon-Formel (vgl. Abschnitt 1.2.4, Formel (4)) verwendet.

Aus den nicht korrigierten Zielentfernungen (D) und -breiten (W) ergaben sich folgende Modellanpassungen (Abbildung 5-6) für die vier Feedbackvarianten.

- $MT_1 = 414.8 + 333.3x$ ($R_1=0.938$; Varianzaufklärung $R_1^2=88.0\%$)
- $MT_2 = 422.9 + 325.8x$ ($R_2=0.934$; Varianzaufklärung $R_2^2=87.3\%$)
- $MT_3 = 483.6 + 276.2x$ ($R_3=0.815$; Varianzaufklärung $R_3^2=66.4\%$)
- $MT_4 = 497.5 + 278.0x$ ($R_4=0.865$; Varianzaufklärung $R_4^2=74.8\%$)

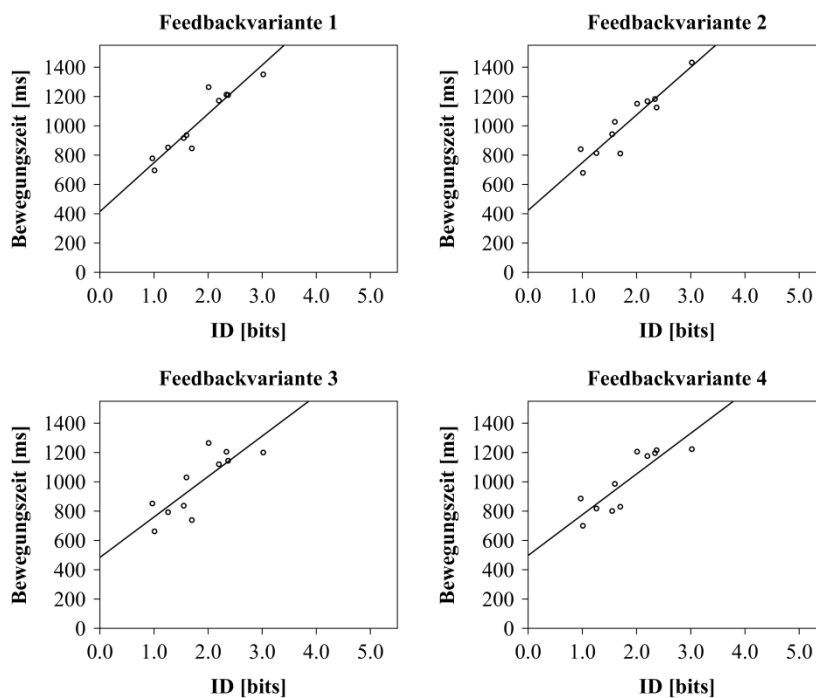


Abbildung 5-6: Modellanpassung an Fitts' Law für Feedbackvariante 1 (links oben), 2 (rechts oben), 3 (links unten) und 4 (rechts unten) auf Basis des Schwierigkeitsindex (ID).

Y-Achsenabschnitt ($t_1(9) = 5.27$, $t_2(9) = 5.33$, $t_3(9) = 3.85$, $t_4(9) = 4.83$; jeweils $p < 0.01$) und Steigung ($t_1(9) = 8.11$, $t_2(9) = 7.87$, $t_3(9) = 4.22$, $t_4(9) = 5.17$; jeweils $p < 0.01$) waren für alle Modellanpassungen signifikant von Null verschieden, wobei der Y-Achsenabschnitt für alle Feedbackvarianten außerhalb des von Soukoreff und MacKenzie (2004) empfohlenen Bereichs lag. Mögliche Ursachen dieses Befundes werden in der Diskussion (Abschnitt 5.4) erläutert. Der Y-Achsenabschnitt unterschied sich nicht zwischen den Modellanpassungen ($p > 0.2$). Der Unterschied in der Steigung war ebenfalls nicht signifikant ($p > 0.2$). Alle vier Modellanpassungen klärten einen großen Teil der Varianz (mindestens 66.4%) in der Bewegungszeit durch den theoretischen Schwierigkeitsindex auf (der jedoch in den hier untersuchten Zielbewegungen nur durch die unterschiedlichen Zielentfernungen differenziert wird).

Gemäß der von Soukoreff und MacKenzie (2004) empfohlenen Vorgehensweise wurde eine zusätzliche Modellberechnung auf Basis der effektiven Zielgrößen und -entfernungen durchgeführt. Die Korrekturen erfolgten dabei entsprechend der in Abschnitt 1.2.4 beschriebenen Vorgehensweise.

Aus den effektiven Zielentfernungen (D_e) und -breiten (W_e) ergaben sich folgende Modellanpassungen (Abbildung 5-7) für die vier Feedbackvarianten.

- $MT_1 = 363.1 + 208.0x$ ($R_1=0.835$; Varianzaufklärung $R_1^2=69.8\%$)
- $MT_2 = 344.8 + 227.1x$ ($R_2=0.874$; Varianzaufklärung $R_2^2=76.4\%$)
- $MT_3 = 522.8 + 147.6x$ ($R_3=0.688$; Varianzaufklärung $R_3^2=47.3\%$)
- $MT_4 = 494.9 + 161.0x$ ($R_4=0.745$; Varianzaufklärung $R_4^2=55.5\%$)

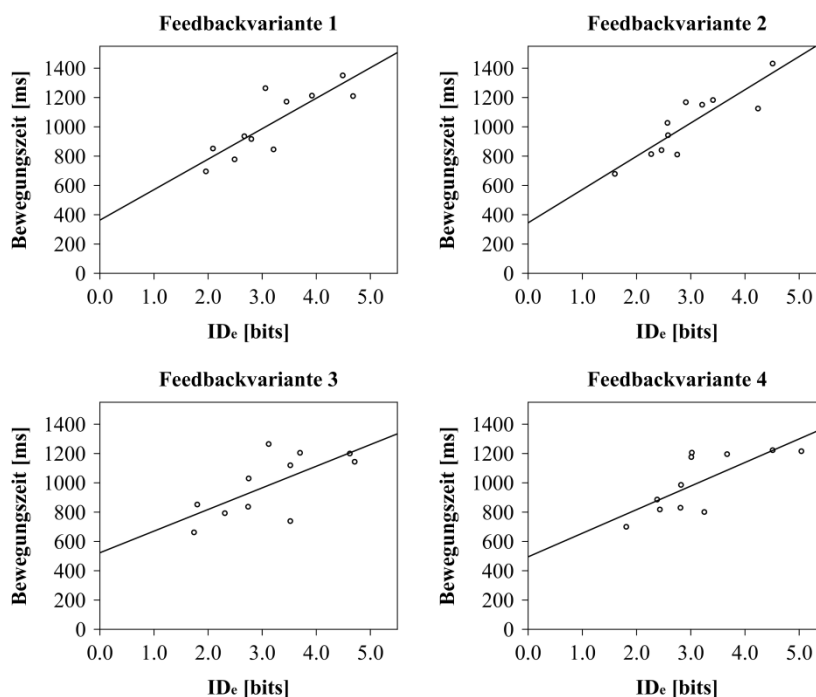


Abbildung 5-7: Modellanpassung an Fitts' Law für Feedbackvariante 1 (links oben), 2 (rechts oben), 3 (links unten) und 4 (rechts unten) auf Basis des effektiven Schwierigkeitsindex (ID_e).

Y-Achsenabschnitt ($t_1(9) = 2.43$, $t_2(9) = 2.68$, $t_3(9) = 3.07$, $t_4(9) = 3.14$; jeweils $p < 0.05$) und Steigung ($t_1(9) = 4.56$, $t_2(9) = 5.40$, $t_3(9) = 2.85$, $t_4(9) = 3.35$; jeweils $p < 0.05$) waren wiederum für alle Modellanpassungen signifikant von Null verschieden. In zwei der Bedingungen war der Y-Achsenabschnitt erneut außerhalb des von Soukoreff und MacKenzie (2004) empfohlenen Bereichs. Der Y-Achsenabschnitt unterschied sich nicht zwischen den Modellanpassungen ($p > 0.2$). Der Unterschied in der Steigung war ebenfalls nicht signifikant ($p > 0.2$).

Wie eingangs erwähnt, soll nach Soukoreff und MacKenzie (2004) zum Vergleich mehrerer Experimentalbedingungen der Durchsatz berechnet werden. Dieser setzt den effektiven Schwierigkeitsgrad einer Aufgabe zur jeweiligen Bewegungszeit ins Verhältnis und wird dann über Bewegungsbedingungen und Probanden gemittelt (vgl. Abschnitt 1.2.4, Formel (7)). Analog zu den nicht aufgetretenen

Unterschieden in Y-Achsenabschnitt und Steigung zeigten sich auch im Durchsatz ($M_1 = 3.28$ bps, $SD_1 = 0.55$ bps; $M_2 = 3.04$ bps, $SD_2 = 0.55$ bps; $M_3 = 3.31$ bps, $SD_3 = 0.58$ bps; $M_4 = 3.25$ bps, $SD_4 = 0.59$ bps) keine signifikanten Unterschiede ($p > 0.1$) zwischen den Feedbackvarianten.

Die Modellanpassungen auf Basis des effektiven Schwierigkeitsindex zeigten eine geringere Varianzaufklärung im Bereich von 47.3-76.4%.

5.3.4 Ausnutzung der Zielbreite

Wie eingangs erwähnt, wurde das visuelle Feedback erst am Ende der Zielbewegung gegeben. Analog zu Akamatsu et al. (1995) wurde daher vermutet, dass gegebenenfalls die Bewegungszeit und die Modellierung über Fitts' Law nicht von der Feedback-Bedingung beeinflusst werden, aber die genutzte Zielbreite. Dementsprechend soll im folgenden Abschnitt betrachtet werden, ob die untersuchten Varianten mit zusätzlichem, visuellem Feedback zu einer Vergrößerung der genutzten Zielbreite beitragen können. Diese Betrachtung wird an zwei Maßen vorgenommen, der effektiv genutzten Zielbreite (W_e) und der Distanz zwischen Tastendruck und Tastenmittelpunkt.

In der effektiv genutzten Zielbreite (Abbildung 5-8) trat zwischen den Feedbackvarianten ein signifikanter Unterschied auf ($F(2.1,32.2) = 4.06$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.21$), wobei die post hoc Vergleiche nicht signifikant wurden (jeweils $p > 0.1$). Nominell war die genutzte Zielbreite bei Bedingung 2 (dominantes Highlight; $M = 36.7$ px, $SD = 5.8$ px) am höchsten und bei Bedingung 1 ($M = 30.1$ px, $SD = 8.1$ px) am geringsten (Bedingung 3: $M = 31.6$ px, $SD = 7.3$ px; Bedingung 4: $M = 32.1$ px, $SD = 6.5$ px).

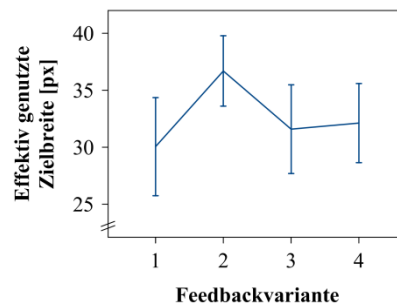


Abbildung 5-8 Mittlere effektiv genutzte Zielbreite [px] in Abhängigkeit von der Feedbackvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Die Distanz zwischen Tastendruck und Tastenmittelpunkt wurde auf der Datengrundlage der Fitts' Law Modellierung berechnet: Es wurden nur Zielbewegungen zu quadratischen Tasten einbezogen, in denen Start und Ziel der Bewegung von Anfang an sichtbar und in denen eine Zielbewegung nötig war (kein mehrfaches Betätigen derselben Taste).

In der Distanz zwischen Tastendruck und Tastenmittelpunkt (Abbildung 5-9) zeigte sich ebenfalls ein Unterschied abhängig von der Feedbackvariante ($F(2.7,40.0) = 3.89$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.21$). Beim dominanten Highlight (Bedingung 2: $M = 18.6$ px, $SD = 2.3$ px) war die Distanz signifikant größer als beim Cursor ohne Highlight (Bedingung 4: $M = 16.6$ px, $SD = 3.1$ px; $p < 0.05$). Die anderen post hoc Vergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.1$). Nominell war die Distanz beim Cursor ohne

Highlight (Bedingung 4) am geringsten, das heißt, die Bediengenauigkeit am höchsten. Beim dominanten Highlight (Bedingung 2) war sie am größten, also die Bediengenauigkeit am geringsten. Die beiden dezenteren Highlight-Bedingungen lagen dazwischen (Bedingung 1: $M = 17.0$ px, $SD = 3.6$ px; Bedingung 3: $M = 17.3$ px, $SD = 3.4$ px).

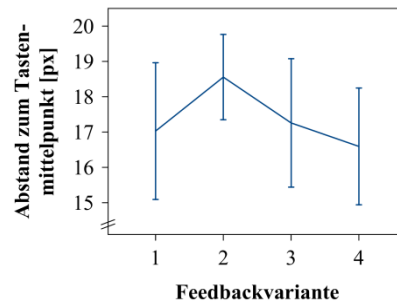


Abbildung 5-9: Mittlerer Abstand zum Tastenmittelpunkt [px] in Abhängigkeit von der Feedbackvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

5.3.5 Subjektive Maße

Um die Erkenntnisse in den objektiven Maßen der Bedienbarkeit um subjektiv erlebte Unterschiede zwischen den Feedbackvarianten zu ergänzen, werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse der vergleichenden Befragung berichtet: Hinsichtlich des Gefallens ($p > 0.1$) und der Leichtigkeit der Bedienung ($p > 0.2$) zeigten sich keine signifikanten Unterschiede. Allerdings traten Unterschiede in der Erkennbarkeit, ob die gewünschte Taste erreicht wurde, auf (Abbildung 5-10; $F(2.3,32.4) = 5.64$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.29$). Post hoc Bonferroni Tests zeigten, dass die Erkennbarkeit in der Bedingung nur mit einem Cursor (Variante 4: $M = 6.7$, $SD = 4.9$) signifikant oder marginalsignifikant geringer als in den drei Varianten mit zusätzlichem Tastenhighlight war (Variante 1: $M = 10.4$, $SD = 2.9$, $p < 0.1$; Variante 2: $M = 11.1$, $SD = 3.5$, $p < 0.05$; Variante 3: $M = 10.3$, $SD = 3.8$, $p < 0.1$). Die anderen post hoc Vergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.2$).

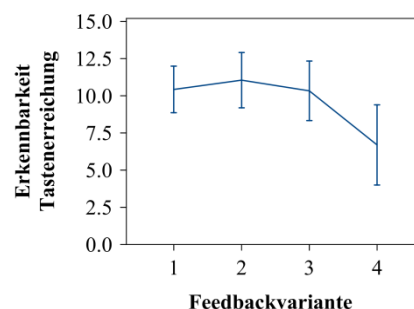


Abbildung 5-10: Mittelwert der subjektiven Erkennbarkeit der Tastenerreichung (0 „sehr schlecht erkennbar“ - 15 „sehr gut erkennbar“) in Abhängigkeit von der Feedbackvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Daneben unterschieden sich die drei Bedingungen (1-3), in denen ein Highlight verwendet wurde, hinsichtlich dessen Erkennbarkeit (Abbildung 5-11; $F(1.5,22.4) = 4.64$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.24$): Zwischen Variante 2 und 1 ($p < 0.05$) zeigte sich ein signifikanter Unterschied, zwischen Variante 2 und 3 ($p < 0.1$) ein tendenzieller Unterschied im post hoc Vergleich. Der Unterschied zwischen Variante 1 und 3 war nicht signifikant ($p > 0.2$). Bei der Betrachtung der absoluten Höhe der Bewertungen

(0 „sehr schlecht erkennbar“ - 7.5 „genau richtig“ - 15 „zu auffällig“) zeigte sich, dass das dominante Highlight eher zu auffällig war (Variante 2: $M = 8.7$, $SD = 3.0$), das Highlight bei gleichfarbigem Cursor eher „genau richtig“ (Variante 1: $M = 7.1$, $SD = 2.3$), das Highlight bei verschiedenfarbigem Cursor eher zu unauffällig (Variante 3: $M = 6.5$, $SD = 1.4$).

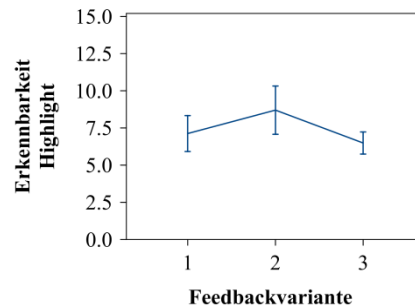


Abbildung 5-11: Mittelwert der subjektiven Erkennbarkeit des Highlights (0 „sehr schlecht erkennbar“ - 7.5 „genau richtig“ - 15 „zu auffällig“) in Abhängigkeit von der Feedbackvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Des Weiteren ließ sich ein Effekt der Erkennbarkeit des Cursors (Abbildung 5-12; $F(1.9,27.0) = 3.79$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.21$) feststellen, wobei der post hoc Test nur tendenzielle Unterschiede zeigte: Zwischen Bedingung 3 ($M = 8.0$, $SD = 1.6$) und 1 ($M = 6.0$, $SD = 2.8$) und Bedingung 3 und 2 ($M = 6.2$, $SD = 3.0$) zeigten sich tendenzielle Unterschiede (jeweils $p < 0.1$). Die anderen post hoc Vergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.2$).

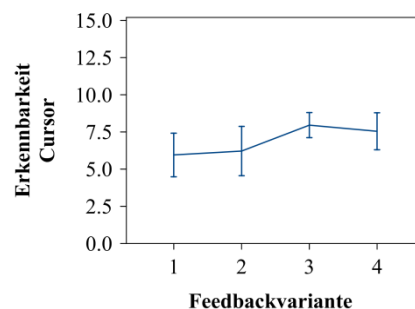


Abbildung 5-12: Mittelwert der subjektiven Erkennbarkeit des Cursors (0 „sehr schlecht erkennbar“ - 7.5 „genau richtig“ - 15 „zu auffällig“) in Abhängigkeit von der Feedbackvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

5.4 Diskussion

5.4.1 Fitts' Law als Beurteilungsgrundlage

Um die absolute Bedieninteraktion hinsichtlich der Unterstützung des Nutzers durch verschiedene, visuelle Feedbackvarianten zu beurteilen, wurden in der vorliegenden Studie für die getesteten Feedbackvarianten einzelne Fitts' Law-Modellanpassungen aufgestellt (das untersuchte absolute Bedienkonzept basiert auf Zielbewegungen; vgl. Abschnitt 1.2.3, Fazit). Im Vergleich der Modellanpassungen ließen sich allerdings keine Unterschiede nachweisen: Weder auf Basis des theoretischen, noch des effektiven Schwierigkeitsindex zeigten sich Unterschiede zwischen den Feedbackbedingungen hinsichtlich des Y-Achsenabschnitts und der Steigung. Auch im Durchsatz ließen sich keine Effekte der Feedbackvariante feststellen. Als Erklärung für fehlende Unterschiede ließe sich vermuten, dass

Fitts' Law zur Modellierung der Bedienung im vorliegenden Kontext nicht passend ist beziehungsweise Feedback am Ende der Zielbewegung nicht wirksam ist. Dies wird in den folgenden Abschnitten diskutiert.

Als eine Auffälligkeit hinsichtlich der Gültigkeit von Fitts' Law im verwendeten Kontext (Menübedienung während der Fahraufgabe) zeigte sich, dass der für die Modellanpassungen ermittelte Y-Achsenabschnitt für den theoretischen Schwierigkeitsindex in allen Bedingungen, für den effektiven Schwierigkeitsindex in zwei von vier Bedingungen zu hoch war. Nach Soukoreff und MacKenzie (2004) sollte der Y-Achsenabschnitt in einem Bereich von -200 ms und +400 ms liegen. Als mögliche Ursachen eines erhöhten Y-Achsenabschnitts vermuten Soukoreff und MacKenzie (2004) methodische Probleme, dass beispielsweise die Schwellzeit in der Bewegungszeit enthalten ist, oder die Variabilität der Probanden. Tatsächlich wurde hinsichtlich der Aufzeichnung der Bewegungszeit im Nachhinein festgestellt, dass die Reaktionszeit hier entgegen der Empfehlungen von Soukoreff und MacKenzie (2004) enthalten war.²⁸ Unter der Annahme, dass die Reaktionszeit nicht mit den Experimentalbedingungen variiert, verschiebt sich dadurch allerdings nur der Achsenabschnitt der Fitts' Law Modellanpassungen. Ein Vergleich der Experimentalbedingungen anhand des Durchsatzes kann dennoch durchgeführt werden.

Eine weitere Ursache für den erhöhten Y-Achsenabschnitt könnte auch in der Doppelaufgabensituation liegen. Wie eingangs erläutert, kann Fitts' Law auch in Mehraufgabensituationen angewandt werden (vgl. Abschnitt 1.2.5): Schedlbauer (2007) testete beispielsweise, inwiefern Fitts' Law bei einer Touchscreen Bedienung gilt, wenn die Bedienungsaufgabe mit einer Monitoring- und Entscheidungsaufgabe verknüpft wird (der betrachtete Aufgabenkontext unterschied sich damit von der vorliegenden Arbeit). Schedlbauer (2007) zeigte für die Doppelaufgabensituation einen höheren Y-Achsenabschnitt als für eine reine Bedienungsaufgabe und vermutete, dass die Doppelaufgabensituation additiv auf Fitts' Law wirkt. Den in seiner Studie erhöhten Y-Achsenabschnitt führte er auf eine längere Phase der Bewegungsplanung zurück. Ein erhöhter Y-Achsenabschnitt muss daher nicht unbedingt auf ein methodisches Problem im Experiment hinweisen. Erhöhte Achsenabschnitte könnten auch mit der Belastung durch die Doppelaufgabensituation und den dadurch reduzierten Ressourcen in Zusammenhang stehen.

Alle vier Modellanpassungen, die anhand des theoretischen Schwierigkeitsindex aufgestellt wurden, zeigten eine ziemlich gute Aufklärung der Varianz in der Bewegungszeit (mindestens 66.4%) durch den Schwierigkeitsindex.²⁹ Mögliche Ursachen für eine etwas reduzierte Varianzaufklärung werden

²⁸ In der Aufzeichnung des folgenden Experiments wurde dies entsprechend korrigiert.

²⁹ Zu beachten ist, dass die Varianzaufklärung der zusätzlichen Modellanpassungen basierend auf effektiven Zielgrößen und -entfernungen geringer war und nur noch bei mindestens 47.3% lag. Als Ursache wird vermutet, dass bei effektiven *IDe*-Werten mehr Rauschen im Prädiktor enthalten ist - zusätzlich zum Rauschen in der abhängigen Variable Bewegungszeit -, wodurch die Modellpassung verschlechtert wurde.

darin vermutet, dass die Bedienung einerseits in einem Doppelaufgabenparadigma³⁰ und andererseits in einer natürlich gestalteten Menüsituation untersucht wurde, wodurch Störvarianz entstand. Die verwendete Menüsituation erzeugte außerdem das methodische Problem, dass die analysierten *ID*-Werte sehr unterschiedlich häufig vorkamen (Datengrundlage siehe Anhang, Tabelle 8-2; Berechnung der Datengrundlage siehe Abschnitt 5.2.7 und 5.3.1). Insgesamt zeigte sich trotz methodischer Einschränkungen allerdings eine vielversprechende Varianzaufklärung durch die Modellanpassungen, was auf die Gültigkeit von Fitts' Law auch bei absoluter Touchpadbedienung, Doppelaufgabensituationen und realistischen Bediensituationen hinweist.

5.4.2 Unterschiede der Feedbackbedingungen in der effektiv genutzten Zielbreite

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, lässt sich die absolute Touchpadbedienung über Fitts' Law modellieren. Daher bleibt die Frage offen, warum sich im Vergleich der Modellanpassungen keine Unterschiede nachweisen ließen. Eine Erklärungsmöglichkeit wäre, dass Fitts' Law für Unterschiede zwischen den Feedbackvarianten nicht sensitiv ist, da sich die Varianten nur in der Endphase der Bewegung unterscheiden. Diese Annahme steht in Einklang mit den eingangs berichteten Befunden von Akamatsu et al. (1995).

Akamatsu et al. (1995) untersuchten unterschiedliche Feedbackvarianten bei Mausbedienung und konnten keine Effekte auf den Durchsatz im Fitts' Law Modell zeigen. Dies führten sie auf den Zeitpunkt der Feedbackpräsentation am Ende der Zielbewegung zurück. Man könnte dementsprechend annehmen, dass die Zielbewegung an sich durch eine veränderte grafische Rückmeldung der Zielerreichung nicht erleichtert wird. Allerdings konnten die Probanden in der Studie von Akamatsu et al. (1995) die Größe des Ziels bei zusätzlichem Feedback besser ausnutzen, so dass die effektiv genutzte Zielbreite bei zusätzlichem Feedback größer war.

Analog zu Akamatsu et al. (1995) wurde im vorliegenden Experiment zusätzlich zu den Modellanpassungen an Fitts' Law betrachtet, ob die untersuchten Varianten mit zusätzlichem, visuellem Feedback zu einer Vergrößerung der effektiv genutzten Zielbreite beitragen können. Die Befunde des vorliegenden Experimentes scheinen dies zu bestätigen. Sowohl die effektiv genutzte Zielbreite (W_e), als auch der Abstand zwischen Tastendruck und Tastenmittelpunkt ist für Feedbackvariante 2 (dominantes Highlight, gleichfarbiger Cursor) am höchsten. Deutliches Feedback über die Zielerreichung erfordert damit die geringste Bediengenauigkeit und führt zu einer effizienteren Nutzung der gesamten Zielbreite.

Entsprechend den Befunden von Akamatsu et al. (1995) finden sich damit keine Unterschiede in der Modellierung der Zielbewegung. Die bessere Ausnutzung der Zielbreite spricht allerdings für die Anwendung von visuellem Feedback in Form von Highlights bezüglich des Erreichens einer Taste.

³⁰ Auch Schedlbauer (2007) zeigte in der Doppelaufgabensituation nur eine reduzierte Varianzaufklärung (61 %) verglichen zur Varianzaufklärung in der reinen Bedienaufgabe (83 %).

5.4.3 Empfehlungen zur Feedbackgestaltung

Wie gerade beschrieben, zeigte sich in der Bediengenauigkeit, dass ein dominantes Highlight die geringste Genauigkeit vom Nutzer erfordert. Der Abstand zum Tastenmittelpunkt war in dieser Bedingung am höchsten, die effektiv genutzte Zielbreite am größten. In den subjektiven Maßen wurde das dominante Highlight allerdings als zu auffällig bewertet, das dezentere gleichfarbige Highlight wurde eher als „genau richtig“ beurteilt. Diese Bewertung spricht gegen die Verwendung eines dominanten Highlights.

Im Vergleich zur Bedingung nur mit einem Cursor war für die Probanden in den drei Highlight-Bedingungen besser erkennbar, ob sie die gewünschte Taste mit dem Cursor erreicht hatten. Dies spiegelt sich - zumindest nominell - auch im Abstand zwischen Tastendruck und Tastenmittelpunkt wider. Dieser war in der Bedingung nur mit einem Cursor am geringsten, das heißt, in dieser Bedingung „musste“ am genauesten bedient werden.

Die weiteren objektiven Maße konnten die subjektiv erlebten Unterschiede in der Bedienbarkeit abhängig vom Bedienfeedback nicht abbilden. In der Bearbeitungszeit, dem Touchpadweg, den Fehlerhäufigkeiten und in der Spurabweichung der Primäraufgabe Fahren zeigten sich keine Unterschiede der Feedbackvarianten.

Zusammenfassend unterstützt eine Rückmeldung der aktuellen Taste über ein farbiges Highlight die Zielbewegung (subjektive Bewertung), reduziert die nötige Bediengenauigkeit (Abstand zum Tastenmittelpunkt, effektiv genutzte Zielbreite) und bewirkt dadurch eine Entlastung des Nutzers. Obwohl ein dominantes Highlight die geringste Bediengenauigkeit erfordert, wird es als zu auffällig eingeschätzt. Stattdessen sollte ein dezenteres gleichfarbiges Highlight gewählt werden, das den Cursor nicht überdeckt.

5.4.4 Ausblick

Diesen Empfehlungen folgend, wird die absolute Bedienung im folgenden Experiment um ein dezentes, farbliches Highlight, das die Aktivierbarkeit einer Taste verdeutlicht, erweitert. Wie bereits erwähnt, zeigte sich in Experiment III eine vielversprechende Varianzaufklärung durch die Modellanpassungen, was auf die Gültigkeit von Fitts' Law im vorliegenden Kontext hinweist. Es soll in der folgenden Studie versucht werden, dessen Gültigkeit nach methodischer Optimierung noch deutlicher nachzuweisen.

Es wurde mehrfach auf die in den ersten Experimenten beobachtete, hohe Häufigkeit von Fehlern beim absoluten Bedienkonzept hingewiesen. In Experiment I tritt in circa jeder fünften oder siebten (je nach Anzeigeskalierung) Aufgabe mindestens ein Fehler auf. In Experiment II tritt beim kleinsten Touchpad in mehr als der Hälfte der Aufgaben mindestens ein Fehler auf. Fehlbedienungen sind im Kontext der Doppelaufgabensituation nachteilig, da sie eine Korrekturhandlung erfordern und dadurch die Bedienhandlung verlängern - es ergibt sich also während der Fahraufgabe eine verlängerte Ablen-

kung. Im folgenden Experiment soll der relative Fehler beim absoluten Bedienkonzept erneut betrachtet werden. Man könnte vermuten, dass die Nutzung des farblichen Highlights die Bedienbarkeit beim absoluten Bedienkonzept verbessert und die Fehlerhäufigkeit reduziert, da - wie in Experiment III gezeigt - für die Probanden durch ein Highlight subjektiv besser erkennbar ist, ob sie die gewünschte Taste mit dem Cursor erreicht haben.

Trotz der potentiellen Optimierung der absoluten Bedienvariante durch ein Highlight wurde aufgrund ihrer hohen Fehleranfälligkeit in den bisherigen Experimenten allerdings entschieden, auch alternative Bedienkonzepte in Erwägung zu ziehen. Dazu wurden drei Alternativkonzepte gestaltet und im folgenden Experiment gegenübergestellt.

6 Experiment IV: Vergleich alternativer Bedienkonzepte

6.1 Fragestellung

In Experiment III ließ sich trotz Doppelaufgabensituation eine relativ gute Modellpassung von Fitts' Law zum absoluten Bedienkonzept zeigen. In Experiment IV soll Fitts' Law zur Beschreibung und Differenzierung der Bedienung zwischen zwei zu untersuchenden Altersgruppen erneut herangezogen werden. Um dabei Störvarianz zu minimieren, die in Experiment III gegebenenfalls durch die Gestaltung der Testumgebung entstanden sein könnte, wird eine stärker kontrollierte Versuchsaufgabe verwendet. Entsprechend den Befunden aus der Literatur (Ketcham et al., 2002; Ketcham & Stelmach, 2004; vgl. Abschnitt 1.2.10) wird erwartet, dass Ältere eine Tendenz zur Genauigkeit auf Kosten der Geschwindigkeit aufweisen, das heißt, dass sie einerseits über alle Schwierigkeitsindizes langsamer als jüngere Nutzer sind und andererseits der Anstieg der Bewegungszeit bei zunehmender Aufgabenschwierigkeit bei älteren Nutzern deutlicher ausgeprägt ist.

Neben der Betrachtung der untersuchten Altersgruppen wird Fitts' Law auch auf ein alternatives Bedienkonzept, das auf absoluter Bedienung basiert, angewandt: Wie bereits erwähnt, legt die in den ersten Experimenten beobachtete, hohe Häufigkeit von Bedienfehlern die Betrachtung alternativer Bedienkonzepte nahe. Das erste Alternativkonzept, das für die vorliegende Untersuchung gestaltet wurde, schließt die Überlegungen, Fitts' Law zu „schlagen“ (Balakrishnan, 2004; vgl. Abschnitt 1.2.6), ein. Ähnlich zu dem von Blanch et al. (2004) beschriebenen semantischen Zeigeverhalten soll die Zielgröße auf der visuellen und motorischen Ebene entkoppelt werden. Blanch et al. (2004) realisieren dies, indem sie den Verstärkungsfaktor je nach Wichtigkeit bestimmter Bedienfelder verändern.

In der vorliegenden Studie geschieht die Entkopplung von visueller und motorischer Ebene durch die Vergrößerung der motorischen Tastengröße, ohne Tastengröße und -entfernung visuell anzupassen. Dies wird in Abschnitt 6.2.4 genauer erläutert. Unter grundsätzlicher Beibehaltung des absoluten Bedienprinzips soll so die Zielerreichung erleichtert werden. Die eigentliche Transformation (Verschiebung und Verstärkung; vgl. Abschnitt 1.2.8) von Körperbewegung in Cursorbewegung wird dabei verglichen zum ursprünglichen Bedienkonzept nicht verändert. Dieses Bedienkonzept wird im Folgenden als „entkoppelt absolut“ bezeichnet. Neben der potenziellen Steigerung der Leistungsfähigkeit des Nutzers ist hierbei zu untersuchen, ob die Manipulation von Fitts' Law Erfolg hatte, das heißt, es tatsächlich umgangen werden kann. Gleichzeitig soll betrachtet werden, ob distale (visuelle Ebene) oder proximale Handlungseffekte (motorische Ebene) für die Schwierigkeit der Aufgabe und die Leistungsfähigkeit der Nutzer entscheidend sind. Wie bereits eingangs beschrieben, werden dazu in der Literatur gegenläufige Effekte berichtet (Blanch et al., 2004; Sutter et al., 2011a; Sutter et al., 2013; vgl. Abschnitt 1.2.8, Werkzeuggebrauch als Transformation). Die für die Handlungskontrolle genutzte und damit für die Schwierigkeit der Aufgabe relevante Feedbackquelle scheint von der Transformation

von Körperbewegung in Werkzeugbewegung und vom Wissen des Nutzers über die Transformation abzuhängen (Sutter et al., 2013).

Wie in Abschnitt 1.1.6 erläutert, konzentrierte sich diese Arbeit in den bisherigen Experimenten auf absolute Bedienkonzepte, da die absolute Bedienung Vorteile wie die Direktheit und Flexibilität in der Anwendung bietet. Des Weiteren sind relative Bedienkonzepte denkbar (vgl. Abschnitt 1.1.6 Relatives Bedienkonzept), bei denen die Bewegungsrichtung des Bedienfingers (nicht die absolute Fingerposition) die Bewegung eines Cursors auf der Anzeige bestimmt. Relative Konzepte weisen zwar theoretisch einen Nachteil in der sensomotorischen Transformation auf (vgl. Abschnitt 1.2.8), könnten allerdings hinsichtlich der Unterbrechbarkeit der Aufgabe Vorteile zeigen. Der Cursor bleibt bei Abheben des Fingers vom Touchpad an der letzten Position auf der Anzeige sichtbar, was die Eignung in der Doppelaufgabensituation erhöhen könnte: Durch den stets sichtbaren Cursor könnte es dem Nutzer erleichtert werden, bei starken Anforderungen der Primäraufgabe die Sekundäraufgabe zu unterbrechen und die Sekundäraufgabe nach der Unterbrechung schnell wieder aufzunehmen. Die Kombination mit einem objektgebundenen Cursor, der diskret zwischen den aktivierbaren Inhalten der Anzeige bewegt wird (vgl. Abschnitt 1.1.6 Cursorkonzepte), könnte außerdem die Präzisionsanforderung an den Nutzer und damit die Fehleranfälligkeit der Bedienkonzepte reduzieren. Neben der Betrachtung der beiden absoluten Bedienkonzepte soll daher im folgenden Experiment die Leistungsfähigkeit des Nutzers bei zwei relativen, gestenbasierten Bedienkonzepten betrachtet werden. Die Gestaltung dieser relativen Bedienkonzepte wird Abschnitt 6.2.4 genauer erläutert. Da relative, gestenbasierte Bedienkonzepte nicht auf kontinuierlichen Zielbewegungen beruhen, ist eine Modellierung über Fitts' Law nicht sinnvoll. Stattdessen soll ähnlich zur Vorhersage der Bearbeitungszeit bei diskreten Eingaben (Card et al., 1978; vgl. Abschnitt 1.2.5) versucht werden, die Zeit der Zielnavigation über die (minimal notwendige) Anzahl an Bedienschritten zu modellieren.

Zusammenfassend stellt sich als zentrale Frage dieser Studie, welches alternative Bedienkonzept - abhängig vom Alter des Nutzers - zur besten sensomotorischen Leistungsfähigkeit führt, die geringsten Auswirkungen auf die Leistung in der Primäraufgabe Fahren hat und außerdem subjektiv am besten bewertet wird. Für eine differenzierte Gegenüberstellung der verschiedenen Bedienkonzepte und die Ableitung von Empfehlungen hinsichtlich der praktischen Anwendung ist es bedeutend, die Bedienkonzepte in unterschiedlichen Aufgabenkonfigurationen zu untersuchen. Daher werden im folgenden Experiment Aufgaben mit systematisch variierten Zielgrößen, -entfernungen und -anzahlen verglichen. Die Variation eines Parameters erzeugt dabei teilweise Konfundierungen zu den anderen Parametern, was in Abschnitt 6.2.5 detailliert erläutert wird. Beispielsweise ändert sich bei zunehmender Zielgröße auch die Entfernung zwischen den Zielmittelpunkten. Weiterhin werden in der folgenden Studie aufgrund der Größenbeschränkung des Bildschirms zur Darstellung der Bedienaufgabe im Fahrzeug nicht alle Stufen der untersuchten Faktoren miteinander kombiniert. Zum Beispiel wird die Bedienung bei einer größeren Zielanzahl nur für die kleine Zielgröße betrachtet. Experiment IV weist daher teilweise auch einen explorativen Charakter auf.

6.2 Methode

6.2.1 Probanden

Insgesamt 30 Probanden (16 Frauen, 14 Männer) nahmen am Experiment teil. 27 Probanden waren Rechtshänder, 2 Probanden Ambidexter und ein Proband Linkshänder. Alle Probanden waren normal-sichtig oder korrigiert normalsichtig, wobei 11 Probanden keine Sehhilfe benötigten, 2 Personen Kontaktlinsen und 15 Probanden eine Brille (6 mit Gleitsichtbrille) trugen. Im Versuch wurden zwei Alterskategorien (jeweils 15 Probanden) untersucht, eine Gruppe jünger als 30 Jahre, die andere Gruppe älter als 55 Jahre. Die Probanden der jüngeren Gruppe waren zwischen 20 und 30 Jahre alt, bei einem Altersdurchschnitt von 25.5 Jahren und einer Standardabweichung von 2.7 Jahren. Die Probanden der älteren Gruppe waren zwischen 56 und 68 Jahre alt, bei einem Altersdurchschnitt von 60.5 Jahren und einer Standardabweichung von 4.1 Jahren. Die Gruppe der jüngeren Probanden wies eine durchschnittliche Handlänge von 18.2 cm ($SD = 1.1$ cm) auf, bei einer Zeigefingerbreite³¹ von 1.7 cm ($SD = 0.2$ cm) und Mittelfingerbreite von 1.8 cm ($SD = 0.2$ cm). Die Gruppe der älteren Probanden wies eine durchschnittliche Handlänge von 18.2 cm ($SD = 1.5$ cm) auf, bei einer Zeigefingerbreite von 1.7 cm ($SD = 0.2$ cm) und Mittelfingerbreite von 1.7 cm ($SD = 0.2$ cm). Die Probanden schätzten die Nutzungshäufigkeit von Touchpadbedienung vor Untersuchungsbeginn auf einer 5-stufigen Skala (sehr selten - sehr häufig) ein. Der Median der Erfahrung mit Touchpads lag in der jüngeren Alterskategorie bei 4, das heißt, bei häufiger Nutzung. In der älteren Gruppe lag der Median bei 2, also bei seltener Nutzung.

6.2.2 Apparatur

Wie in 2.1 Versuchsumgebung beschrieben, wurde die grafische Oberfläche des Bediensystems auf einem 8-Zoll Bildschirm mit einer Auflösung von 800 x 480 Pixeln dargestellt. Im Versuch wurde lediglich ein Ausschnitt von 480 x 480 Pixeln für die Darstellung der Bedienaufgabe genutzt.

Touchpad

Die Touchpadeinheit (Abbildung 2-3) wurde auf einem 4.5 x 7.5 cm großen kapazitiven Touchpad aufgebaut, das an den Simulations-Rechner angebunden war. Eine Schablone begrenzte die zentrale Touchpadfläche auf eine Größe von 4.5 x 4.5 cm. Wie in Experiment I bis III war die Touchpadeinheit so konstruiert, dass die gesamte berührungssensitive Fläche ähnlich einem Druck-Schalter heruntergedrückt werden konnte. Für eine gute Erreichbarkeit war das Touchpad wieder in einem Winkel von 20° nach vorne abfallend in die Mittelarmlehne eingebaut.

³¹ Die Breite der möglichen Bedienfinger wurde jeweils an der Fingerspitze gemessen.



Abbildung 6-1: Touchpad

6.2.3 Versuchsaufgabe

Im Versuch sollten die Probanden möglichst schnell und fehlerfrei mit Hilfe des Touchpads eine jeweils gekennzeichnete Taste ansteuern und diese durch Tastendruck betätigen (Abbildung 6-2). Als Kennzeichnung der Zieltaste wurde ein Haus-Icon verwendet. Die aktuell selektierte Taste wurde über ein farbliches Highlight zurückgemeldet. Um eine Taste zu betätigen, musste das Touchpad ähnlich einem Schalter heruntergedrückt werden. Nach Betätigung der gekennzeichneten Taste wurde sofort das nächste Ziel vorgegeben.



Abbildung 6-2: Zielkennzeichnung (Haus-Icon) und aktuelle Tastenselektion (orangenes Highlight)

Die Aufgabenbearbeitung wurde durch akustisches Feedback unterstützt: Bei Erreichen einer Taste wurde ein Klicklaut, bei nicht getroffener Taste ein Fehlerton und bei erfolgreich bearbeiteter Aufgabe ein Bestätigungston ausgegeben.

Die Bedienung erfolgte auf verschiedenen Konfigurationen der Anzeige mit unterschiedlichen Tastengrößen, -entfernungen und -anzahlen, wobei die Tasten jeweils in einem quadratischen Gitter angeordnet waren. Die Abfolge der Anzeigekonfigurationen war über die Probanden randomisiert. Die Abfolge der Ziele war pro Anzeigekonfiguration über alle Probanden und Bedienvarianten konstant. Zwischen den Anzeigekonfigurationen war die Abfolge der Ziele zwar unterschiedlich³², zur besseren Vergleichbarkeit waren allerdings zur Zielerreichung bei allen Konfigurationen mit vier Tasten gleich häufig Bedieninteraktionen in horizontaler, vertikaler und diagonaler Richtung nötig. Die genaue Gestaltung der Anzeigekonfigurationen wird in Abschnitt 6.2.5 beschrieben.

³² Dadurch sollten Lerneffekte bezüglich der Reihenfolge reduziert werden.

6.2.4 Bedienvarianten

Im Versuch wurden vier Bedienvarianten (vgl. Abschnitt 1.1.6), zwei absolute Konzepte (Abbildung 6-3) und zwei relative Konzepte (Abbildung 6-5), verglichen. Eine Übersicht der untersuchten Bedienvarianten ist in Tabelle 6-1 dargestellt. Die Reihenfolge der Bedienvarianten war über die Probanden randomisiert.

1. Absolute Bedienvariante
2. Entkoppelt absolute Bedienvariante
3. Diskret relative Bedienvariante
4. Kontinuierlich relative Bedienvariante

Variante 1 (Abbildung 6-3 links) entsprach dem in Abschnitt 2.4 beschriebenen, absoluten Bedienkonzept. Die Bedienung wurde über ein temporäres, oranges Highlight der aktuellen Taste unterstützt. Vor- und Nachteile dieser Variante wurden bereits in Abschnitt 1.1.6 (Absolutes Bedienkonzept) aufgeführt. Wie in der Einleitung erläutert, beinhaltet das absolute Bedienkonzept größtenteils Zielbewegungen: Der Cursor, der den Finger repräsentiert, muss zu der gewünschten Taste bewegt werden. Die Bedienung soll daher wie in Experiment III mit Fitts' Law modelliert werden.

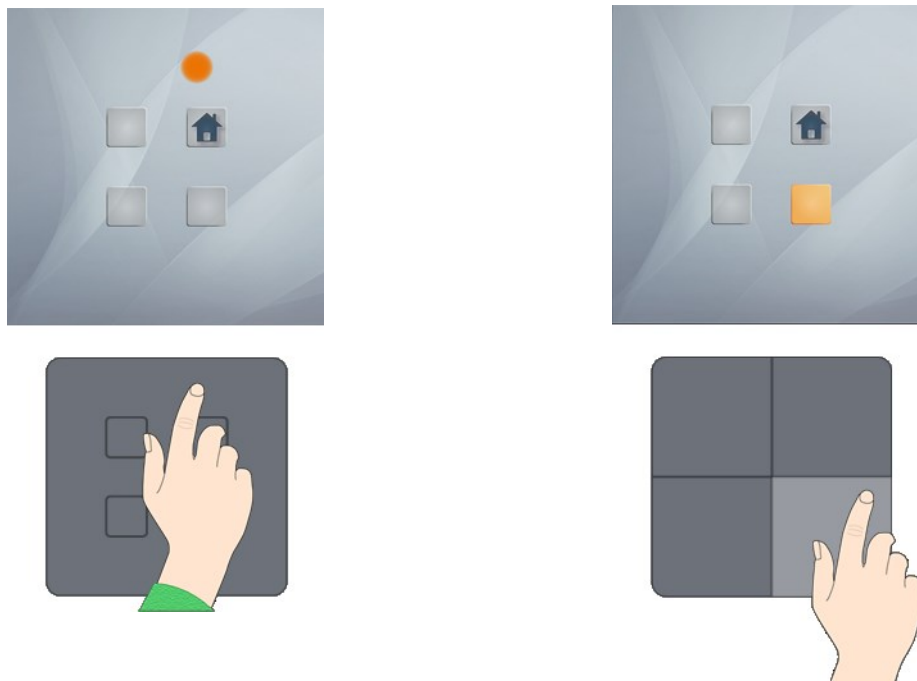


Abbildung 6-3: Absolute Bedienvarianten: Bedienvariante 1 (links) und Bedienvariante 2 (rechts)

Bedienvariante 2 (Abbildung 6-3 rechts) lässt sich als entkoppelt absolute Bedienvariante charakterisieren: Bei dieser Variante wurde die Touchpadfläche - abhängig von der Tastenzahl auf der Anzeige - vollständig in gleich große, quadratische Bereiche aufgeteilt, wobei die Anordnung der Bereiche der Anordnung der Tasten auf der Anzeige entsprach. Bezogen auf die Größe entsprachen die Tasten auf dem Touchpad nicht den Tasten auf der Anzeige, weshalb es sich hier um eine entkoppelt absolute

Bedienung handelt. Abhängig von der Fingerposition auf dem Touchpad war die zugehörige Taste auf der Anzeige farblich markiert (vgl. Abschnitt 1.1.6, Cursorkonzepte) und aktivierbar. Diese farbige Markierung der aktivierbaren Taste stellt einen objektgebundenen Cursor dar. Es wurde kein „freier“ Cursor angezeigt, der jeweils die genaue Fingerposition repräsentierte. Die Verwendung eines objektgebundenen Cursors reduziert dabei die nötige Präzision der Bedienung. Bei dieser Bedienvariante wird die gesamte Touchpadfläche effizient genutzt: Jede Fingerposition ist einer aktivierbaren Taste zugeordnet. Tastengröße und -nähe auf der visuellen Ebene sind damit weniger relevant. Die Nutzung der gesamten Touchpadfläche bringt allerdings den Nachteil mit sich, dass die Anzeige weniger flexibel gestaltet werden kann. Für eine effiziente Zuordnung zwischen Touch- und Anzeigefläche ist eine klare Gitterstruktur der aktivierbaren Flächen auf der Anzeige notwendig.

Wie in Abschnitt 1.2.8 (Touchpadbedienung im Kontext sensomotorischer Transformationen) erläutert, lassen sich unterschiedliche Bedienkonzepte hinsichtlich ihrer Transformation (vgl. Heuer, 1983) beschreiben und differenzieren. Sowohl bei Bedienvariante 1 als auch bei Bedienvariante 2 liegt eine Verschiebung vor, da die Cursorbewegung räumlich getrennt zur Fingerbewegung dargestellt wird. In beiden Konzepten sind die Cursorposition und damit die Verschiebung vorhersagbar, da sie an die Fingerposition gekoppelt ist. Da die Größen von Touchpad und Anzeige nicht identisch sind, liegt als zusätzliche, sensomotorische Transformation eine Verstärkung vor. Diese ist aufgrund des gleichbleibenden Größenverhältnisses von Anzeige und Touchpad konstant. In Bedienkonzept 2 ist die Cursorbewegung (im Gegensatz zu Bedienkonzept 1) allerdings nicht kontinuierlich. Der Cursor springt objektgebunden von einer Taste zur nächsten, sobald die Tastengrenzen auf dem Touchpad überschritten wurden, das heißt, der visuelle Output der Verstärkung erfolgt stufenweise. Man könnte die Transformation bei Bedienvariante 2 daher als diskretisiert beschreiben.

Bedienvariante 3 (Abbildung 6-5 links) stellt ein relatives Bedienkonzept dar, bei dem die Fingerbewegung als diskrete Geste interpretiert wird. Es ist stets eine virtuelle Taste auf der Anzeige voraktiviert (leicht orange eingefärbt). Sobald der Finger aufgelegt wird, wird das Highlight aktiv (deutlicher orange eingefärbt) und kann pro Wischbewegung horizontal und vertikal - nicht diagonal - in einzelnen Schritten weiter bewegt werden. Bei angehobenem Finger bleibt die Markierung auf der jeweils letzten virtuellen Taste liegen. Das farbliche Highlight stellt damit erneut (wie bei Bedienvariante 2) einen objektgebundenen Cursor dar. Die Bedienvariante ist so konzipiert, dass eine Wischgeste mindestens 11.25 mm³³ lang sein muss und der Finger nach jeder Wischbewegung kurz angehoben werden muss. Der Winkel der ausgeführten Wischgeste wird je nach Winkelbereich in eine der vier Achsen übersetzt, beispielsweise ein Winkel zwischen 45-135° in eine Cursorbewegung nach oben (siehe Abbildung 6-4).

³³ In konzeptionellen und technischen Vortests erwies sich eine Gestenlänge von 11.25 mm als Wert, der sehr gut von einem Auflegen des Fingers beziehungsweise einer unbewussten oder nicht intendierten minimalen Bewegung differenziert werden konnte. Wurden kürzere Gestenlängen gewertet, entstanden teilweise Cursorbewegungen in eine nicht intendierte Richtung, da die Wischgesten mit einer gewissen Variabilität hinsichtlich der Wischrichtung ausgeführt wurden.

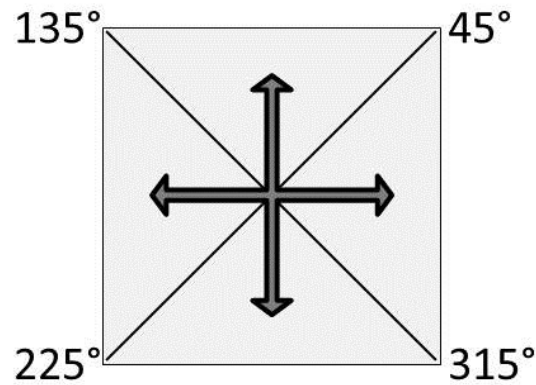


Abbildung 6-4: Zuordnung der Winkelbereiche der Wischbewegung auf die Richtung der Cursorbewegung bei Bedienvariante 3

Da bei Bedienvariante 3 erneut ein objektgebundener Cursor (vgl. Abschnitt 1.1.6, Cursorkonzepte) verwendet wird, sind Tastengröße und -nähe auf der visuellen Ebene wiederum weniger relevant. Die diskrete Art des Bedienkonzepts sowie das Liegenbleiben des Cursors an der jeweils letzten Position könnten dazu führen, dass die Eingabe gut unterbrechbar und damit gut für die Doppelaufgabensituation geeignet ist. Die gute Unterbrechbarkeit kombiniert mit der Beschränkung möglicher Gesten auf die horizontale und vertikale Richtung könnte außerdem die Fehleranfälligkeit der Variante minimieren. Die diskreten Bedienschritte führen allerdings vermutlich zu längeren Bearbeitungszeiten. Außerdem ist eine einigermaßen klare, gitterförmige Anordnung der Tasten auf der Anzeige für eine sinnvolle Bedienung über Wischrichtungen notwendig. Das Problem des Umsetzens, das jeder relativen Bedienlogik inhärent ist (vgl. Abschnitt 1.1.6, Relatives Bedienkonzept), ist in dieser Bedienvariante weniger relevant, da der Finger sowieso nach jeder einzelnen Wischgeste angehoben werden musste.

Bei der bei Bedienvariante 3 vorliegenden, sensomotorischen Transformation (vgl. Abschnitt 1.2.8, Touchpadbedienung im Kontext sensomotorischer Transformationen) handelt es sich erneut um eine Verschiebung und Verstärkung. Bei beiden getesteten, relativen Konzepten kommt zur Verschiebung aufgrund der räumlichen Trennung von Bedienung und Anzeige eine mögliche Verschiebung der Cursorposition auf der Anzeige hinzu. Der Cursor kann unabhängig von der Fingerposition räumlich auf der Anzeige angeordnet sein. Die Verstärkung basiert bei Bedienkonzept 3 nicht auf einer kontinuierlichen Bewegung (im Gegensatz zu Bedienkonzept 1), sondern auf einer diskreten Wischgeste und hat einen konstanten Output von 1 - eine Wischgeste wird jeweils in einen einzelnen Bedienschritt übersetzt. Da der Output konstant ist (jeweils ein Bedienschritt), die Wischgeste (vom Probanden zurückgelegte Wegstrecke) allerdings in gewissen Grenzen variabel (zwischen 11.25 - 45.00 mm; 45.00 mm entspricht der Touchpad-Abmessung), ist bei diesem Bedienkonzept auch die Verstärkung variabel.

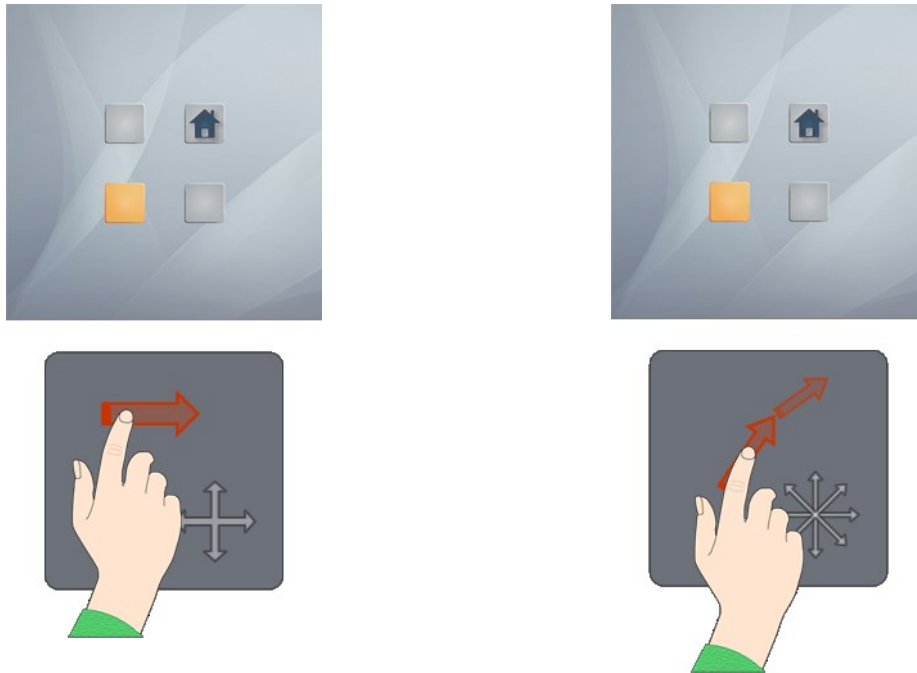


Abbildung 6-5: Relative Bedienvarianten: Bedienvariante 3 (links) und Bedienvariante 4 (rechts)

Bedienvariante 4 (Abbildung 6-5 rechts) ist ebenfalls ein relatives Bedienkonzept, bei dem die Fingerbewegung allerdings kontinuierlich, das heißt, als wegabhängige Geste, interpretiert wird. Bei diesem Konzept ist (wie bei Bedienkonzept 3) immer eine Taste voraktiviert (leicht orange eingefärbt). Bei aufgelegtem Finger wird das Highlight aktiv (deutlicher orange eingefärbt) und kann in einem Bereich von 360° weitergewischt werden. Das Highlight wird dabei auf die in Wischrichtung nächstgelegene Taste bewegt. Bei einer gitterartigen Anordnung von Tasten (diese wurde im vorliegenden Experiment verwendet; vgl. Abschnitt 6.2.5) ist es daher möglich, den Cursor horizontal, vertikal und diagonal (acht mögliche Richtungen; vgl. Abbildung 6-6) zu bewegen. Abhängig von der Länge der Wischbewegung kann das Highlight auch mehrere Tasten weit bewegt werden, wobei eine einzelne Wischgeste mindestens 11,25 mm lang sein muss. Nach einer Wischbewegung muss der Finger nicht angehoben werden. Bei angehobenem Finger bleibt die Markierung an der jeweils letzten Tastenposition liegen.

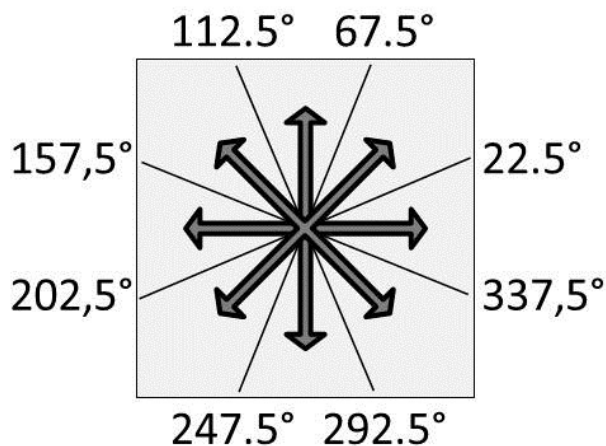


Abbildung 6-6: Zuordnung der Winkelbereiche der Wischbewegung auf die Richtung der Cursorbewegung bei Bedienvariante 4, sofern die Tasten auf der Anzeige gitterförmig angeordnet sind

Da das Highlight immer auf einer Taste liegt, lässt es sich wieder als objektgebundener Cursor bezeichnen. Dies reduziert die Bedeutung der Tastengröße und -nähe auf der visuellen Ebene. Das Liegenbleiben des Cursors nach Beendigung einer Wischgeste führt wiederum zu einer (verglichen zu den absoluten Bedienvarianten) gesteigerten Unterbrechbarkeit der Bedienung, was sie für die Doppelaufgabensituation geeignet erscheinen lässt. Bei dieser Bedienart handelt es sich außerdem um eine sehr effiziente Eingabemethode, da jede Wischrichtung als Bedienhandlung gewertet (in den getesteten, gitterartigen Tastenanordnungen werden dadurch diagonale Cursorbewegungen ermöglicht) und die Geste auch wegabhängig (vgl. Abschnitt 1.1.6, Relatives Bedienkonzept) interpretiert wird. Durch die Nutzbarkeit aller Wischrichtungen ist auch eine freiere Verteilung der Tasten auf der Anzeige möglich. Ein weiterer Vorteil der Bedienvariante ist ihre Ähnlichkeit zur Bedienart am Laptop, was eine grundlegende Vertrautheit des Nutzers zu dieser Variante schaffen sollte. Allerdings zeigt sich bei dieser Bedienvariante sehr deutlich das Problem des Umsetzens des Fingers (vgl. Abschnitt 1.1.6, Relatives Bedienkonzept), gerade wenn viele Tasten auf einer Anzeige enthalten sind. Ein zweiter Nachteil liegt darin, dass das Tastenhighlight bei schnellen Wischbewegungen sehr schnell zwischen den Tasten springt, was eventuell störend wirken könnte.

Bei der vorliegenden sensomotorischen Transformation (vgl. Abschnitt 1.2.8, Touchpadbedienung im Kontext sensomotorischer Transformationen) handelt es sich erneut um eine Verschiebung und Verstärkung. Die Wischgeste wird wegabhängig ausgewertet und in eine Anzahl von Bedienschritten übertragen (je 11.25 mm Bedienweg werden in einen Bedienschritt übersetzt). Man könnte daher auch bei Bedienvariante 4 von einer diskretisierten Transformation sprechen.

Die beiden untersuchten relativen Bedienkonzepte basieren somit nicht auf kontinuierlichen Zielbewegungen und die Größe und Entfernung von Zieltasten sind weniger relevant für diese Art der Bedienung. Ihnen liegt eher eine diskretere Logik der Cursorbewegung zugrunde. Die schrittweise Steuerung des Cursors zum Zielort wird dabei eher als Handlungssequenz mehrerer, sich wiederholender Einzelhandlungen verstanden. Eine Modellierung der untersuchten relativen Bedienkonzepte über Fitts' Law ist damit nicht sinnvoll. Stattdessen wird der in Abschnitt 1.2.5 vorgestellte Ansatz von Card et al. (1978) herangezogen, um die Zeit bis zum Erreichen einer Zieltaste über die Anzahl minimal notwendiger Bedienschritte zu modellieren.

Tabelle 6-1: Übersicht der untersuchten Bedienvarianten

Bedienvariante	1	2	3	4
Grundlegendes Bedienkonzept	absolut	absolut	relativ	relativ
Bezeichnung	absolut	entkoppelt absolut	diskret relativ	kontinuierlich relativ
Cursorkonzept	frei; Cursor nur bei aufgelegtem Finger sichtbar	objektgebunden; Cursor nur bei aufgelegtem Finger sichtbar	objektgebunden; Cursor bleibt bei Fingerablösung an der letzten Position sichtbar	objektgebunden; Cursor bleibt bei Fingerablösung an der letzten Position sichtbar
Besonderheit		Tastenparameter auf visueller und motorischer Ebene werden entkoppelt	Eine Wischgeste wird diskret interpretiert; horizontale und vertikale Wischrichtung möglich	Eine Wischgeste wird wegabhängig interpretiert; horizontale, vertikale und diagonale Wischrichtung möglich

6.2.5 Versuchsdesign

Unabhängige Variablen

In jeder Analyse wurden die Faktoren Alterskategorie und Bedienvariante betrachtet.

- Es wurden zwei Alterskategorien (jünger vs. älter) als between-Faktor untersucht: Eine Gruppe war jünger als 30 Jahre, die andere Gruppe älter als 55 Jahre.
- Die zweite unabhängige Variable (within-Faktor) war jeweils die Bedienvariante (1 vs. 2 vs. 3 vs. 4). Die Probanden bearbeiteten die Aufgabe nacheinander mit vier Bedienvarianten (siehe 6.2.4 Bedienvarianten).

Wie eingangs erläutert, wurden im vorliegenden Experiment Bedienaufgaben mit systematisch variierten Tastengrößen, -entfernungen und -anzahlen verglichen. Dabei entstanden teilweise Konfundierungen zwischen den Faktoren, die im Folgenden erläutert und in Tabelle 6-4 zusammenfassend dargestellt werden. Die beiden unabhängigen Variablen Alterskategorie und Bedienvariante wurden jeweils mit einem der folgenden Faktoren kombiniert:

- Einen within-Faktor stellte die Tastengröße (klein vs. mittel vs. groß) dar. Es wurden Anzeigen mit drei unterschiedlichen Tastengrößen (Abbildung 6-7) bearbeitet: 60 x 60 px, 120 x 120 px und 180 x 180 px. Eine zunehmende Tastengröße ist dabei mit einer zunehmenden Tastenentfernung konfundiert: Der Abstand zwischen den Tastengrenzen nebeneinander liegender Tasten liegt konstant bei 60 px. Aufgrund der zunehmenden Tastengröße ändert sich allerdings der Abstand zwischen den Tastenmittelpunkten. Bei zunehmender Tastengröße liegt er bei nebeneinanderliegenden Tasten bei 60 px, 180 px und 240 px, bei diagonal liegenden Tasten bei 85 px, 255 px und 339 px.

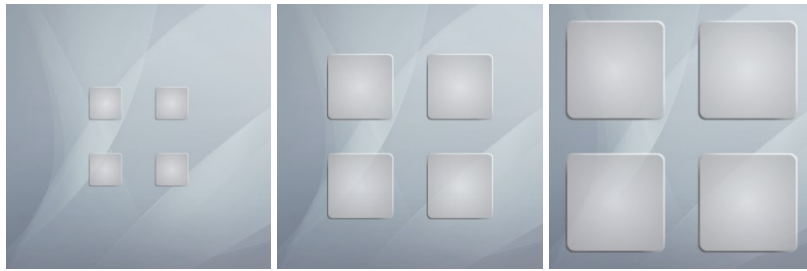


Abbildung 6-7: Faktor Tastengröße

- Die Entfernung zwischen den Tastenmittelpunkten (gering vs. mittel vs. hoch) war ein weiterer within-Faktor (Abbildung 6-8). Aufgrund der Größenbeschränkung des Bildschirms wurde dieser Faktor nur für kleine Tasten (60 x 60 px) untersucht. Die Entfernung zwischen Tastenmittelpunkten variierte bei nebeneinanderliegenden Tasten zwischen 120 px, 240 px und 360 px beziehungsweise bei diagonal angeordneten Tasten zwischen 170 px, 339 px und 509 px.

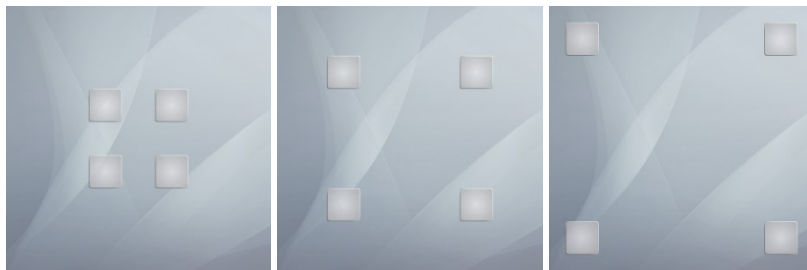


Abbildung 6-8: Faktor Tastenentfernung

- Der letzte Faktor der Anzeigekonfiguration (ebenfalls within) war die Anzahl von angezeigten Tasten (4 vs. 9 vs. 25; Abbildung 6-9): Diese variierte zwischen 4, 9 und 25 Tasten. Aufgrund der Größenbeschränkung des Bildschirms wurde dieser Faktor ebenfalls nur für kleine Tasten (60 x 60 px) untersucht. Die Anzahl an Tasten war dabei mit ihrer Entfernung auf der visuellen Ebene konfundiert, was insbesondere für die absolute Bedienvariante (Bedienvariante 1) berücksichtigt werden sollte. Für die entkoppelt absolute Bedienvariante (Bedienvariante 2) ist die Tastenanzahl außerdem mit der Tastengröße auf der motorischen Ebene konfundiert, da die Touchpadfläche jeweils auf die Anzahl vorhandener Zieltasten aufgeteilt wird. Eine hohe Tastenanzahl hat für Bedienvariante 2 daher kleine Tastengrößen auf der motorischen Ebene und dementsprechend vermutlich eine große Bearbeitungszeit zur Folge. Für die relativen, gestenbasierten Bedienvarianten 3 und 4 bedeutet eine hohe Tastenanzahl teils eine höhere Zahl nötiger Bedienschritte zur Zielerreichung, was sich in einer höheren Bearbeitungszeit niederschlagen sollte.

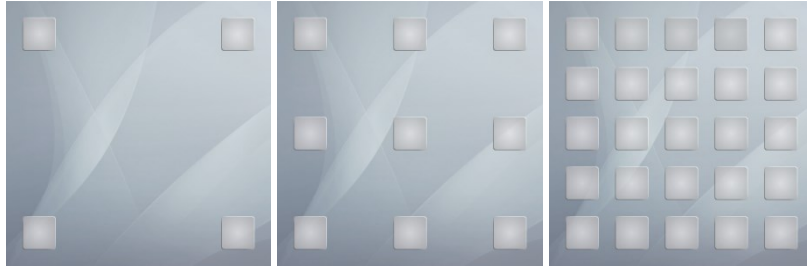


Abbildung 6-9: Faktor Tastenanzahl

Aus den Faktoren Tastengröße, -entfernung und -anzahl ergaben sich insgesamt sieben unterschiedliche Anzeigekonfigurationen (identische Konfigurationen wurden nur einmal getestet).³⁴ Eine genaue Auflistung der sieben Anzeigekonfigurationen und aller Tastenpositionierungen findet sich im Anhang in Tabelle 8-3.

- Einen weiteren within-Faktor stellte die Bewegungsrichtung zum Ziel dar (vertikal / horizontal vs. diagonal). Dieser Faktor wurde nur in den Analysen verschiedener Tastengrößen und Tastenentfernungen betrachtet, das heißt, bei Anzeigekonfigurationen mit vier Tasten. Hintergrund ist, dass bei Bedienvariante 3 bei diagonalen Zielbewegungen (zwei Wischgesten zum Ziel) verglichen zu vertikalen / horizontalen Zielbewegungen (eine Wischgeste zum Ziel) ein zusätzlicher Bedienschritt zur Zielerreichung nötig war, bei den anderen Bedienvarianten dagegen nicht. Bei den untersuchten Anzeigekonfigurationen mit mehr als vier Tasten war eine einfache Aufteilung der auftretenden Bewegungsrichtungen in vertikal / horizontal oder diagonal nicht möglich.

Für jeden der drei Faktoren zur Anzeigekonfiguration (Tastengröße, -entfernung und -anzahl) wurden getrennte Varianzanalysen berechnet.

Für die verschiedenen Tastengrößen und -entfernungen ergeben sich folgende Versuchsdesigns, die in Tabelle 6-2 als Übersicht dargestellt sind.

- 2 (*Alterskategorie*) x 4 (*Bedienvariante*) x 3 (*Tastengröße*) x 2 (*Bewegungsrichtung*)
- 2 (*Alterskategorie*) x 4 (*Bedienvariante*) x 3 (*Tastenentfernung*) x 2 (*Bewegungsrichtung*)

³⁴ Die Abfolge der Ziele war zwischen den Anzeigekonfigurationen unterschiedlich. Bei Konfigurationen mit vier Tasten wurde sichergestellt, dass das Ziel (von der Starttaste aus betrachtet) gleich häufig in horizontaler, vertikaler und diagonaler Richtung lag, um eine Vergleichbarkeit der Zielbewegungen zwischen den Anzeigekonfigurationen beziehungsweise den Stufen der Faktoren zu erreichen.

Tabelle 6-2: Übersicht der untersuchten Faktorenkombinationen bei Analyse der Tastengröße und -entfernung

		Faktor Alterskategorie															
		jünger								älter							
		Faktor Bedienvariante								Faktor Bedienvariante							
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Faktor Bewegungsrichtung		v/h	d	v/h	d	v/h	d	v/h	d	v/h	d	v/h	d	v/h	d	v/h	d
Faktor Tastengröße	klein	Jede Zelle enthält die jeweilige Faktorenkombination aus Alterskategorie, Bedienvariante, Bewegungsrichtung und Tastengröße															
	mittel																
	groß																
Faktor Tastenentfernung	gering	Jede Zelle enthält die jeweilige Faktorenkombination aus Alterskategorie, Bedienvariante, Bewegungsrichtung und Tastenentfernung															
	mittel																
	hoch																

v/h: vertikal/horizontal

d: diagonal

Für den Faktor Tastenanzahl wurden die Varianzanalysen einzeln für die drei Stufen des Faktors berechnet. Bei Anzeigekonfigurationen mit höheren Tastenanzahlen sollte ermöglicht werden, dass jede Taste als Zieltaste verwendet werden kann. Dadurch waren die Bewegungsziele zwischen den Stufen des Faktors Tastenanzahl unterschiedlich, so dass die Bedienmaße zwischen den Stufen nicht vergleichbar sind. Für die Betrachtung der Tastenanzahl ergeben sich daher folgende Versuchsdesigns (vgl. Tabelle 6-3).

- 4 Tasten: 2 (*Alterskategorie*) x 4 (*Bedienvariante*)
- 9 Tasten: 2 (*Alterskategorie*) x 4 (*Bedienvariante*)
- 25 Tasten: 2 (*Alterskategorie*) x 4 (*Bedienvariante*)

Tabelle 6-3: Übersicht der untersuchten Faktorenkombinationen bei Analyse verschiedener Tastenanzahlen

		Faktor Alterskategorie															
		jünger								älter							
		Faktor Bedienvariante								Faktor Bedienvariante							
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Faktor Tastenanzahl	4	Jede Zelle enthält die jeweilige Faktorenkombination aus Alterskategorie und Bedienvariante															
	9																
	25																

6 Experiment IV

Tabelle 6-4: Übersicht durchgeführter Analysen und vorhandener Konfundierungen zwischen den untersuchten Faktoren

				Tastengröße			Konfundierungseffekte	
				Analyse 1				
				klein	mittel	groß		
Tastenanzahl **)	4	Tastentfernung	Analyse 2	niedrig	X	X	X	Bei zunehmender Tastengröße steigt auf der visuellen Ebene die Entfernung zwischen Tastenmittelpunkten an. Bei einer hohen Tastenanzahl ist auf der visuellen Ebene die Entfernung zwischen den Tasten im Mittelwert geringer (besonders für Bedienvariante 1 relevant). Je höher die Tastenanzahl, desto geringer ist bei Bedienvariante 2 die Tastengröße auf der motorischen Ebene. Bei einer hohen Tastenanzahl ist die Zahl nötiger Bedienschritte bei Bedienvariante 3 und 4 im Mittelwert höher.
				mittel	X	*)		
				hoch	X			
			Analyse 3					
			Analyse 4					
			Analyse 5					
	9				X			
25				X				
				Analyse 5				

*) Die Betrachtung verschiedener Tastentfernungen und -anzahlen wurde aufgrund der Größenbeschränkung des Bildschirms nur anhand kleiner Tasten vorgenommen.
 **) Einzelne Analysen für die Faktorstufen Tastenanzahl nötig (Analyse 3-5): Die Bewegungsziele waren für die Stufen des Faktors Tastenanzahl unterschiedlich, so dass die Bedienmaße nicht vergleichbar sind.

Abhängige Variablen

Für jede Aufgabe wurde die Bearbeitungszeit, also die Zeit zwischen der Präsentation einer Zieltaste und deren Betätigung, erhoben. Wie in Abschnitt 2.5.2 beschrieben, wurde für die absoluten Bedienkonzepte als weiteres Zeitmaß die Bewegungszeit einer Zielbewegung, für die relativen Bedienkonzepte die Zeit der Zielnavigation erfasst. Für die Modellanpassungen von Fitts' Law wurde zusätzlich der Durchsatz (vgl. Formel (7)) berechnet. Des Weiteren wurde der relative Fehler, das heißt, die relative Häufigkeit von Aufgaben mit mindestens einem falschen Tastendruck, erhoben. Außerdem wurde die Leistung in der Fahraufgabe über die Spurabweichung gemessen.

Zur ergänzenden Differenzierung der relativen Bedienkonzepte wurde als weiteres Maß der Bediengenauigkeit die relative Häufigkeit von Bedienumwegen betrachtet, das heißt, der Anteil von Aufgaben mit mindestens einem Bedienumweg an der Gesamtzahl eingehender Aufgaben. Das Auftreten von Bedienumwegen wird dadurch definiert, dass die aufgetretene Anzahl von Wischgesten größer ist als die mindestens zur Zielerreichung benötigte Anzahl. Bedienumwege sind nicht generell als kritisch einzustufen, sofern die Bearbeitungszeit, der relative Fehler oder die Spurabweichung durch die indirektere Bedienung nicht negativ beeinflusst werden.

Als weitere abhängige Variablen wurden subjektive Maße betrachtet. Nach jeder Bedienvariante wurde ein Akzeptanzfragebogen (vgl. Anhang, Abbildung 8-4) ausgefüllt. Dieser enthielt wiederum diverse Items wie beispielsweise „Wie gut gefällt Ihnen diese Bedienvariante?“, die anhand einer visuellen Analogskala (0 - 15 cm; Abbildung 6-10) beantwortet werden konnten. Zusätzlich konnten die Probanden Vor- und Nachteile des jeweiligen Bedienkonzepts frei benennen.

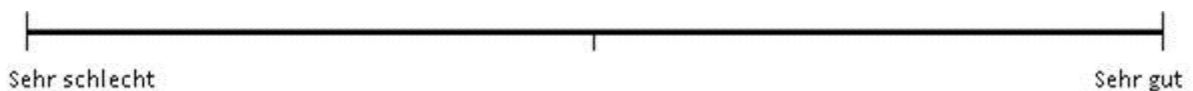


Abbildung 6-10: Visuelle Analogskala für das Item „Wie gut gefällt Ihnen diese Bedienvariante?“

Am Ende des Versuchs wurde der Akzeptanzfragebogen erneut als vergleichende Befragung durchgeführt (vgl. Anhang, Abbildung 8-5 und Abbildung 8-6). Außerdem wurden die Gründe erfragt, aus denen ein Bedienkonzept dem Probanden am besten oder am schlechtesten gefallen hat.

Probandenkennwerte

Zur Stichprobenbeschreibung und zur Kontrolle von Stichprobenunterschieden sollten die Probanden ihre Nutzungshäufigkeit von Touchpads und weiteren technischen Geräten (Smartphones, PC etc.) auf einer fünfstufigen Skala einschätzen. Außerdem wurde anhand von drei Fragen die Technikaffinität der Probanden erfasst. Zusätzlich wurden Seheinschränkungen der Probanden erfragt und der Visus auf Bildschirmdistanz erfasst. Des Weiteren wurden die Handlänge und Fingerbreite (möglicher Bedienfinger) gemessen und die Handhaltung während der Eingabe beobachtet. Um grundlegende motorische Unterschiede zwischen den beiden Alterskategorien festzustellen, wurde wiederum der Motoriktest - wie in Experiment II beschrieben - angewandt.

6.2.6 Versuchsablauf

Nach der Begrüßung wurden die Probanden nach Alter, Händigkeit, Nutzungshäufigkeit von Touchpadbedienung und weiteren technischen Geräten, Technikaffinität und dem Tragen von Sehhilfen (Brille, Kontaktlinsen) befragt.

Anschließend wurden die Probanden darauf hingewiesen, dass der Versuch dazu dient, verschiedene Bedienmöglichkeiten eines Touchpads zu erproben.

Zuerst wurde die Spurhaltungsaufgabe ohne gleichzeitige Bedienung geübt.

Dann wurde die Versuchsaufgabe (vgl. Abschnitt 6.2.3) und die jeweilige Bedienvariante (vgl. Abschnitt 6.2.4) instruiert, welche die Probanden im Stand (ungefähr 50 % der Übungsaufgaben) und während der Fahrt (ungefähr 50 % der Übungsaufgaben) insgesamt siebzimal (jeweils zehnmal pro Anzeigekonfiguration) üben sollten. Die Probanden wurden instruiert, möglichst schnell und genau zu bedienen. Die rechte, bedienende Hand sollte wie in allen vorherigen Experimenten zwischen zwei Aufgaben am Touchpad liegen gelassen werden.

Bei Bedienvariante 1 und 2 wurden die Probanden instruiert, den Bedienfinger aus Aufzeichnungsgründen immer auf dem Touchpad liegen zu lassen.

Vor den vier Testblöcken (90 Aufgaben pro Anzeigekonfiguration, das heißt, 630 Aufgaben pro Bedienvariante) wurden die Probanden instruiert, dass die Fahraufgabe Vorrang hat, sie aber dennoch möglichst schnell und fehlerfrei eingeben sollen. Nach jeder Bedienvariante sollten die Probanden diese anhand eines Akzeptanzfragebogens einschätzen und Vor- und Nachteile benennen. Die Abfolge der Bedienvarianten war über die Probanden randomisiert.

Nach den Testblöcken und Befragungen wurde der Motoriktest (siehe Probandenkennwerte) und ein Visustest durchgeführt, der speziell für die Bildschirmdistanz von 80 cm geeignet war.

Daraufhin schätzten die Probanden alle vier Bedienvarianten auf einem vergleichenden Akzeptanzfragebogen ein. Die Gründe für die Wahl der besten und schlechtesten Bedienvariante wurden erfragt.

Zu Versuchsabschluss wurden Hand- und Fingerlänge und die Fingerbreite der Bedienfinger der Probanden gemessen.

Das Experiment dauerte insgesamt ungefähr 120 Minuten. Abbildung 6-11 bietet einen Überblick über den Ablauf.

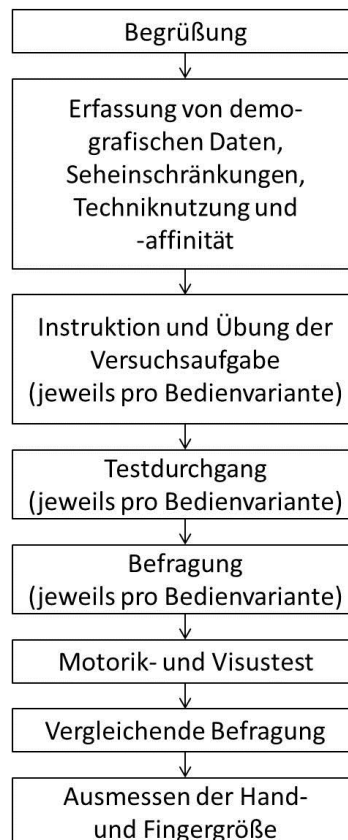


Abbildung 6-11: Grafische Darstellung des Versuchsablaufs von Experiment IV

6.2.7 Datenanalyse

Alle Faktoren in den Analysen außer der Alterskategorie der Probanden waren within-Faktoren. Als Hauptanalyse wurde getrennt für die Faktoren Tastengröße und -entfernung eine Varianzanalyse mit Messwiederholung berechnet, wobei die Alterskategorie als between-Faktor in die Berechnungen einging. Wie in Abschnitt 6.2.5 erläutert, wurden die Varianzanalysen für den Faktor Tastenanzahl einzeln für die drei Stufen berechnet.

Es wurden jeweils Greenhouse-Geisser korrigierte Freiheitsgrade verwendet und als Level für statistische Signifikanz wurde $p < 0.05$ festgelegt. Um bei einem signifikantem Haupteffekt eines Faktors mit mehr als zwei Stufen zu testen, zwischen welchen Stufen der signifikante Unterschied liegt, wurden post hoc paarweise Mittelwertsvergleiche mit Bonferroni-Adjustierung berechnet.

Der relative Fehler wurde für die inferenzstatistischen Auswertungen gemäß Winer (1971) sinustransformiert³⁵. Als Maße der Spurbabweichung wurden der Betrag und die Standardabweichung berechnet, um einerseits Aussagen über den absoluten Versatz und andererseits über ihre Variabilität treffen zu können.

Für die beiden absoluten Bedienkonzepte wurden - getrennt für die beiden Alterskategorien - Modellanpassungen an Fitts' Law erstellt, um die Bewegungszeit zu erklären. Bei den relativen Bedienkonzepten sollte die Zeit der Zielnavigation über die Anzahl von Bedienschritten vorhergesagt werden, wofür eine lineare Regression berechnet wurde.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden im folgenden Ergebnisbericht nur signifikante Effekte und Interaktionen berichtet.

Motoriktest

Wie in Experiment II wurde zur Beschreibung der Stichprobe (Unterschiede zwischen den beiden Alterskategorien) und zur Prüfung der Eignung der Probanden ein Motoriktest durchgeführt. In der standardisierten Abweichung im Motoriktest ließen sich in den beiden Altersgruppen wie in Experiment II keine Ausreißer³⁶ feststellen. Daher waren alle Probanden zur Teilnahme am Experiment geeignet. Ältere Probanden ($M = 37.3$ px, $SD = 15.4$ px) zeigten, wie erwartet, erneut eine signifikant größere Abweichung zur Ideallinie im Motoriktest als jüngere Probanden ($M = 23.0$ px, $SD = 3.6$ px) ($t(15.5) = -3.49, p < 0.01$).

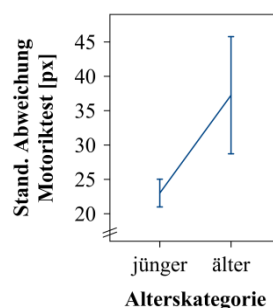


Abbildung 6-12: Mittlere standardisierte Abweichung im Motoriktest in Pixel [px] in Abhängigkeit von der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Ausgeschlossene Daten

Wie in allen vorherigen Experimenten wurden Aufgaben, in denen eine Störung des Ablaufs auftrat, vom Versuchsleiter während der Versuchsdurchführung markiert und von der Auswertung ausgeschlossen. Daneben wurde getrennt pro Proband, Bedienvariante, Tastengröße, -entfernung und -an-

³⁵ Die deskriptive Statistik (Grafische Darstellungen, Mittelwerte, Standardabweichungen) des relativen Fehlers basiert jeweils auf nicht transformierten Werten.

³⁶ Als Ausreißer wurden Werte definiert, die mehr als drei Standardabweichungen größer oder kleiner als der Mittelwert waren.

zahl eine Ausreißer-Korrektur durchgeführt: Aufgaben, in denen die Bearbeitungszeit mehr als drei Standardabweichungen größer als der Mittelwert war, wurden aus den Analysen ausgeschlossen.

Die Berechnungen zur Spurabweichung beruhten auf Daten ohne Ausreißer-Korrektur, das heißt, die Spurhaltung während fehlerhafter Eingaben oder sehr langen Aufgaben wurde berücksichtigt. Nur als ungültig markierte Aufgaben wurden ausgeschlossen.

Als Datengrundlage für die Berechnung der Fitts' Law Modellanpassungen wurden die Anzeigekonfigurationen mit vier Tasten herangezogen. Die erste Tastenbetätigung nach einem Wechsel der Anzeigekonfiguration wurde ausgeschlossen, so dass nur Aufgaben einbezogen wurden, in denen Start und Ziel der Bewegung von Anfang an sichtbar waren.

Bei relativen Eingabekonzepten wurden für die Regression der Zeit der Zielnavigation über die Idealanzahl von Wischgesten die Bedingungen ausgeschlossen, die nur einmal pro Proband durchgeführt wurden.

6.3.2 Bearbeitungszeit

Ein Effekt, der sich über alle Tastengrößen ($F(1,28) = 31.70$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.53$), -entfernungen ($F(1,28) = 38.06$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.58$) und -anzahlen (4 Tasten: $F(1,28) = 36.86$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.57$; 9 Tasten: $F(1,28) = 49.96$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.64$; 25 Tasten: $F(1,28) = 60.17$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.68$) zeigte, war der Alterseffekt. Ältere Probanden brauchten signifikant mehr Zeit für die Aufgabenbearbeitung als jüngere Probanden. Die entsprechenden Mittelwerte und Standardabweichungen der Bearbeitungszeiten für jüngere und ältere Probanden sind in Tabelle 6-5 dargestellt.

Tabelle 6-5: M und SD der Bearbeitungszeit [ms] für jüngere und ältere Probanden in den verschiedenen Analysen

Bearbeitungszeit [ms]	Jüngere Probanden		Ältere Probanden	
	M [ms]	SD [ms]	M [ms]	SD [ms]
Bei Analyse der Tastengrößen	996	296	1414	481
Bei Analyse der Tastenentfernungen	1062	288	1493	493
Bei Analyse von Tastenanzahl 4	1071	261	1501	495
Bei Analyse von Tastenanzahl 9	1259	314	1821	533
Bei Analyse von Tastenanzahl 25	1656	597	2500	869

Tastengröße

In der Bearbeitungszeit (Abbildung 6-13) ließ sich ein Effekt der Bedienvariante ($F(2.5,70.1) = 75.31$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.73$) feststellen. Post hoc Bonferroni Tests zeigten, dass die Bearbeitung bei Bedienvariante 3 ($M = 1593$ ms, $SD = 509$ ms) länger dauerte als bei den anderen drei Varianten (jeweils $p < 0.01$). Bedienvariante 4 ($M = 1190$ ms, $SD = 352$ ms) war außerdem langsamer als Bedienvarian-

te 1 ($M = 980$ ms, $SD = 299$ ms; $p < 0.01$) und 2 ($M = 1055$ ms, $SD = 343$ ms; $p < 0.05$). Die anderen post hoc Vergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.2$).

Zusätzlich zeigten sich eine Interaktion der Bedienvariante zur Alterskategorie ($F(2.5,70.1) = 7.11$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.20$) - Ältere brauchten bei Bedienvariante 3 überproportional länger - und eine Dreifachinteraktion (Abbildung 6-14) von Bedienvariante, Alterskategorie und Bewegungsrichtung ($F(2.5,69.1) = 10.58$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.27$): Die Bewegungsrichtung diagonal wirkte sich bei Bedienvariante 3 in deutlich längeren Bearbeitungszeiten aus - vor allem bei älteren Probanden.

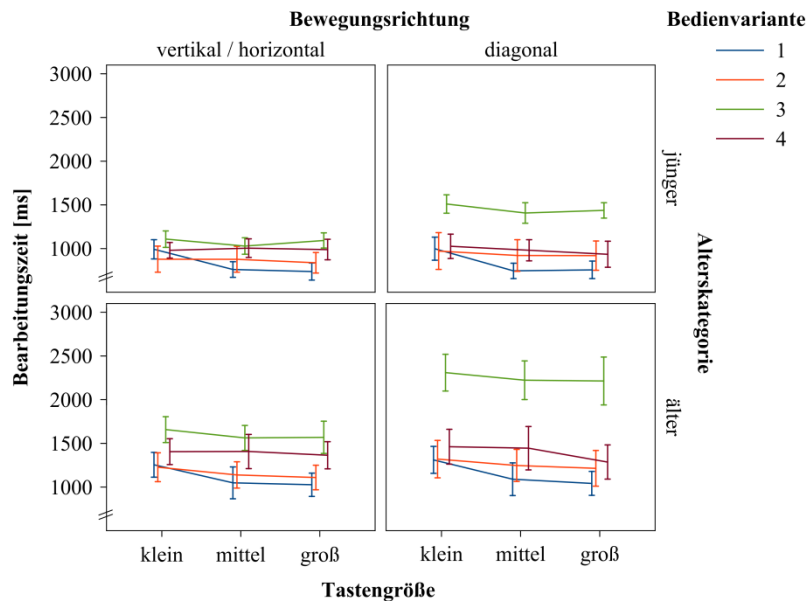


Abbildung 6-13: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Tastengröße, der Bewegungsrichtung, der Alterskategorie und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

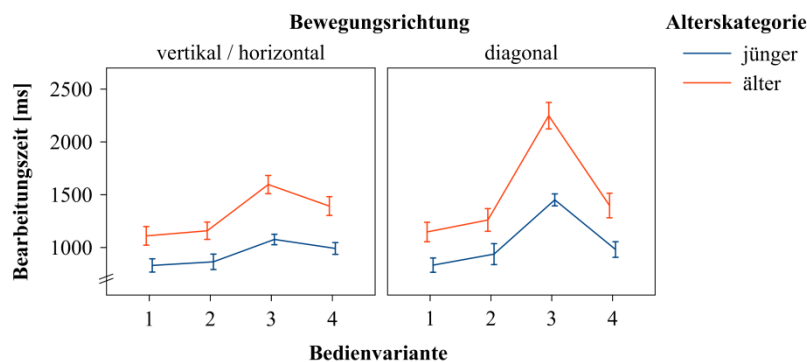


Abbildung 6-14: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Bedienvariante, der Bewegungsrichtung und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Daneben zeigte sich ein Haupteffekt der Tastengröße ($F(1.7,48.0) = 21.46$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.43$). Die post hoc Vergleiche zeigten, dass die Bearbeitungszeit bei kleinen Tasten ($M = 1276$ ms, $SD = 441$ ms) höher war als bei mittleren ($M = 1181$ ms, $SD = 456$ ms; $p < 0.01$) und großen Tasten ($M = 1158$ ms, $SD = 448$ ms; $p < 0.01$). Der Unterschied zwischen mittleren und großen Tasten war nicht signifikant ($p > 0.2$). Der Effekt der Tastengröße interagierte jedoch mit der Bedienvariante (Abbildung 6-15; $F(4.6,128.5) = 5.84$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.17$): Bedienvariante 1 wies bei der kleinsten

Tastengröße überproportional erhöhte Bearbeitungszeiten auf. Bei kleinen Tasten war Variante 1 etwas langsamer als Variante 2, bei den anderen Tastengrößen war sie die schnellste Eingabevariante.

Wie bereits erwähnt, ist der Effekt der Tastengröße mit der visuellen Tastenentfernung konfundiert: Wie in Abschnitt 6.2.5 erläutert, nimmt der Abstand zwischen zwei Tastenmittelpunkten auf der visuellen Ebene bei zunehmender Tastengröße zu. Dies könnte insbesondere für Bedienkonzept 1 relevant sein (bei den anderen Bedienkonzepten folgt die Cursorbewegung nicht der visuellen Konfiguration, weil ein objektgebundener Cursor verwendet wird). Es könnten daher für Bedienvariante 1 mit zunehmender Tastengröße gegenläufige Effekte erwartet werden: Einerseits eine kürzere Bearbeitungszeit durch größere Ziele, andererseits eine längere Bearbeitungszeit durch die leicht zunehmende Tastenentfernung (vgl. Fitts' Law). Da für die kleinsten Tasten bei Bedienkonzept 1 die längsten Bearbeitungszeiten auftreten, scheint der Konfundierungseffekt aber geringer zu sein als der Effekt der Tastengröße.

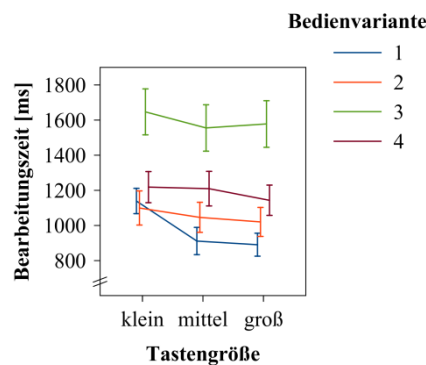


Abbildung 6-15: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Tastengröße und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Zusätzlich ließ sich ein Haupteffekt der Bewegungsrichtung ($F(1,28) = 194.36, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.87$) feststellen. Die diagonale Richtung ($M = 1282$ ms, $SD = 524$ ms) zeigte längere Bearbeitungszeiten als die vertikale / horizontale Richtung ($M = 1128$ ms, $SD = 346$ ms). Dieser interagiert neben der oben beschriebenen Dreifachinteraktion (Abbildung 6-14) als Zweifachinteraktion mit der Bedienvariante ($F(2.5,69.1) = 157.27, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.85$) - die Bewegungsrichtung diagonal wirkte sich vor allem bei Bedienvariante 3 in deutlich längeren Bearbeitungszeiten aus - und mit der Alterskategorie ($F(1,28) = 16.13, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.37$) - ältere Probanden brauchten bei diagonaler Bewegungsrichtung überproportional länger.

Tastenentfernung

In der Bearbeitungszeit (Abbildung 6-16) ließ sich wiederum ein Effekt der Bedienvariante ($F(2.7,76.1) = 68.78, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.71$) feststellen. Bei Bedienvariante 3 ($M = 1651$ ms, $SD = 531$ ms) dauerte die Bearbeitung länger als bei den anderen drei Varianten (jeweils $p < 0.01$). Bedienvariante 2 ($M = 1036$ ms, $SD = 315$ ms) war außerdem schneller als Bedienvariante 1 ($M = 1244$ ms, $SD = 374$ ms; $p < 0.01$) und 4 ($M = 1180$ ms, $SD = 331$ ms; $p < 0.01$). Der post hoc Vergleich von Variante 1 und 4 war nicht signifikant ($p > 0.2$). Der Effekt der Bedienvariante inter-

agierte dabei mit der Tastenentfernung (Abbildung 6-17; $F(2.8,77.3) = 6.96, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.20$): Bei Bedienvariante 1 stieg die Bearbeitungszeit mit zunehmender Tastenentfernung deutlich an, bei Bedienvariante 2 und 4 zeigte sich eine minimale Abnahme. Eine mögliche Ursache könnte in der zunehmenden Geschwindigkeit der Ausführung der Bediengesten bei höherer Tastenentfernung liegen (vgl. Zusatzanalyse: Bewegungsgeschwindigkeit bei zunehmender Tastenentfernung). In der Bearbeitungszeit für Bedienvariante 3 zeigte sich kein Effekt der Tastenentfernung.

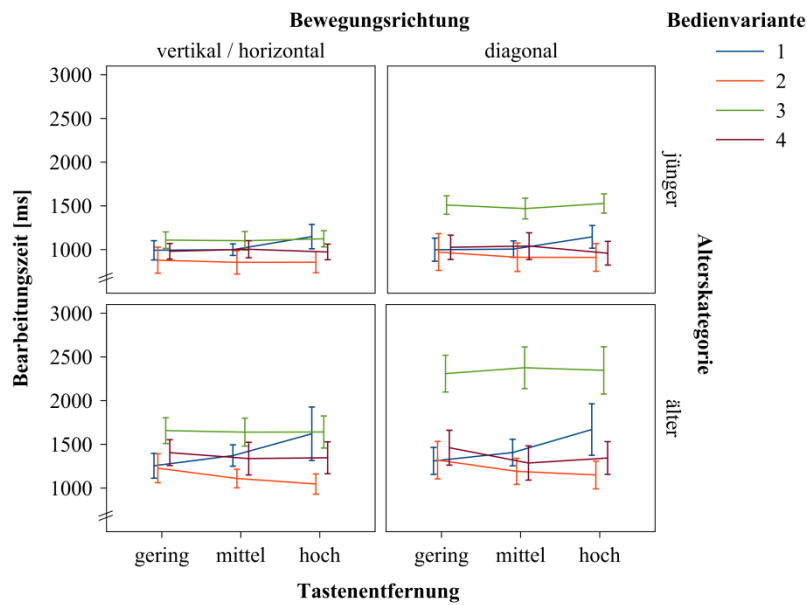


Abbildung 6-16: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Tastenentfernung, der Bewegungsrichtung, der Alterskategorie und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

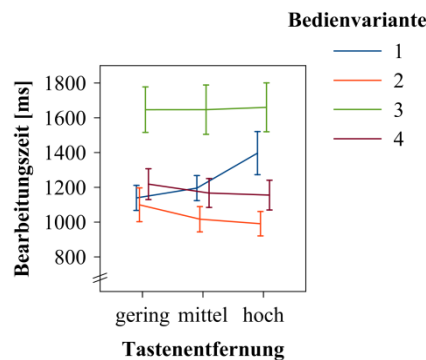


Abbildung 6-17: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Tastenentfernung und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Zusätzlich zeigten sich wieder eine Interaktion der Bedienvariante zur Alterskategorie ($F(2.7,76.1) = 7.90, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.22$) - Ältere brauchten bei Bedienvariante 3 überproportional länger - und eine Dreifachinteraktion (Abbildung 6-18) von Bedienvariante, Alterskategorie und Bewegungsrichtung ($F(2.5,70.2) = 13.49, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.33$): Die Bewegungsrichtung diagonal wirkte sich bei Bedienvariante 3 in deutlich längeren Bearbeitungszeiten aus - vor allem bei älteren Probanden.

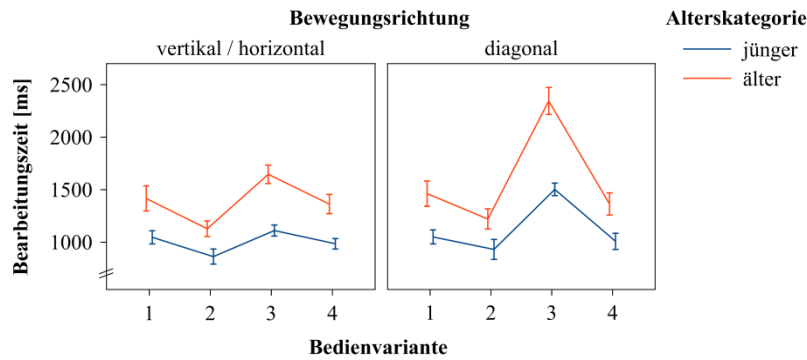


Abbildung 6-18: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Bedienvariante, der Bewegungsrichtung und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Zusätzlich ließ sich erneut ein Haupteffekt der Bewegungsrichtung ($F(1,28) = 183.95$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.87$) feststellen. Die diagonale Richtung ($M = 1360$ ms, $SD = 528$ ms) zeigte längere Bearbeitungszeiten als die vertikale / horizontale Richtung ($M = 1195$ ms, $SD = 356$ ms). Dieser interagierte neben der oben beschriebenen Dreifachinteraktion (Abbildung 6-18) als Zweifachinteraktion mit der Bedienvariante ($F(2.5,70.2) = 158.85$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.85$) - die Bewegungsrichtung diagonal wirkte sich vor allem bei Bedienvariante 3 in deutlich längeren Bearbeitungszeiten aus - und mit der Alterskategorie ($F(1,28) = 13.02$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.32$) - ältere Probanden brauchten bei diagonalen Bewegungsrichtung überproportional länger.

Zusatzanalyse: Bewegungsgeschwindigkeit bei zunehmender Tastenentfernung

Die Abnahme der Bearbeitungszeit bei zunehmender Tastenentfernung auf der visuellen Ebene bei Variante 2 und 4 führte zu der Vermutung einer schnelleren Ausführung der Bewegung bei hoher verglichen zu niedriger visueller Tastenentfernung. Die nötigen Bedienwege auf der motorischen Ebene blieben für die Bedienvarianten 2, 3 und 4 auch bei zunehmender Tastenentfernung gleich.

Die Bedienvarianten waren hinsichtlich der Auswahl des Ziels nicht vergleichbar: Eine kontinuierliche, lange Zielbewegung bei absoluten Bedienvarianten, mehrere diskrete Bedienschritte mit jeweils Fingerablösung bei Bedienvariante 3, mehrere Bedienschritte, die allerdings am Stück ausgeführt werden konnten, bei Bedienvariante 4. Daher wurde die Bewegungsgeschwindigkeit abhängig von der visuellen Tastenentfernung getrennt für die Bedienvarianten untersucht. Im Folgenden wird nur der Haupteffekt der Tastenentfernung betrachtet.

Für Bedienvariante 1 (Abbildung 6-19) ließ sich ein Effekt der Tastenentfernung ($F(1.2,32.7) = 138.90$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.83$) auf die Bewegungsgeschwindigkeit feststellen: Mit zunehmenden Tastenentfernungen auf der visuellen Ebene zeigten sich höhere Bewegungsgeschwindigkeiten (für alle post hoc Paarvergleiche $p < 0.01$). Dennoch zeigte sich in der Bearbeitungszeit eine Erhöhung abhängig von der Tastenentfernung, da die Wege zum Ziel auf der motorischen Ebene weiter waren.

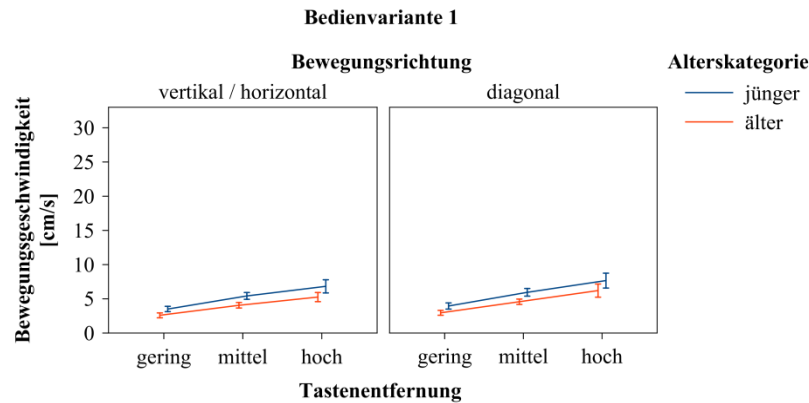


Abbildung 6-19: Mittlere Bewegungsgeschwindigkeit [cm/s] in Abhängigkeit von der Tastentfernung, der Bewegungsrichtung und der Alterskategorie für Bedienvariante 1. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Für Bedienvariante 2 (Abbildung 6-20; $F(1.7,48.3) = 21.93$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.44$) zeigte sich bei geringer ($M = 4.78$ cm/s, $SD = 2.94$ cm/s) Tastentfernung eine niedrigere Bewegungsgeschwindigkeit als bei mittlerer ($M = 6.10$ cm/s, $SD = 2.87$ cm/s; $p < 0.01$) und hoher ($M = 6.77$ cm/s, $SD = 3.25$ cm/s; $p < 0.01$) visueller Tastentfernung. Der post hoc Vergleich zwischen mittlerer und hoher Tastentfernung war nicht signifikant ($p > 0.1$). Die Zunahme der Geschwindigkeit schlägt sich für Bedienvariante 2 bei höherer Tastentfernung in verkürzten Bearbeitungszeiten nieder.

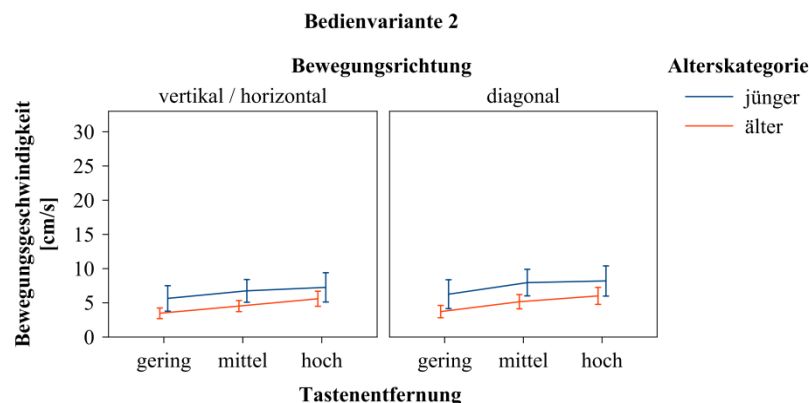


Abbildung 6-20: Mittlere Bewegungsgeschwindigkeit [cm/s] in Abhängigkeit von der Tastentfernung, der Bewegungsrichtung und der Alterskategorie für Bedienvariante 2. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Für Bedienvariante 3 (Abbildung 6-21; $F(1.6,44.0) = 5.93$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.18$) zeigte sich bei hoher ($M = 21.22$ cm/s, $SD = 3.78$ cm/s) Tastentfernung eine etwas höhere Bewegungsgeschwindigkeit als bei mittlerer ($M = 19.73$ cm/s, $SD = 4.54$ cm/s; $p < 0.05$) und niedriger ($M = 19.30$ cm/s, $SD = 5.74$ cm/s; $p < 0.05$) visueller Tastentfernung. Der Unterschied zwischen niedriger und mittlerer Tastentfernung war nicht signifikant ($p > 0.2$).

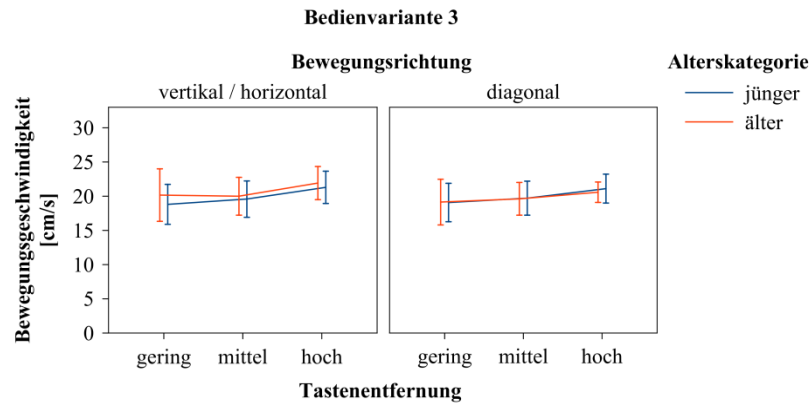


Abbildung 6-21: Mittlere Bewegungsgeschwindigkeit [cm/s] in Abhängigkeit von der Tastentfernung, der Bewegungsrichtung und der Alterskategorie für Bedienvariante 3. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Für Bedienvariante 4 (Abbildung 6-22; $F(2.0,55.2) = 22.59$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.45$) zeigte sich mit zunehmender Tastentfernung eine deutlich höhere Bewegungsgeschwindigkeit ($M_1 = 13.70$ cm/s, $SD_1 = 7.74$ cm/s; $M_2 = 17.73$ cm/s, $SD_2 = 10.78$ cm/s; $M_3 = 22.42$ cm/s, $SD_3 = 11.29$ cm/s; für alle Einzelvergleiche $p < 0.05$).

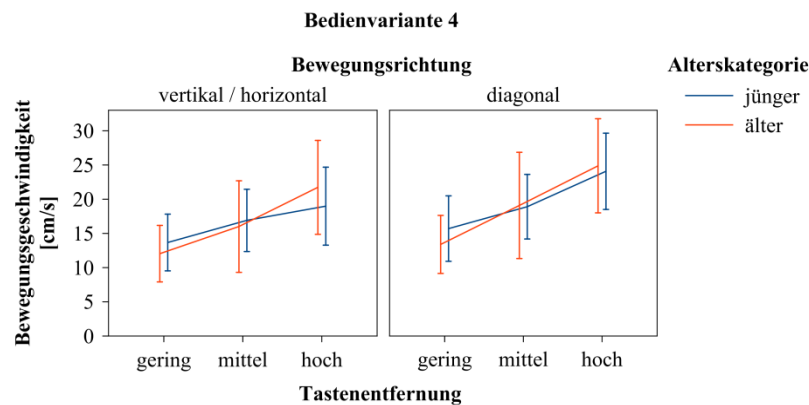


Abbildung 6-22: Mittlere Bewegungsgeschwindigkeit [cm/s] in Abhängigkeit von der Tastentfernung, der Bewegungsrichtung und der Alterskategorie für Bedienvariante 4. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

In allen Bedingungen ließ sich damit eine Zunahme der Bewegungsgeschwindigkeit bei erhöhter Tastentfernung auf der visuellen Ebene feststellen. Bei den Bedienvarianten 2 und 4 führte dies zu einer Reduktion der Bearbeitungszeit. Bei Bedienvariante 1 stieg die Bearbeitungszeit aufgrund weiterer Wege auf der motorischen Ebene dennoch mit zunehmender Tastentfernung an. Für Bedienvariante 3 zeigte sich trotz erhöhter Wischgeschwindigkeit bei zunehmender visueller Tastentfernung keine Reduktion in der Bearbeitungszeit. Dementsprechend führten die Probanden entweder längere Gesten bei zunehmender Tastentfernung aus oder machten zwischen den Gesten längere Pausen.

Tastenzahl

Bei den Analysen der Tastengröße wurden bereits Konfundierungseffekte angesprochen. Auch bei den drei verschiedenen Anzeigekonfigurationen für die Analyse des Faktors Tastenzahl ist ein Konfundierungseffekt zwischen Tastenzahl und visueller Tastentfernung zu bedenken: In den verwendeten Konfigurationen ist die Tastentfernung geringer, je mehr Tasten auf der Anzeige sind. Wie be-

reits erwähnt, werden die Varianzanalysen für den Faktor Tastenanzahl einzeln für die drei Stufen berechnet, da erwartet wird, dass die Bedienmaße zwischen den Stufen nicht vergleichbar sind (vgl. Abschnitt 6.2.5). Allerdings wurde als Vergleichskonfiguration für eine niedrige Tastenanzahl die Konfiguration mit einer hohen Tastenentfernung verwendet. Da erwartet wird, dass diese Aufgabenkonfiguration insbesondere für Bedienkonzept 1 ungünstig sein könnte, sollten bei den Ergebnissen der Tastenanzahl Konfundierungseffekte zur Tastenentfernung beachtet werden. Für Bedienvariante 2 ist die Tastenanzahl außerdem mit der Tastengröße auf der motorischen Ebene konfundiert, da die Touchpadfläche jeweils auf die Anzahl vorhandener Ziele aufgeteilt wird. Für die gestenbasierten Bedienvarianten 3 und 4 bedeutet eine hohe Tastenanzahl, dass zum Teil viele Bedienschritte zur Zielerreichung nötig sind, was als Ursache für eine große Bearbeitungszeit bei hoher Tastenanzahl angenommen wird. Die beschriebenen Konfundierungseffekte werden bei der Interpretation der Befunde berücksichtigt.

Für alle Stufen des Faktors Tastenanzahl zeigte sich ein signifikanter Effekt der Bedienvariante auf die Bearbeitungszeit. Bei vier Tasten (Abbildung 6-23; $F(2.0,55.1) = 29.30$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.51$) erwies sich Variante 2 ($M = 977$ ms, $SD = 253$ ms) im post hoc Vergleich als schneller als die Varianten 1 ($M = 1394$ ms, $SD = 480$ ms), 3 ($M = 1613$ ms, $SD = 441$ ms) und 4 ($M = 1159$ ms, $SD = 318$ ms; jeweils $p < 0.01$). Bedienvariante 4 war außerdem schneller als Bedienvariante 3 ($p < 0.01$) und tendenziell schneller als Variante 1 ($p < 0.1$). Der post hoc Vergleich von Variante 1 und 3 zeigte keinen signifikanten Unterschied ($p > 0.1$). Daneben zeigte sich eine Interaktion zwischen Bedienvariante und Alterskategorie ($F(2.0,55.1) = 3.23$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.10$). Ältere waren bei Bedienvariante 3 überproportional langsamer als bei den anderen Bedienvarianten.

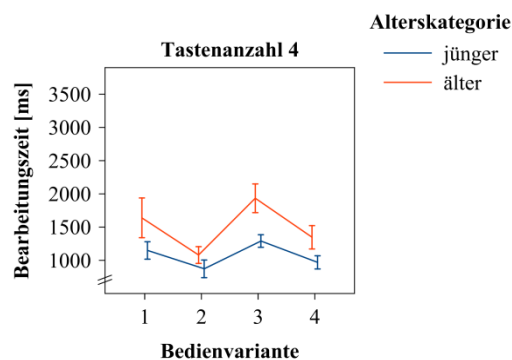


Abbildung 6-23: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Tastenanzahl 4. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Bei neun Tasten (Abbildung 6-24; $F(2.4,67.6) = 44.23$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.61$) war Bedienvariante 3 ($M = 1994$ ms, $SD = 550$ ms) langsamer als alle anderen Bedienvarianten (jeweils $p < 0.01$). Die Eingabe mit Variante 4 ($M = 1586$ ms, $SD = 501$ ms) war langsamer als mit Variante 1 ($M = 1312$ ms, $SD = 291$ ms; $p < 0.05$) oder 2 ($M = 1269$ ms, $SD = 352$ ms; $p < 0.01$). Der Unterschied von Variante 1 und 2 war nicht signifikant ($p > 0.2$). Daneben zeigte sich wieder die Interaktion zwischen Bedienvari-

ante und Alterskategorie ($F(2,4,67.6) = 4.14, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.13$). Ältere waren bei Bedienvariante 3 überproportional langsamer als bei den anderen Bedienvarianten.

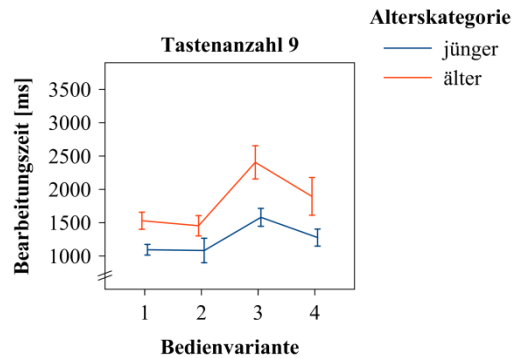


Abbildung 6-24: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenzahl 9. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Bei 25 Tasten (Abbildung 6-25; $F(2,5,70.9) = 70.61, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.72$) waren alle post hoc Paarvergleiche zwischen den Varianten signifikant (jeweils $p < 0.01$). Variante 1 ($M = 1358$ ms, $SD = 442$ ms) war die schnellste Variante, gefolgt von Variante 2 ($M = 1761$ ms, $SD = 607$ ms) und Variante 4 ($M = 2331$ ms, $SD = 734$ ms). Variante 3 ($M = 2860$ ms, $SD = 746$ ms) war die langsamste von allen Varianten.

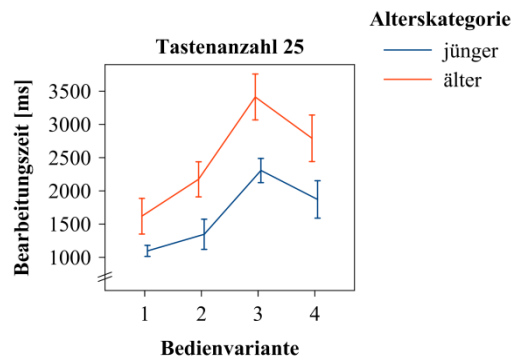


Abbildung 6-25: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenzahl 25. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

6.3.3 Relativer Fehler

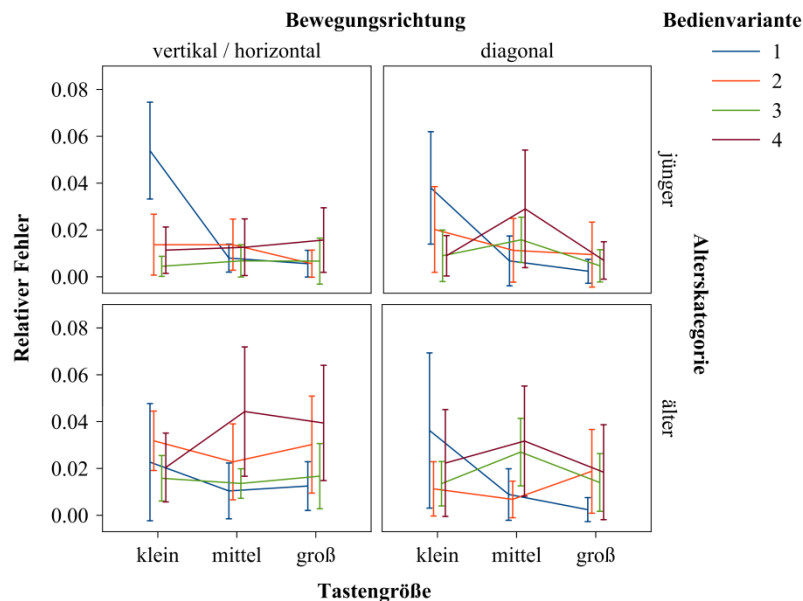
Tastengröße

Abbildung 6-26: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Tastengröße, der Bewegungsrichtung, der Alterskategorie und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

In der relativen Häufigkeit von Aufgaben mit mindestens einem falschen Tastendruck (Abbildung 6-26) zeigte sich ein Effekt der Tastengröße ($F(2.0,55.0) = 9.97, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.26$). Post hoc Bonferroni Test zeigten, dass der relative Fehler bei kleinen Tasten ($M = 0.021, SD = 0.033$) höher als bei großen Tasten ($M = 0.013, SD = 0.026; p < 0.01$) und bei mittlerer Tastengröße ($M = 0.017, SD = 0.028$) höher als bei großen Tasten war ($p < 0.05$). Der Unterschied zwischen kleiner und mittlerer Tastengröße war nicht signifikant ($p > 0.1$). Der Effekt der Tastengröße interagiert allerdings mit der Bedienvariante (Abbildung 6-27; $F(4.1,114.6) = 9.28, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.25$). Bei kleinen Tasten war der relative Fehler bei Bedienvariante 1 deutlich erhöht. Bei mittlerer Tastengröße zeigte Bedienvariante 4 einen etwas erhöhten relativen Fehler.

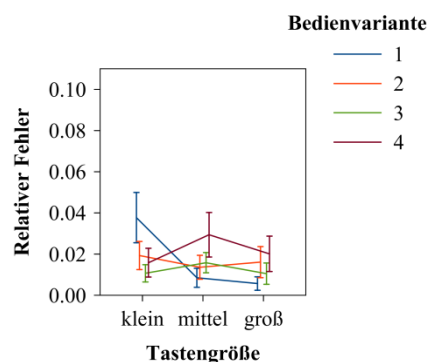


Abbildung 6-27: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Tastengröße und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Daneben zeigte sich ein Effekt der Bewegungsrichtung ($F(1,28) = 10.80, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.28$). Die diagonale Richtung ($M = 0.016, SD = 0.030$) zeigte einen geringeren relativen Fehler als die vertikale /

horizontale Richtung ($M = 0.018$, $SD = 0.028$). Dabei ließ sich allerdings eine signifikante Dreifachinteraktion von Bedienvariante, Bewegungsrichtung und Alterskategorie (Abbildung 6-28; $F(2.8, 78.1) = 2.90$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.09$) feststellen: Der erhöhte relative Fehler bei vertikaler / horizontaler Richtung trat insbesondere bei älteren Probanden bei Bedienvariante 2 auf.

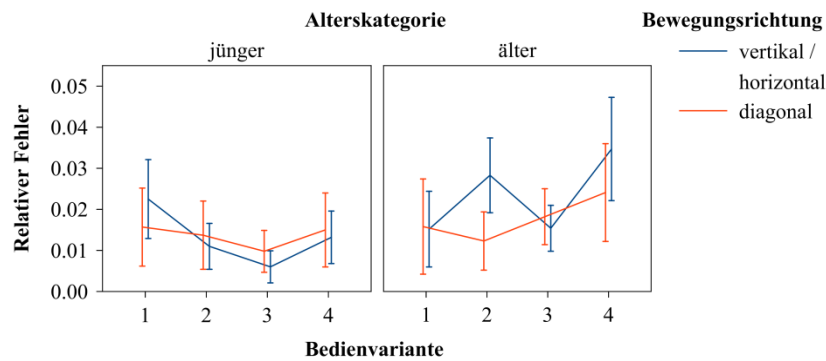


Abbildung 6-28: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Bedienvariante, der Alterskategorie und der Bewegungsrichtung. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Tastentfernung

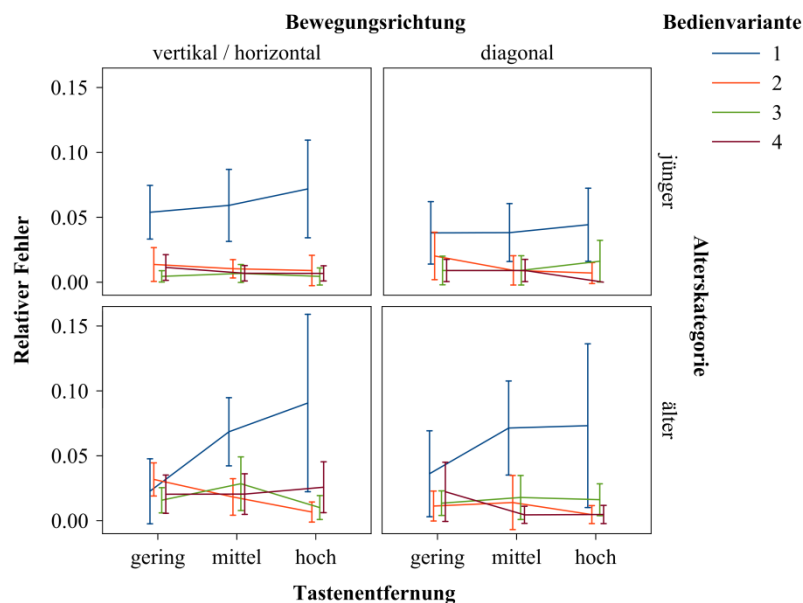


Abbildung 6-29: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Tastentfernung, der Bewegungsrichtung, der Alterskategorie und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Für die Betrachtung der verschiedenen Tastentfernungen zeigte sich im relativen Fehler (Abbildung 6-29) ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Bedienvariante ($F(1.7, 48.9) = 27.48$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.50$). Bei Bedienvariante 1 ($M = 0.056$, $SD = 0.068$) war der relative Fehler größer als bei den anderen drei Bedienvarianten (Variante 2: $M = 0.013$, $SD = 0.023$; Variante 3: $M = 0.013$, $SD = 0.022$; Variante 4: $M = 0.012$, $SD = 0.023$; jeweils $p < 0.01$). Die übrigen post hoc Vergleiche zeigten keine signifikanten Unterschiede (jeweils $p > 0.2$). Hierbei trat eine Interaktion (Abbildung 6-30) zur Tastentfernung ($F(4.8, 134.6) = 4.47$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.14$) auf. Der relative Fehler nahm für Bedienvariante 1 ausgehend von einem erhöhten Niveau mit zunehmender Tastentfernung zu, für die anderen Bedienvarianten blieb er auf niedrigem Niveau annähernd konstant.

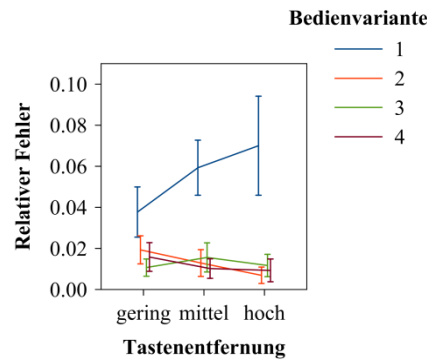


Abbildung 6-30: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Tastentfernung und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Es zeigte sich zusätzlich eine Dreifachinteraktion von Bedienvariante, Tastentfernung und Alterskategorie (Abbildung 6-31; $F(4.8,134.6) = 2.65$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.09$): Bei älteren Probanden war der relative Fehler bei Bedienvariante 1 bei geringer Tastentfernung nicht erhöht, nahm allerdings mit zunehmender Tastentfernung stark zu. Bei jüngeren Probanden war der relative Fehler für Bedienvariante 1 generell erhöht und nahm mit zunehmender Tastentfernung leicht zu.

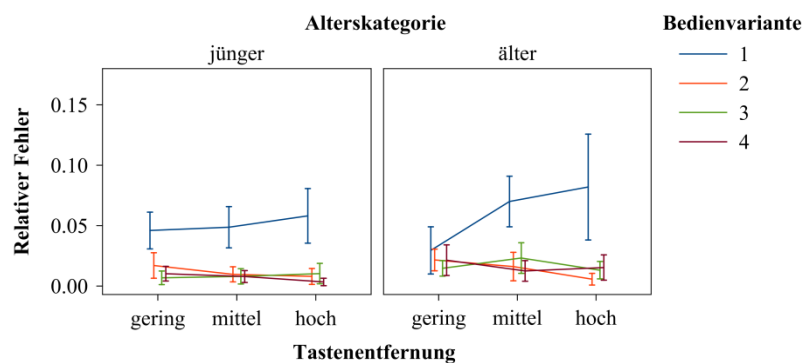


Abbildung 6-31: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Tastentfernung, der Alterskategorie und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Des Weiteren zeigte sich erneut der Effekt der Bewegungsrichtung ($F(1,28) = 15.18$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.35$). Die diagonale Richtung ($M = 0.021$, $SD = 0.042$) zeigte einen geringeren relativen Fehler als die vertikale / horizontale Richtung ($M = 0.026$, $SD = 0.045$).

Tastenzahl

Für alle Stufen des Faktors Tastenzahl zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt der Bedienvariante auf den relativen Fehler. Es traten keine signifikanten Alterseffekte oder Interaktionen zwischen Alterskategorie und Bedienvariante auf.

Bei vier Tasten (Abbildung 6-32; $F(2.1,58.5) = 28.59$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.51$) wies Bedienvariante 1 einen höheren relativen Fehler als die anderen Bedienvarianten (jeweils $p < 0.01$) auf. Die anderen post hoc Vergleiche zeigten keine signifikanten Unterschiede (jeweils $p > 0.2$).

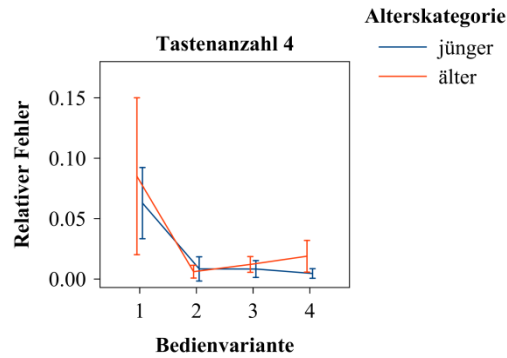


Abbildung 6-32: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenanzahl 4. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Bei neun Tasten (Abbildung 6-33; $F(2.5,69.7) = 15.27$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.35$) war der relative Fehler bei Bedienvariante 1 höher als bei Variante 3 und 4 (jeweils $p < 0.01$) und marginalsignifikant höher als bei Variante 2 ($p < 0.1$). Bei Bedienvariante 2 war der relative Fehler höher als bei Bedienvariante 3 ($p < 0.01$). Die weiteren Paarvergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.2$).

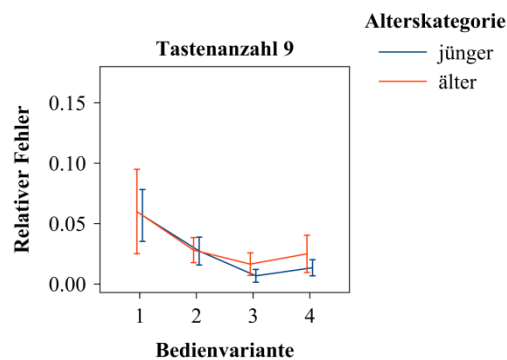


Abbildung 6-33: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenanzahl 9. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Bei 25 Tasten (Abbildung 6-34; $F(2.5,71.3) = 10.23$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.27$) war der relative Fehler bei Bedienvariante 1 höher als bei Bedienvariante 3 ($p < 0.05$), bei Bedienvariante 2 höher als bei den Varianten 3 und 4 (jeweils $p < 0.01$). Die übrigen Paarvergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.1$).

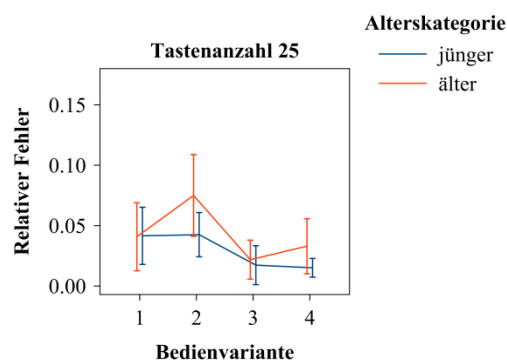


Abbildung 6-34: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenanzahl 25. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

6.3.4 Spurabweichung

Im Betrag der Spurabweichung zeigten sich weder für die verschiedenen Tastengrößen, noch -entfernungen, noch -anzahlen signifikante Unterschiede in den untersuchten Faktoren.

Tastengröße

In der Analyse abhängig von der Tastengröße zeigte sich für die *SD* der Spurabweichung lediglich ein signifikanter Alterseffekt ($F(1,28) = 9.26$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.25$). Ältere Probanden ($M = 0.59$ m, $SD = 0.25$ m) zeigten eine höhere *SD* der Spurabweichung als jüngere Probanden ($M = 0.39$ m, $SD = 0.15$ m).

Tastentfernung

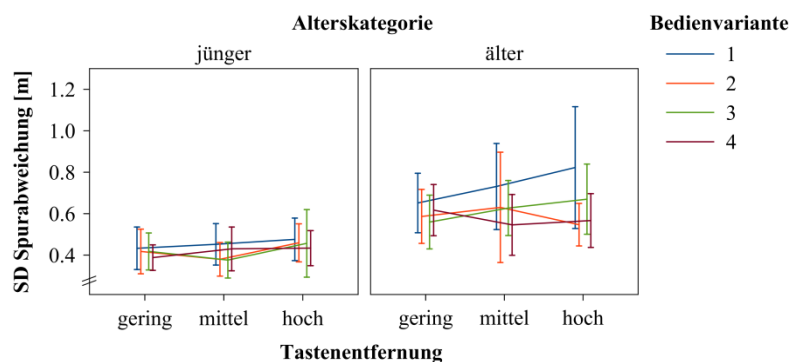


Abbildung 6-35: Mittlere *SD* der Spurabweichung [m] in Abhängigkeit von der Tastentfernung, der Alterskategorie und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

In der Betrachtung verschiedener Tastentfernungen (Abbildung 6-35) ließ sich ein Effekt der Bedienvariante ($F(2.7,75.5) = 4.05$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.13$) feststellen. Post hoc Bonferroni Tests zeigten, dass die *SD* der Spurabweichung bei Bedienvariante 2 ($M = 0.50$ m, $SD = 0.27$ m) geringer war als bei Bedienvariante 1 ($M = 0.59$ m, $SD = 0.34$ m; $p < 0.05$) und bei Bedienvariante 4 ($M = 0.50$ m, $SD = 0.21$ m) tendenziell geringer war als bei Bedienvariante 1 ($p < 0.1$). Die übrigen post hoc Paarvergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.1$).

Daneben trat erneut ein Alterseffekt ($F(1,28) = 7.49$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.21$) auf: Ältere Probanden ($M = 0.63$ m, $SD = 0.32$ m) zeigten eine höhere *SD* der Spurabweichung als jüngere Probanden ($M = 0.43$ m, $SD = 0.18$ m).

Des Weiteren zeigte sich ein tendenzieller Effekt der Tastentfernung ($F(1.7,48.4) = 3.19$, $p < 0.1$, $\eta_p^2 = 0.10$). Bei hoher Tastentfernung ($M = 0.55$ m, $SD = 0.30$ m) zeigte sich eine größere *SD* der Spurabweichung als bei einer niedrigen Tastentfernung ($M = 0.51$ m, $SD = 0.22$ m; $p < 0.05$). Die übrigen post hoc Paarvergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.2$).

Tastenzahl

Für alle Tastenzahlen (Abbildung 6-36; Abbildung 6-37; Abbildung 6-38) ließ sich wiederum ein Alterseffekt (Tastenzahl 4: $F(1,28) = 6.01$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.18$; Tastenzahl 9: $F(1,28) = 7.96$,

6 Experiment IV

$p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.22$; Tastenzahl 25: $F(1,28) = 12.21$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.30$) feststellen: Ältere wiesen eine höhere SD der Spurabweichung auf als jüngere Probanden.

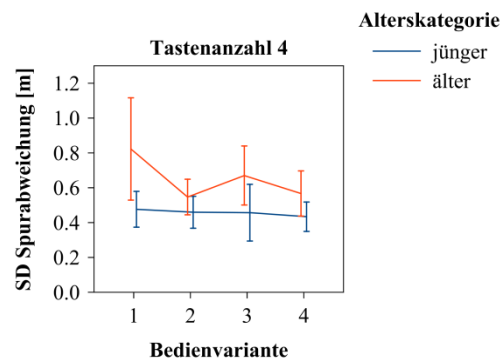


Abbildung 6-36: Mittlere SD der Spurabweichung [m] in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenzahl 4. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Bei vier Tasten zeigte sich des Weiteren ein signifikanter Effekt der Bedienvariante ($F(2.3,65.3) = 3.43$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.11$), wobei die post hoc Bonferroni Tests keine signifikanten Unterschiede aufzeigten (jeweils $p > 0.1$).

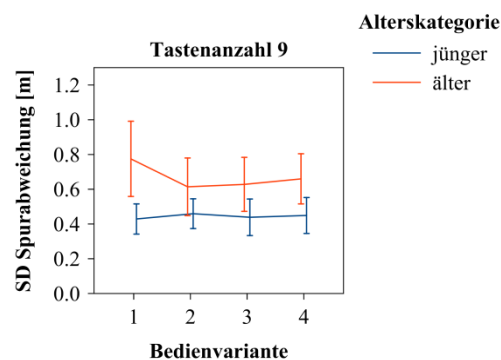


Abbildung 6-37: Mittlere SD der Spurabweichung [m] in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenzahl 9. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Bei neun Tasten interagiert der Alterseffekt tendenziell mit der Bedienvariante ($F(2.6,71.6) = 2.49$, $p < 0.1$, $\eta_p^2 = 0.08$). Ältere zeigten bei allen Bedienvarianten eine erhöhte SD der Spurabweichung, wobei diese bei Bedienvariante 1 deutlicher erhöht war als bei den anderen Bedienvarianten.

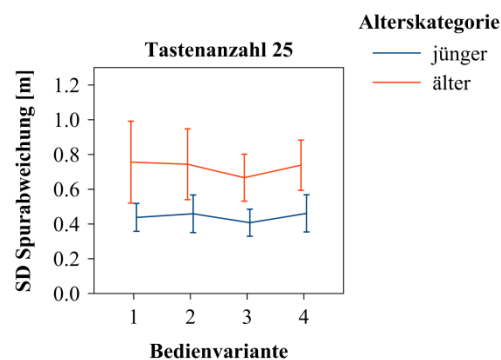


Abbildung 6-38: Mittlere SD der Spurabweichung [m] in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenzahl 25. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

6.3.5 Zusatzanalyse: Bedienumwege bei relativen Bedienkonzepten

Ergänzend zur Untersuchung von Bearbeitungszeiten, relativen Fehlern und der Spurbabweichung wurde zur weiteren Differenzierung der relativen Bedienkonzepte die relative Häufigkeit von Bedienumwegen betrachtet, das heißt, der Anteil von Aufgaben mit mindestens einem Bedienumweg. Aus Gründen der Übersicht wird im Folgenden lediglich dargestellt, ob sich die beiden untersuchten Bedienvarianten in der Häufigkeit von Umwegen unterscheiden. Es wird daher nur auf den Haupteffekt der Bedienvariante eingegangen.

In der relativen Häufigkeit der Bedienumwege zeigte sich ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden relativen Bedienkonzepten. Für Bedienvariante 4 war diese in allen Analysen signifikant höher als für Bedienvariante 3 (Analyse abhängig von Tastengröße ($F(1,28) = 185.21, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.87$), Tastenentfernung ($F(1,28) = 286.77, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.91$), Tastenanzahl (4 Tasten: $F(1,28) = 190.14, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.87$; 9 Tasten: $F(1,28) = 354.77, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.93$; 25 Tasten: $F(1,28) = 192.40, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.87$)). Die entsprechenden Mittelwerte und Standardabweichungen der relativen Häufigkeit von Bedienumwegen für Bedienvariante 3 und 4 sind in Tabelle 6-6 dargestellt.

Tabelle 6-6: M und SD der relativen Häufigkeit von Bedienumwegen für Bedienvariante 3 und 4 in den verschiedenen Analysen

Relative Häufigkeit von Bedienumwegen	Bedienvariante 3		Bedienvariante 4	
	M	SD	M	SD
Bei Analyse der Tastengrößen	0.056	0.053	0.387	0.278
Bei Analyse der Tastenentfernungen	0.056	0.051	0.513	0.319
Bei Analyse von Tastenanzahl 4	0.052	0.037	0.640	0.280
Bei Analyse von Tastenanzahl 9	0.083	0.047	0.380	0.124
Bei Analyse von Tastenanzahl 25	0.192	0.094	0.538	0.116

6.3.6 Erklärung der Bearbeitungszeit

Modellanpassung gemäß Fitts' Law - Vergleich der absoluten Bedienkonzepte

Im Folgenden soll Fitts' Law als bereits bewährtes Paradigma verwendet werden, um die Bedienung abhängig von der Alterskategorie des Nutzers zu beschreiben und zu differenzieren. Es wird außerdem angewandt, um die Bearbeitungszeit für die absoluten Bedienvarianten (Variante 1 und 2) im Fahrkontext zu erklären.³⁷ Für Bedienvariante 2 soll des Weiteren geprüft werden, ob Fitts' Law durch die Manipulation der Tastengröße auf der motorischen Ebene tatsächlich umgangen werden kann.

³⁷ Als Bearbeitungszeit ist in diesem Experiment die Zeit zwischen der Präsentation einer Zieltaste und deren Betätigung definiert. Einen großen Teil der Bearbeitung stellt die Bewegung zum Ziel dar. Die Modellierung dieser Bewegungszeit (Bedienvariante 1 und 2) beziehungsweise der Zeit der Zielnavigation (Bedienvariante 3

Ein Vorteil der Anwendung von Fitts' Law stellt sich in der Vermeidung der Konfundierung von Effekten der Tastengröße und Tastenentfernung dar, da beide Größen im Schwierigkeitsindex kombiniert werden. Bei den Analysen der Bearbeitungszeit abhängig von der Tastengröße wurden bereits Konfundierungseffekte angesprochen. Wie in Abschnitt 6.2.5 erläutert, nimmt der Abstand zwischen zwei Tastenmittelpunkten auf der visuellen Ebene bei zunehmender Tastengröße zu. Indem bei Fitts' Law Tastengröße und -entfernung ins Verhältnis gesetzt werden, wird die Konfundierung, die bei der einseitigen Betrachtung nur eines der beiden Faktoren entsteht, vermieden.

Da Fitts' Law keine Aussage über die Variation der Zielanzahl macht, werden als Datengrundlage für die Berechnung der Modellanpassungen nur die Anzeigekonfigurationen mit vier Tasten herangezogen. Die erste Tastenbetätigung nach einem Wechsel der Anzeigekonfiguration wurde jeweils ausgeschlossen, so dass nur Aufgaben einbezogen wurden, in denen Start und Ziel der Bewegung von Anfang an sichtbar waren.

Zur Berechnung des ID wurde die Shannon-Formel (vgl. Abschnitt 1.2.4, Formel (4)) verwendet.

Bedienvariante 1

Die Regression der Bewegungszeit in Abhängigkeit des Schwierigkeitsindex gemäß Fitts' Law basierte auf der im Anhang in Tabelle 8-4 dargestellten Datengrundlage (siehe dazu auch Abschnitt 6.2.7 und 6.3.1).

Aus den nicht korrigierten Zielentfernungen (D) und -breiten (W) ergaben sich folgende Modellanpassungen (Abbildung 6-39) für die zwei Alterskategorien.

- $MT_j = 211.3 + 160.3x$ ($R_j=0.975$; Varianzaufklärung $R_j^2=95.0\%$)
- $MT_{\bar{a}} = 483.4 + 140.9x$ ($R_{\bar{a}}=0.986$; Varianzaufklärung $R_{\bar{a}}^2=97.1\%$)

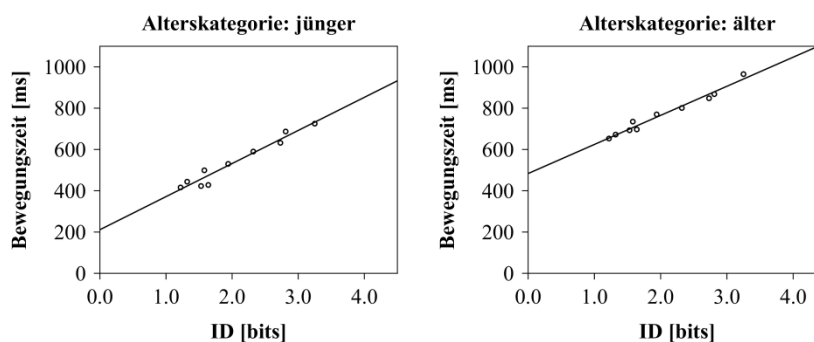


Abbildung 6-39: Modellanpassung an Fitts' Law für Bedienvariante 1 für jüngere (links) und ältere Probanden (rechts) auf Basis des Schwierigkeitsindex (ID).

Y-Achsenabschnitt ($t_j(8) = 7.59$, $t_{\bar{a}}(8) = 26.46$; jeweils $p < 0.01$) und Steigung ($t_j(8) = 12.32$, $t_{\bar{a}}(8) = 16.51$; jeweils $p < 0.01$) waren für beide Modellanpassungen signifikant von Null verschieden, wobei der Y-Achsenabschnitt für ältere Probanden außerhalb des von Soukoreff und MacKenzie

und 4) über Parameter der Aufgabe (Zielgröße, -entfernung, nötige Gestenanzahl) bietet daher die Möglichkeit, Rückschlüsse auf die Bearbeitungszeit zu ziehen.

(2004) empfohlenen Bereichs lag. Ältere wiesen einen signifikant höheren Y-Achsenabschnitt ($t(22.3) = 3.70, p < 0.01$) auf als jüngere Probanden. Der Unterschied in der Steigung war nicht signifikant ($p > 0.2$) zwischen den Alterskategorien. Beide Modellanpassungen konnten einen Großteil der Varianz in den Daten von über 95.0% aufklären.

Gemäß der von Soukoreff und MacKenzie (2004) empfohlenen Vorgehensweise wurde eine erneute Modellberechnung auf Basis der effektiven Zielgrößen und -entfernungen durchgeführt. Die Korrekturen erfolgten dabei entsprechend der in Abschnitt 1.2.4 beschriebenen Vorgehensweise.

Aus den effektiven Zielentfernungen (D_e) und -breiten (W_e) ergaben sich folgende Modellanpassungen (Abbildung 6-40) für die zwei Alterskategorien.

- $MT_j = 121.6 + 149.2x$ ($R_j=0.976$; Varianzaufklärung $R_j^2=95.3\%$)
- $MT_a = 342.4 + 148.7x$ ($R_a=0.964$; Varianzaufklärung $R_a^2=93.0\%$)

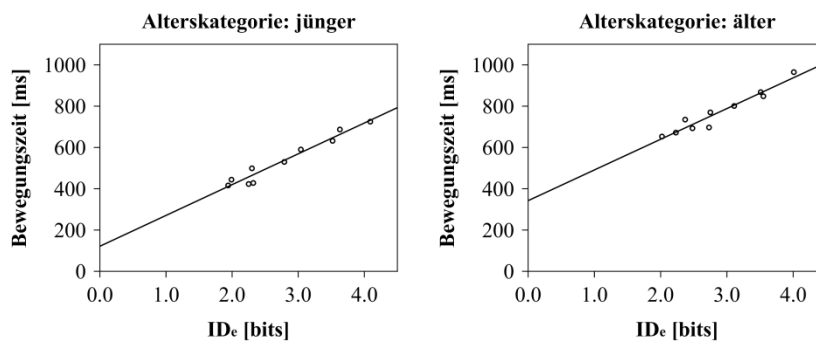


Abbildung 6-40: Modellanpassung an Fitts' Law für Bedienvariante 1 für jüngere (links) und ältere Probanden (rechts) auf Basis des effektiven Schwierigkeitsindex (ID_e).

Y-Achsenabschnitt ($t_j(8) = 3.59, t_a(8) = 8.08$; jeweils $p < 0.01$) und Steigung ($t_j(8) = 12.67, t_a(8) = 10.31$; jeweils $p < 0.01$) waren wiederum für beide Modellanpassungen signifikant von Null verschieden, wobei der Y-Achsenabschnitt im von Soukoreff und MacKenzie (2004) empfohlenen Bereich lag. Ältere wiesen einen signifikant höheren Y-Achsenabschnitt ($t(19.0) = 2.48, p < 0.05$) auf als jüngere Probanden. Der Unterschied in der Steigung war nicht signifikant ($p > 0.2$). Beide Modellanpassungen konnten erneut einen Großteil der Varianz in den Daten von über 93.0% aufklären.

Wie eingangs erwähnt und bereits in Experiment III angewandt, kann nach Soukoreff und MacKenzie (2004) und den Empfehlungen der DIN EN ISO 9241-9 (2002) zum Vergleich von Experimentalbedingungen der Durchsatz berechnet werden. Dieser setzt den effektiven Schwierigkeitsgrad einer Aufgabe zur jeweiligen Bewegungszeit ins Verhältnis und wird dann über Bewegungsbedingungen und Probanden gemittelt (vgl. Abschnitt 1.2.4, Formel (7)).

Die Durchsatzberechnung auf Basis der einzelnen, korrigierten ID_e -Werte ergab (analog zu den auftretenden Unterschieden im Y-Achsenabschnitt), dass jüngere Probanden ($M = 5.33$ bps, $SD = 0.90$ bps) einen signifikant ($t(25.6) = 5.09, p < 0.01$) höheren Durchsatz als ältere ($M = 3.86$ bps, $SD = 0.66$ bps) Probanden aufweisen.

Bedienvariante 2

Die Regression der Bewegungszeit in Abhängigkeit des Schwierigkeitsindex gemäß Fitts' Law basierte auf der im Anhang in Tabelle 8-5 dargestellten Datengrundlage (siehe dazu auch Abschnitt 6.2.7 und 6.3.1). Als Zielgröße und -entfernung wurden die Daten der visuellen Ebene verwendet. Die Berechnung der Fitts' Law Modellanpassung auf Grundlage von Tastengrößen und -entfernungen auf der motorischen Ebene war nicht sinnvoll, da bei 4 Tasten nur zwei unterschiedliche *ID*-Werte für die Berechnung zur Verfügung standen.

Aus den nicht korrigierten Zielentfernungen (*D*) und -breiten (*W*) ergaben sich folgende Modellanpassungen (Abbildung 6-41) für die zwei Alterskategorien.

- $MT_j = 427.9 + 13.1x$ ($R_j=0.425$; Varianzaufklärung $R_j^2=18.1\%$)
- $MT_{\bar{a}} = 527.9 + 37.0x$ ($R_{\bar{a}}=0.428$; Varianzaufklärung $R_{\bar{a}}^2=18.3\%$)

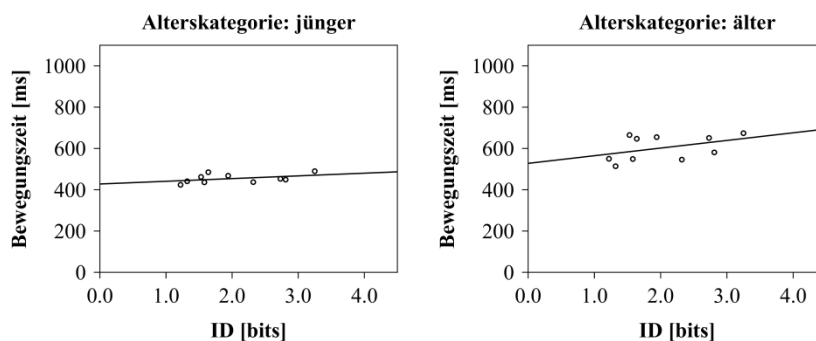


Abbildung 6-41: Modellanpassung an Fitts' Law für Bedienvariante 2 für jüngere (links) und ältere Probanden (rechts) auf Basis des Schwierigkeitsindex (*ID*).

Der Y-Achsenabschnitt ($t_j(8) = 20.31$, $t_{\bar{a}}(8) = 8.91$; jeweils $p < 0.01$) war für beide Modellanpassungen signifikant von Null verschieden, wobei er für beide Alterskategorien außerhalb des von Soukoreff und MacKenzie (2004) empfohlenen Bereichs lag. In der Steigung zeigte sich für beide Modellanpassungen kein signifikanter Unterschied von Null (jeweils $p > 0.2$). Ältere wiesen einen tendenziell höheren Y-Achsenabschnitt ($t(28.0) = 1.86$, $p < 0.1$) auf als jüngere Probanden. In der Steigung zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Alterskategorien ($p > 0.2$). Auffällig war die sehr niedrige und für Fitts' Law untypische Varianzaufklärung beider Modellanpassungen von höchstens 18.3%.

Gemäß der von Soukoreff und MacKenzie (2004) empfohlenen Vorgehensweise wurde eine erneute Modellberechnung auf Basis der effektiven Zielgrößen und -entfernungen durchgeführt. Die Korrekturen erfolgten dabei entsprechend der in Abschnitt 1.2.4 beschriebenen Vorgehensweise.

Es war auffällig, dass die effektiven Werte ($Min = 1.16$ bits; $Max = 1.90$ bits) des Schwierigkeitsindex deutlich unterschiedlich zu den (aus Tastengröße und -entfernung auf der visuellen Ebene) vorhergesagten ($Min = 1.22$ bits; $Max = 3.25$ bits) waren und außerdem in einem geringeren Bereich streuten (vgl. Anhang, Tabelle 8-5).

Aus den effektiven Zielentfernungen (D_e) und -breiten (W_e) ergaben sich folgende Modellanpassungen (Abbildung 6-42) für die zwei Alterskategorien.

- $MT_j = 314.0 + 89.7x$ ($R_j=0.737$; Varianzaufklärung $R_j^2=54.3\%$)
- $MT_{\bar{a}} = 282.0 + 212.5x$ ($R_{\bar{a}}=0.825$; Varianzaufklärung $R_{\bar{a}}^2=68.0\%$)

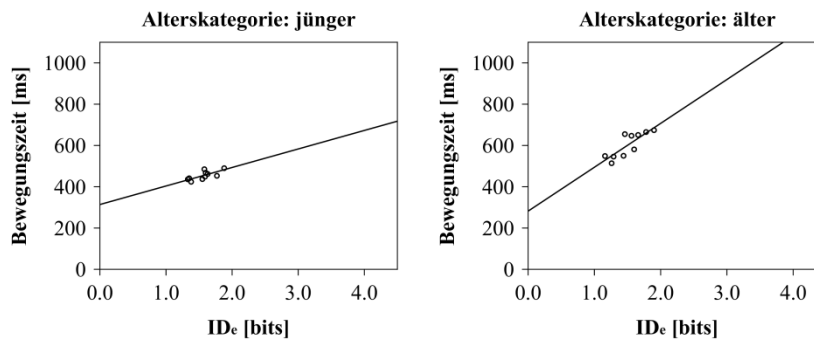


Abbildung 6-42: Modellanpassung an Fitts' Law für Bedienvariante 2 für jüngere (links) und ältere Probanden (rechts) auf Basis des effektiven Schwierigkeitsindex (ID_e).

Y-Achsenabschnitt ($t_j(8) = 6.84$, $t_{\bar{a}}(8) = 3.58$; jeweils $p < 0.01$) und Steigung ($t_j(8) = 3.08$, $p < 0.05$; $t_{\bar{a}}(8) = 4.12$, $p < 0.01$) waren für beide Modellanpassungen signifikant von Null verschieden, wobei der Y-Achsenabschnitt im von Soukoreff und MacKenzie (2004) empfohlenen Bereich lag. Im Y-Achsenabschnitt zeigte sich kein Unterschied zwischen den Alterskategorien ($p > 0.2$). Die Steigung war bei älteren Probanden tendenziell höher als bei jüngeren Probanden ($t(25.7) = 1.72$, $p < 0.1$).

Die Modellanpassungen konnten 54.3% und 68.0% der Varianz in den Daten aufklären. Die Varianzaufklärung auf Basis des effektiven Schwierigkeitsindex war damit deutlich höher als bei Berechnung der Modellanpassung anhand des theoretischen Schwierigkeitsindex, der über die Tastengröße und -entfernung auf der visuellen Ebene berechnet wurde.

Die Durchsatzberechnung auf Basis der einzelnen, korrigierten ID_e -Werte ergab wie bei Bedienvariante 1, dass jüngere Probanden ($M = 3.74$ bps, $SD = 1.47$ bps) einen signifikant ($t(20.0) = 2.66$, $p < 0.05$) höheren Durchsatz als ältere ($M = 2.63$ bps, $SD = 0.70$ bps) Probanden aufweisen.

Auf einen Vergleich des Durchsatzes zwischen Bedienvariante 1 und 2 wird an dieser Stelle verzichtet. Die Spannweite und die Höhe der effektiven Schwierigkeitsindizes, die in die Berechnung des Durchsatzes einfließen, sind zwischen den beiden Bedienvarianten unterschiedlich³⁸. Außerdem lässt sich für Bedienvariante 2 eine deutlich geringere Varianzaufklärung durch die Modellanpassung feststellen als für Bedienvariante 1. Aufgrund dieser Unterschiede wird vermutet, dass keine ausreichende Vergleichbarkeit des Durchsatzes zwischen den Bedienvarianten gegeben ist.

³⁸ Die effektiven Schwierigkeitsindizes bei Bedienvariante 1 liegen im Bereich von 1.94 bis 4.09 bits, bei Bedienvariante 2 im Bereich von 1.16 bis 1.90 bits (siehe Anhang: Tabelle 8-4, Tabelle 8-5). Die Unterschiede im effektiven Schwierigkeitsindex lassen sich dabei auf die konzeptionellen Unterschiede der untersuchten Bedienvarianten zurückführen.

Anzahl an Bearbeitungsschritten - Vergleich der relativen Bedienkonzepte

Wie eingangs erläutert, ist eine Modellierung über Fitts' Law für relative, gestenbasierte Bedienkonzepte nicht sinnvoll, da diese nicht auf kontinuierlichen Zielbewegungen beruhen, sondern ihnen eine diskrete Logik der Cursorsteuerung zugrunde liegt und Zielgröße und -entfernung weniger relevant sind. Die schrittweise Cursorsteuerung zum Zielort bei den relativen Konzepten wird eher als Handlungssequenz mehrerer, sich wiederholender Einzelhandlungen verstanden. In Abschnitt 1.2.5 wurde ein Ansatz von Card et al. (1978) vorgestellt, die Bearbeitungszeit bei derartigen, diskreten Eingabemethoden zu modellieren und damit vorherzusagen. Card et al. (1978) erklärten die Bearbeitungszeit bei tastenbasierten, diskreten Eingabemethoden über die minimal notwendige, also ideale Anzahl an Tastendrücken bis zur Zielerreichung. Es zeigte sich, dass bei derartigen Eingabemethoden die Zeit der Positionierung des Cursors tatsächlich proportional zur idealen Anzahl an Tastendrücken war. Analog zum Ansatz von Card et al. (1978) soll daher für die in diesem Experiment untersuchten, relativen Bedienkonzepte versucht werden, die Zeit der Zielnavigation über die ideale, also minimale Anzahl an Wischgesten zu erklären.

Bedienvariante 3

Bei der Regression der Zeit der Zielnavigation in Abhängigkeit von der idealen Gestenanzahl ergaben sich folgende Modellanpassungen (Abbildung 6-43) für die beiden Alterskategorien (Datengrundlage siehe Anhang, Tabelle 8-6).

- $MT_j = 336.9 + 388.1x$ ($R_j=1.000$; Varianzaufklärung $R_j^2=99.9\%$)
- $MT_{\bar{a}} = 583.9 + 543.6x$ ($R_{\bar{a}}=0.997$; Varianzaufklärung $R_{\bar{a}}^2=99.5\%$)

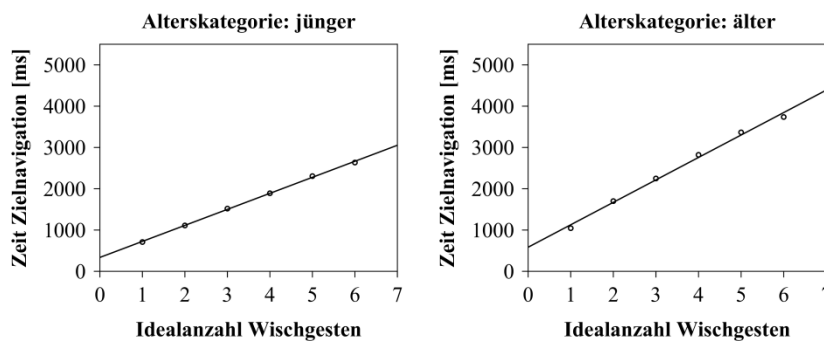


Abbildung 6-43: Erklärung der Zeit der Zielnavigation [ms] für Bedienvariante 3 für jüngere (links) und ältere Probanden (rechts) in Abhängigkeit von der Idealanzahl an Wischgesten.

Y-Achsenabschnitt ($t_j(4) = 15.07$, $t_{\bar{a}}(4) = 7.45$; jeweils $p < 0.01$) und Steigung ($t_j(4) = 67.61$, $t_{\bar{a}}(4) = 27.00$; jeweils $p < 0.01$) waren für beide Modellanpassungen signifikant von Null verschieden.

Jüngere Probanden zeigten einen geringeren Y-Achsenabschnitt ($t(26.1) = 5.22$, $p < 0.01$) und eine niedrigere Steigung ($t(22.4) = 4.87$, $p < 0.01$) als ältere Probanden. Das bedeutet, dass jüngere Probanden sowohl schneller zu Beginn der Zielnavigation sind als auch bei jeder einzelnen, zusätzlich nötigen Geste. Damit wirkt sich bei jüngeren Probanden eine höhere, nötige Gestenanzahl weniger deutlich auf die Gesamtzeit der Zielnavigation aus.

Bei der Modellierung der Zeit der Zielnavigation über die ideale Gestenanzahl zeigten sich sehr hohe Varianzaufklärungen von über 99%, was für eine konstante Ausführung der Wischgesten spricht. Die Linearität der Modellanpassung weist außerdem darauf hin, dass die einzelnen Wischgesten additiv auf eine zugrundeliegende Zeit der Bewegungsinitiierung wirken könnten.

Bedienvariante 4

Für Bedienvariante 4 ergaben sich bei der Regression der Zeit der Zielnavigation in Abhängigkeit von der idealen Gestenanzahl folgende Modellanpassungen (Abbildung 6-44) für die beiden Alterskategorien (Datengrundlage siehe Anhang, Tabelle 8-7).

- $MT_j = 363.1 + 317.7x$ ($R_j=0.925$; Varianzaufklärung $R_j^2=85.6\%$)
- $MT_{\bar{a}} = 457.2 + 508.2x$ ($R_{\bar{a}}=0.982$; Varianzaufklärung $R_{\bar{a}}^2=96.5\%$)

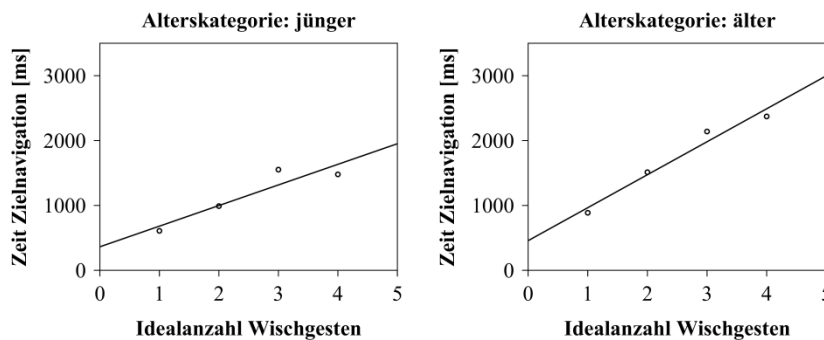


Abbildung 6-44: Erklärung der Zeit der Zielnavigation [ms] für Bedienvariante 4 für jüngere (links) und ältere Probanden (rechts) in Abhängigkeit von der Idealanzahl an Wischgesten.

Der Y-Achsenabschnitt unterschied sich für beide Alterskategorien nicht signifikant von Null (jeweils $p > 0.1$). Die Steigung war bei jüngeren ($t_j(2) = 3.45$, $p < 0.1$) tendenziell von Null verschieden, bei älteren ($t_{\bar{a}}(2) = 7.45$, $p < 0.05$) signifikant von Null verschieden.

Im Y-Achsenabschnitt zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Alterskategorien ($p > 0.1$). Jüngere Probanden zeigten eine signifikant niedrigere Steigung ($t(25.9) = 3.79$, $p < 0.01$) als ältere Probanden. Jüngere Probanden sind daher wie bei Bedienvariante 3 bei jeder einzelnen, zusätzlich nötigen Geste schneller als ältere Probanden. Damit wirkt sich bei jüngeren Probanden eine höhere, nötige Gestenanzahl weniger deutlich auf die Gesamtzeit der Zielnavigation aus.

Ähnlich zu Bedienvariante 3 zeigte sich auch für Bedienvariante 4 eine sehr hohe Varianzaufklärung von mindestens 85.6%, was wiederum für eine konstante Ausführung der Wischgesten spricht. Die Linearität der Modellanpassung weist außerdem erneut daraufhin, dass die einzelnen Wischgesten additiv auf eine zugrundeliegende Zeit der Bewegungsinitiierung wirken könnten.

6.3.7 Subjektive Maße

Vergleichende Befragung

Es werden jeweils nur die Effekte in der vergleichenden Befragung berichtet, bei denen sich im Nachtest mindestens ein marginalsignifikanter Unterschied zwischen den Varianten zeigte.

Im Gefallen (Abbildung 6-45; $F(2.5,69.1) = 5.84$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.17$) der Bedienvarianten zeigten sich signifikante Unterschiede: Post hoc Bonferroni Tests zeigten, dass Bedienvariante 3 den Probanden schlechter gefiel als die Varianten 2 und 4 (jeweils $p < 0.01$). Die übrigen post hoc Vergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.1$).

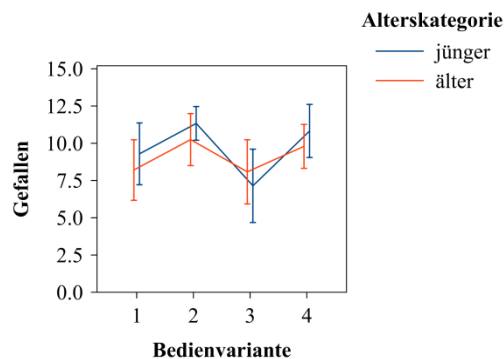


Abbildung 6-45: Mittelwert des subjektiven Gefallens (0 „sehr schlecht“ - 15 „sehr gut“) in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Ein weiterer Unterschied ließ sich in der Intuitivität (Abbildung 6-46; $F(2.4,67.0) = 5.45$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.16$) der Bedienvarianten feststellen. Variante 3 wurde als weniger intuitiv bewertet als 2 und 4 (jeweils $p < 0.05$) und tendenziell weniger intuitiv als 1 ($p < 0.1$). Die übrigen post hoc Vergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.2$).

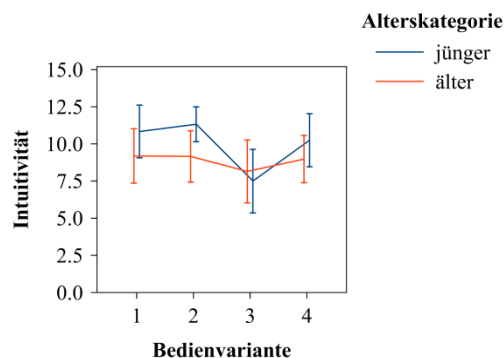


Abbildung 6-46: Mittelwert der subjektiven Intuitivität (0 „sehr wenig“ - 15 „sehr“) in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Nachteile der Variante 3 ließen sich neben den Ergebnissen hinsichtlich Gefallen und Intuitivität auch im während der Bedienung empfundenen Spaß (Abbildung 6-47; $F(2.2,62.2) = 3.60$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.11$) zeigen. Variante 3 machte den Probanden weniger Spaß als die Varianten 2 und 4 (jeweils $p < 0.05$). Die übrigen post hoc Vergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.2$).

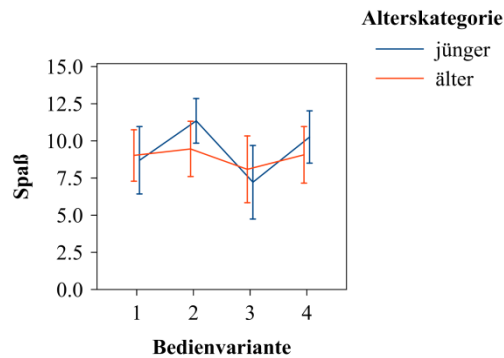


Abbildung 6-47: Mittelwert des subjektiven Spaßes (0 „sehr wenig“ - 15 „sehr viel“) in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Daneben zeigte sich ein Effekt hinsichtlich der subjektiven Ablenkung (Abbildung 6-48; $F(2.5,70.2) = 3.59$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.11$): Variante 2 wurde weniger ablenkend eingeschätzt als Variante 1 ($p < 0.05$). Die übrigen post hoc Vergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.1$).

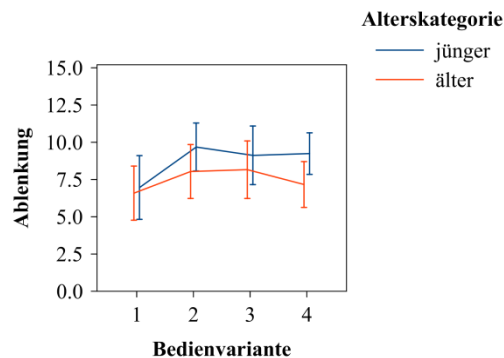


Abbildung 6-48: Mittelwert der subjektiven Ablenkung (0 „sehr stark“ - 15 „kaum“) in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Es zeigte sich außerdem ein Unterschied in der subjektiven Unterbrechbarkeit der Bedienvarianten (Abbildung 6-49; $F(2.7,75.0) = 3.13$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.10$): Post hoc Tests zeigten, dass Variante 1 tendenziell schlechter unterbrechbar war als Variante 2 ($p < 0.1$). Die übrigen post hoc Vergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.1$).

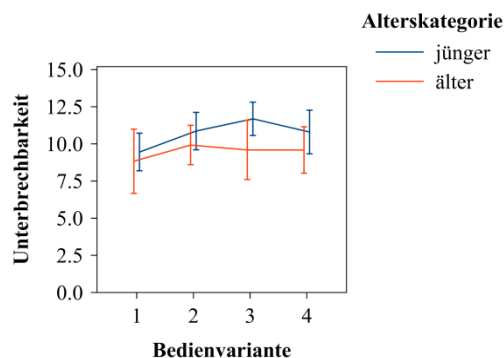


Abbildung 6-49: Mittelwert der subjektiven Unterbrechbarkeit (0 „sehr schlecht“ - 15 „sehr gut“) in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

In der subjektiven Schnelligkeit der Bedienung (Abbildung 6-50; $F(2.4,68.1) = 9.56$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.26$) wurde Variante 3 von den Probanden langsamer eingestuft als die anderen drei Varianten

(jeweils $p < 0.05$). Variante 4 wurde außerdem als langsamer bewertet als Variante 2 ($p < 0.05$). Die übrigen post hoc Vergleiche waren nicht signifikant (jeweils $p > 0.1$).

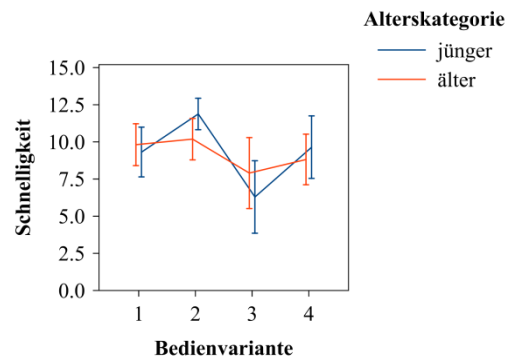


Abbildung 6-50: Mittelwert der subjektiven Schnelligkeit (0 „sehr langsam“ - 15 „sehr schnell“) in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.

Nennungen der besten und schlechtesten Variante

In den Nennungen der besten Variante (Abbildung 6-51) zeigte sich, dass Variante 1, 2 und 4 gleich häufig (je neunmal) als beste Variante genannt wurden. Variante 3 wurde nur dreimal als beste Variante benannt.

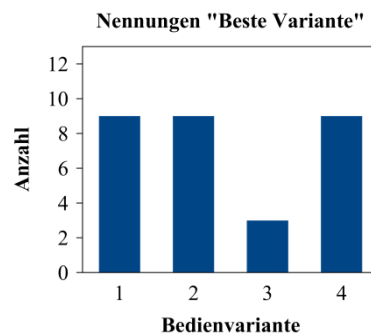


Abbildung 6-51: Anzahl der Nennungen als beste Variante

In den Nennungen der schlechtesten Variante (Abbildung 6-52) wurde Variante 3 am häufigsten genannt (zwölfmal), gefolgt von Variante 1 (zehnmal). Die Varianten 2 und 4 wurden nur je viermal genannt.

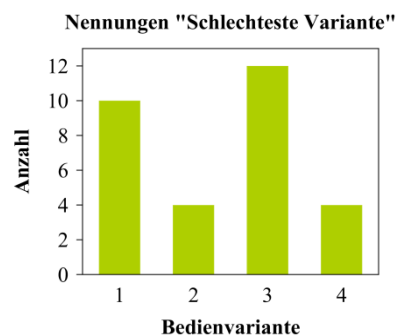


Abbildung 6-52: Anzahl der Nennungen als schlechteste Variante

Nennungen von Vor- und Nachteilen

In den genannten Vorteilen der Variante 1 zeigten sich die erwarteten Aspekte der einfachen und intuitiven Bedienung und der Bedienschnelligkeit. Als Nachteile wurde von den Probanden die Ablenkung und nötige Präzision genannt und, dass die absolute Bedienung gewöhnungsbedürftig sei. Hier spielte vermutlich die größere Vertrautheit mit relativen Bedienkonzepten wie am Laptop eine Rolle.

Vorteile von Variante 2 ließen sich ebenfalls in der Einfachheit und Intuitivität der Bedienung festhalten. Daneben wurden die Bedienschnelligkeit, eine geringere Ablenkung, weniger Bedienfehler, sowie eine geringere, nötige Präzision als Vorteile genannt. Bei hohen Tastenanzahlen wurde allerdings die schlechtere Kontrollierbarkeit kritisiert.

Bei Variante 3 sahen die Probanden Vorteile in der Unterbrechbarkeit und Einfachheit, so dass weniger Bedienfehler auftraten, kaum Übung nötig und die Eingabe an sich sicher und wenig ablenkend war. Nachteile wurden in der langsamen Bedienung gesehen, die lange Bearbeitungszeiten erzwang, was wiederum als ablenkend eingeschätzt wurde. Die Bedienung wurde außerdem als anstrengend eingestuft, weil der Finger jedes Mal abgehoben werden musste.

Variante 4 wurde hinsichtlich der schnellen Bedienung, der Ähnlichkeit zu Bedienkonzepten am Laptop, der Einfachheit, Unterbrechbarkeit und des erlebten Bedienspaßes („lebendig“) positiv bewertet. Nachteile sahen die Probanden im nötigen Umsetzen des Fingers bei hohen Tastenanzahlen und in der geringen Präzision, die Ablenkung erzeugte.

6.4 Diskussion

Aufgrund der Beobachtung in den ersten Experimenten, dass die absolute Bedienung neben der Fahr-situation mit einer hohen relativen Häufigkeit von Fehlbedienungen einhergeht, wurden in der vorliegenden Studie alternative Bedienkonzepte betrachtet. Das absolute Bedienkonzept wurde einerseits als Referenzkonzept in die Betrachtung der verschiedenen Bedienkonzepte einbezogen und andererseits dazu verwendet, die Fehleranfälligkeit des Konzepts bei Nutzung eines farblichen Highlights³⁹, welches das Erreichen einer Zieltaste visualisiert, erneut zu prüfen. Neben der Betrachtung eines alternativen Bedienkonzepts, das auf absoluter Bedienung beruht (Bedienvariante 2), sollte die Leistungsfähigkeit des Nutzers bei zwei relativen, gestenbasierten Bedienkonzepten untersucht werden. Es wurde vermutet, dass diese aufgrund ihrer Unterbrechbarkeit Vorteile in der Doppelaufgabensituation zeigen könnten.

Als zentrale Frage dieser Studie sollte betrachtet werden, welches Bedienkonzept - abhängig vom Alter des Nutzers - zur besten sensomotorischen Leistungsfähigkeit führt, die geringsten Auswirkun-

³⁹ Wie in Experiment III gezeigt, ist für den Nutzer durch ein temporäres Einfärben der aktivierbaren Taste besser erkennbar, ob eine Zieltaste mit dem Cursor erreicht wurde.

gen auf die Leistung in der Primäraufgabe Fahren hat und außerdem subjektiv⁴⁰ am besten bewertet wird. Dazu wurden unterschiedliche Aufgabenkonfigurationen mit systematisch variierten Zielgrößen, -entfernungen und -anzahlen in das Experiment einbezogen.

Anhand der ermittelten Modellanpassungen (für absolute Bedienkonzepte mittels Fitts' Law; für relative Bedienkonzepte durch den Ansatz von Card et al., 1978), welche die Bewegungszeit beziehungsweise die Zeit zur Zielnavigation in Beziehung setzen zu Parametern der Aufgabe (Zielgröße, -entfernung, Gestenanzahl), sollte es weiterhin ermöglicht werden, Rückschlüsse auf die empirisch aufgetretenen Bearbeitungszeiten⁴¹ zu ziehen. Bei einer ausreichenden Güte der Modellanpassungen würde dies außerdem die Möglichkeit bieten, in Aufgaben, welche den getesteten Aufgabenkonfigurationen entsprechen, Vorhersagen bezüglich der Bewegungszeit (absolute Bedienkonzepte) beziehungsweise der Zeit zur Zielnavigation (relative Bedienkonzepte) zu treffen.

6.4.1 Vergleich der Bedienvarianten in den objektiven Maßen

Wie bereits erläutert, sind in den Ergebnissen der objektiven Daten abhängig von den Faktoren Tastengröße, Tastenentfernung und Tastenanzahl teils Konfundierungen zu beachten, welche die Interpretation der Daten erschweren können. Diese Konfundierungen erzeugen die Schwierigkeit, dass Effekte in den objektiven Maßen nicht eindeutig auf die jeweilige Variation der Faktorstufen zurückgeführt werden können. Dadurch erschweren sie auch die Vergleichbarkeit mit anderen Studien, welche die jeweiligen Faktoren ohne Konfundierung untersuchen: Die Ursache der Unterschiede in den Ergebnissen verglichen zu anderen Studien kann dann beispielsweise auf methodische Unterschiede, unterschiedliche Stichproben oder auch auf die Konfundierung zurückgeführt werden. Auch die Generalisierbarkeit der Befunde wird eingeschränkt, da die Ursache beobachteter Effekte nicht eindeutig ist. Daher ist es bedeutend, bei der Interpretation der jeweiligen Ergebnisse mögliche Konfundierungseffekte detailliert zu betrachten. Wie in Abschnitt 6.2.5 erläutert, ist im vorliegenden Experiment erstens eine Zunahme der Tastengröße mit einer höheren Tastenentfernung auf der visuellen Ebene konfundiert. Dies betrifft vermutlich hauptsächlich Bedienkonzept 1, weil die anderen Bedienkonzepte aufgrund der Verwendung eines objektgebundenen Cursors weniger abhängig von der visuellen Tastenanordnung sein sollten. Zweitens ist die Anzahl an Tasten in der vorliegenden Studie mit ihrer visuellen Entfernung konfundiert. Dies könnte sich erneut für Bedienkonzept 1 negativ auswirken, da als Vergleichskonfiguration mit vier Tasten diejenige mit einer hohen (visuellen) Tastenentfernung verwendet wurde. Für Bedienvariante 2 ist die Tastenanzahl außerdem mit der Tastengröße auf der motorischen Ebene konfundiert, da die Touchpadfläche jeweils auf die Anzahl vorhandener Ziele aufgeteilt wird. Diese Effekte werden in der folgenden Diskussion aufgegriffen.

⁴⁰ Dazu wurden die Bedienkonzepte anhand einer ausgeweiteten Befragung ähnlich zu Experiment III bezüglich der Akzeptanz durch die Nutzer gegenübergestellt.

⁴¹ Wie bereits erläutert, stellt die Bewegung zum Ziel einen großen Teil der Bearbeitung dar. Die Modellierung dieser Bewegungszeit (Bedienvariante 1 und 2) beziehungsweise der Zeit der Zielnavigation (Bedienvariante 3 und 4) über Parameter der Aufgabe (Zielgröße, -entfernung, nötige Gestenanzahl) bietet daher eine Möglichkeit, die aufgetretenen Bearbeitungszeiten zu erklären.

Bearbeitungszeit

Hinsichtlich der Bearbeitungszeit zeigte sich ein zu erwartender, genereller Alterseffekt: Ältere Probanden brauchten in allen Versuchsbedingungen signifikant mehr Zeit für die Eingabe als jüngere Probanden.

Die Bedienung bei Variante 3 dauerte unabhängig von den betrachteten Faktoren länger als bei den anderen Varianten. Als Ursachen werden die diskreten Bedienschritte und die Beschränkung möglicher Gesten auf die horizontale und vertikale Richtung vermutet. Im Einklang dazu ist die Bearbeitungszeit bei diagonal liegenden Zielen auf Anzeigekonfigurationen mit vier Tasten überproportional erhöht, was sich dadurch begründen lässt, dass dabei zwei Bedienschritte zur Zielerreichung nötig sind, bei horizontal oder vertikal entfernten Zielen nur einer. Die erhöhte Bearbeitungszeit bei Variante 3 (und diagonaler Bewegungsrichtung) ist bei älteren Probanden verstärkt, worauf in Abschnitt 6.4.2 genauer eingegangen wird.

Bedienvariante 1 wies bei der kleinsten Tastengröße überproportional erhöhte Bearbeitungszeiten auf: Sie war bei der kleinsten Tastengröße etwas langsamer als Variante 2, bei mittleren und großen Tastengrößen war sie jedoch die schnellste Eingabevariante. Wie bereits erläutert, ist die Tastengröße mit der Tastenentfernung konfundiert, das heißt, eine Zunahme der Tastengröße führt zu einer geringfügigen Erhöhung des Abstands zwischen zwei Tastenmittelpunkten. Für Bedienvariante 1 können daher gegenläufige Effekte auftreten: Einerseits eine kürzere Bearbeitungszeit durch größere Ziele, andererseits eine etwas längere Bearbeitungszeit durch die leicht zunehmende Tastenentfernung (vgl. Fitts' Law). Da trotzdem für die kleinsten Tasten bei Bedienkonzept 1 die längsten Bearbeitungszeiten auftreten, scheint der Konfundierungseffekt aber deutlich geringer zu sein als der Effekt der Tastengröße. Mit zunehmender Tastenentfernung stieg bei Bedienvariante 1 die Bearbeitungszeit wie erwartet deutlich an, so dass sie abhängig von der Tastenentfernung langsamer als Bedienvariante 2 und 4 war. Abhängig von der Tastenanzahl zeigte sich, dass Variante 1 bei vier Tasten deskriptiv langsamer als Variante 4 und signifikant langsamer als Variante 2 war, bei neun Tasten war sie zusammen mit Variante 2 die schnellste Eingabevariante und bei 25 Tasten schneller als alle anderen Varianten. Diese Befunde lassen sich allerdings auf den methodischen Effekt der Konfundierung zur Tastenentfernung zurückführen. Die Tastenentfernung nimmt mit zunehmender Tastenanzahl ab, was sich insbesondere auf Bedienvariante 1 auswirkt. Bei den anderen Bedienkonzepten folgt die Cursorbewegung nicht der visuellen Konfiguration, weil ein objektgebundener Cursor verwendet wird.

Bedienvariante 2 war bei kleinen Tasten die schnellste Eingabemethode. Die Bearbeitungszeit nahm mit zunehmender Tastengröße zwar tendenziell ab, allerdings war bei mittleren und großen Tasten Bedienvariante 1 die schnellste Eingabemethode. In den Analysen zur Tastenentfernung stellte Bedienvariante 2 die schnellste Eingabemethode dar. Mit zunehmender Tastenentfernung (auf der visuellen Ebene) wurden für Bedienvariante 2 keine Effekte erwartet (die Wege auf der motorischen Ebene bleiben bei gleichbleibender Tastenanzahl unabhängig von der visuellen Tastenentfernung konstant), es wurde aber eine geringfügige Abnahme der Bearbeitungszeit festgestellt. Dies führte zu der Vermu-

tung einer schnelleren Ausführung der Bewegung bei hoher verglichen zu niedriger Tastentfernung auf der visuellen Ebene, was sich in einer nachfolgenden Analyse bestätigen ließ. Obwohl die Tastentfernung auf der visuellen Ebene bei Bedienvariante 2 für die Aufgabenbearbeitung nicht relevant ist, beeinflusst sie doch die Aufgabenbearbeitung. In der Betrachtung der Tastenanzahl zeigte sich, dass Bedienvariante 2 bei vier (weit entfernt liegenden) Tasten schneller als die anderen Varianten, bei neun Tasten zusammen mit Variante 1 die schnellste Eingabemethode und bei 25 Tasten nach Variante 1 die zweitschnellste Variante war. Die relativ höhere Bearbeitungszeit bei hoher Tastenanzahl war zu erwarten, da Variante 2 auf einer Aufteilung der Touchpadfläche abhängig von der Anzahl an Tasten beruht und bei 25 Tasten die Tastengrößen auf der motorischen Ebene deutlich reduziert sind. Dadurch ist bei einer hohen Tastenanzahl die Schwierigkeit der Zielbewegung erhöht.

Die Bearbeitungszeit bei Variante 4 war nominell bei großen Tasten geringer als bei kleinen und mittleren Tasten, der größere Effekt zeigte sich allerdings im Vergleich zu den Varianten 1 und 2, bei denen die Bedienung schneller war. Im Vergleich der Tastentfernungen zeigte sich wie für Variante 2 eine unerwartete Abnahme der Bearbeitungszeit, die sich ebenfalls auf eine mit höherer Tastentfernung steigende Wischgeschwindigkeit zurückführen lässt. Variante 4 war in der Betrachtung der Bearbeitungszeiten generell wiederum langsamer als Variante 2. Variante 1 war bei geringer Tastentfernung schneller, bei mittlerer oder hoher Tastentfernung war Variante 4 die schnellere Bedienvariante. Im Vergleich der Bedienvarianten bei verschiedenen Tastenanzahlen erwies sich Variante 4 in der Regel als drittschnellste Eingabemethode.

Relativer Fehler

Die absolute Bedienung (Bedienvariante 1) zeigt trotz der Verwendung eines farblichen Highlights⁴² weiterhin Auffälligkeiten hinsichtlich der Fehlerhäufigkeit bei der Bedienung: Bei kleinen Tasten wies Bedienvariante 1 einen höheren relativen Fehler als die anderen drei Varianten. Bei größeren Tasten war der relative Fehler bei Bedienvariante 1 wie erwartet geringer (niedrigere Anforderungen an die Bediengenauigkeit) - sogar kleiner als bei den anderen Bedienvarianten. Mit zunehmender Tastentfernung nahm der relative Fehler für Bedienvariante 1 allerdings ausgehend von einem erhöhten Niveau stark zu. Dies könnte durch die erhöhte Schwierigkeit der Zielbewegung (vgl. Fitts' Law) bei weiter entfernten Tasten erklärt werden. Trotz visueller Rückmeldung der aktivierbaren Taste weist die absolute Bedienung damit aber weiterhin Schwächen bezüglich der Fehleranfälligkeit auf.

Für die anderen Bedienvarianten blieb der relative Fehler wie erwartet unabhängig von der Tastentfernung auf der visuellen Ebene auf niedrigem Niveau annähernd konstant. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass bei den Bedienvarianten 2, 3 und 4 ein objektgebundener Cursor verwendet wird, so dass sich die zunehmende Tastentfernung auf der visuellen Ebene nicht auf die Zielbewegung auswirkt. Bei neun Tasten wies Bedienvariante 1 wiederum den höchsten relativen Fehler auf. Auch für

⁴² Wie in Experiment III gezeigt, ist für den Nutzer durch ein temporäres Einfärben der aktivierbaren Taste besser erkennbar, ob eine Zieltaste mit dem Cursor erreicht wurde.

Bedienvariante 2 ließ sich bei neun Tasten ein erhöhter relativer Fehler feststellen. Bei 25 Tasten zeigte Bedienvariante 2 den nominell höchsten relativen Fehler gefolgt von Bedienvariante 1. Der höhere relative Fehler für Bedienvariante 2 bei größeren Tastenanzahlen lässt sich auf die geringere Tastengröße auf der motorischen Ebene zurückführen, was eine höhere Bediengenauigkeit erforderlich macht. Bedienvariante 3 zeigte in allen Vergleichen einen konstant niedrigen, relativen Fehler. Vermutlich minimieren der objektgebundene Cursor, der jeweils auf einer virtuellen Taste liegen bleibt und dadurch eine gute Unterbrechbarkeit der Bedienung gewährleistet, sowie die Beschränkung möglicher Gesten auf die horizontale und vertikale Richtung die Fehleranfälligkeit von Variante 3. Abgesehen von einem etwas erhöhten relativen Fehler bei mittlerer Tastengröße, zeigt sich auch für Bedienvariante 4 eine relativ konstante, niedrige Fehlerhäufigkeit. Dies könnte wie bei Bedienvariante 3 auf das verwendete Cursorkonzept zurückgeführt werden. Neben den Unterschieden zwischen den Bedienvarianten ließ sich ein unerwarteter Haupteffekt der Bewegungsrichtung feststellen. Bei Zielbewegungen in diagonaler Richtung war der relative Fehler geringer als bei Zielbewegungen in vertikaler / horizontaler Richtung. Über die Konzeption der Bedienvarianten lässt sich dieser Befund allerdings nicht erklären. Zwischen den Alterskategorien treten keine eindeutig gerichteten Unterschiede im relativen Fehler auf.

Spurabweichung

Wie eingangs erwähnt, dient die Spurabweichung als Kenngröße für die Ressourcenanforderung der Bedienaufgabe, wobei eine bessere Spurhaltung (niedrigere Spurabweichung) für eine geringere Belastung der Ressourcen durch die Bediensituation spricht. Generell lassen sich außer den erwarteten Alterseffekten kaum signifikante Unterschiede zwischen den unabhängigen Variablen in den Analysen (der Standardabweichung der Spurabweichung) feststellen. Es zeigte sich lediglich in der Betrachtung verschiedener Tastenentfernungen, dass bei Bedienvariante 2 und 4 die Standardabweichung der Spurabweichung geringer war als bei Bedienvariante 1. Dies spricht für eine größere Belastung der Ressourcen bei Bedienung mit Variante 1 verglichen zu Variante 2 und 4. Die Begründung liegt hierbei vermutlich in der höheren Schwierigkeit der Zielbewegung bei zunehmender Tastenentfernung, die sich insbesondere bei Bedienvariante 1 auswirkt. Bei Bedienvariante 2 nehmen die Tastenentfernungen auf der motorischen Ebene aufgrund der Entkopplung zur visuellen Konfiguration nicht zu, bei Bedienvariante 4 hat die zunehmende Tastenentfernung auf der visuellen Ebene ebenfalls keine Auswirkung auf die auszuführenden Wischgesten. Im Betrag der Spurabweichung ließen sich allerdings keine Unterschiede feststellen.

Als weiterer Effekt trat in der Standardabweichung der Spurabweichung der erwartete Alterseffekt auf, der auch bereits in Experiment I und II beobachtet wurde. Ältere zeigten eine höhere Standardabweichung der Spurabweichung als jüngere Probanden, was für eine erhöhte Ablenkung von der Fahraufgabe durch die Doppelaufgabensituation spricht. Mögliche Ursachen könnten erneut in der geringeren Verfügbarkeit von Ressourcen oder im höheren Ressourcenbedarf durch die Bedienaufgabe vermutet werden.

Bedienumwege

Zur Beschreibung und Differenzierung der relativen Bedienkonzepte wurde ergänzend die relative Häufigkeit von Bedienumwegen betrachtet, wobei im vorangehenden Abschnitt nur der Unterschied zwischen den Bedienvarianten dargestellt wurde. Es ließ sich ein genereller Unterschied zwischen den beiden relativen Bedienkonzepten feststellen: Bei Bedienvariante 4 traten häufiger Umwege auf als bei Bedienvariante 3. Dies wird darauf zurückgeführt, dass Bedienvariante 3 ein sehr diskretes und eingeschränktes (nur horizontale und vertikale Gesten) Bedienkonzept darstellt, wohingegen bei Bedienvariante 4 die Gesten in jeder Wischrichtung interpretiert und wegabhängig ausgewertet werden. Damit ist bei der flexibleren Bedienvariante 4 die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass der Cursor am Ziel vorbei bewegt wird. Wie bereits erwähnt, sind Bedienumwege allerdings nicht generell als kritisch einzustufen, sofern die Bearbeitungszeit, der relative Fehler oder die Spurabweichung durch die indirektere Bedienung nicht negativ beeinflusst werden. In Abschnitt 6.4.4 werden diese verschiedenen objektiven Maße zusammenfassend herangezogen, um Empfehlungen hinsichtlich der Verwendung der Bedienkonzepte abzuleiten.

6.4.2 Erklärung der Bearbeitungszeit

Bedienvariante 1

Fitts' Law sollte als bereits bewährtes Paradigma verwendet werden, um die absolute Bedienung abhängig von der Alterskategorie des Nutzers zu differenzieren und die Bearbeitungszeit zu erklären. Im vorangehenden Abschnitt wurden verschiedene Konfundierungseffekte diskutiert. Ein Vorteil der Anwendung von Fitts' Law stellt sich in der Vermeidung der Konfundierung von Effekten der Tastengröße und Tastenentfernung dar, indem Tastengröße und -entfernung ins Verhältnis gesetzt und zu einem Schwierigkeitsindex kombiniert werden.

Hinsichtlich des absoluten Konzepts wurde erwartet, dass die Bedienung Fitts' Law folgt, also Zielbewegungen zu kleineren oder weiter entfernten Tasten schwieriger sind und mit einer höheren Bewegungszeit einhergehen. Bezüglich der Alterskategorien wurde entsprechend den Befunden aus der Literatur (Ketcham et al., 2002; Ketcham & Stelmach, 2004; vgl. Abschnitt 1.2.10) erwartet, dass Ältere eine Tendenz zur Genauigkeit auf Kosten der Geschwindigkeit aufweisen, das heißt, dass sie einerseits über alle Schwierigkeitsindizes langsamer als jüngere Nutzer sind und andererseits der Anstieg der Bewegungszeit bei zunehmender Aufgabenschwierigkeit bei älteren Nutzern deutlicher ausgeprägt ist.

Die Modellanpassungen für beide Alterskategorien konnten einen sehr großen Teil der Varianz in der Bewegungszeit anhand des theoretischen (mindestens 95.0%) und effektiven Schwierigkeitsindex (mindestens 93.0%) aufklären, im Unterschied zu Experiment III jeweils über 90%. Die Bewegungszeiten beim absoluten Bedienkonzept folgen damit Fitts' Law - auch in der Doppelaufgabensituation. Die methodische Verbesserung hinsichtlich der Erfassung der Bewegungszeit (ohne Aufzeichnung der

Reaktionszeit) und die Verwendung einer (im Vergleich zu Experiment III) stärker kontrollierten Bedienungsaufgabe scheinen die Störvarianz verringert zu haben.

Entgegen den Befunden aus der Literatur (Ketcham et al., 2002; Ketcham & Stelmach, 2004; vgl. Abschnitt 1.2.10) unterschieden sich die Steigungsparameter für den theoretischen und effektiven Schwierigkeitsindex zwischen den Alterskategorien nicht. Es wäre bei älteren Probanden eine höhere Steigung zu erwarten gewesen als bei jüngeren Probanden. Eine mögliche Ursache könnte in der Bandbreite der getesteten Schwierigkeitsindizes liegen. Der Schwierigkeitsindex lag in der vorliegenden Untersuchung zwischen 1.22 und 3.25 bits. Nach der Empfehlung von Soukoreff und MacKenzie (2004) soll eine große und repräsentative Reihe von *ID*-Werten getestet werden. Dies war in der vorliegenden Studie aufgrund der im Fahrzeug begrenzten Anzeigefläche und der zur Bedienung nötigen und praktisch relevanten Tastengröße nur bedingt möglich. Es könnte daher vermutet werden, dass die schwierigsten Aufgaben der vorliegenden Untersuchung nicht schwierig genug waren, um sensitiv für Unterschiede in der Steigung zwischen den Alterskategorien zu sein.

Wie erwartet, waren ältere Probanden über alle Schwierigkeitsindizes langsamer als jüngere Probanden, benötigten also bei gleichem Präzisionslevel mehr Zeit. Dies zeigte sich erstens im signifikanten Unterschied bezüglich des Y-Achsenabschnitts. Da der Y-Achsenabschnitt jedoch außerhalb des beobachteten Datenbereichs lag, sollten entsprechende Unterschiede vorsichtig interpretiert werden (vgl. Soukoreff & MacKenzie, 2004). Zweitens wiesen jüngere Probanden einen deutlich höheren Durchsatz auf als ältere Probanden. Damit zeigt sich ein altersabhängiger Unterschied in der Effizienz des absoluten Bedienkonzepts.

Wie eingangs beschrieben, testeten Ketcham et al. (2002) den Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich bei älteren gegenüber jüngeren Probanden anhand des Fitts' Law Paradigmas genauer und betrachteten, ob Ältere generell langsamer sind oder besonders die Genauigkeits-Kontrolle oder die Geschwindigkeits-Kontrolle beeinträchtigt sind. Die Autoren konnten zeigen, dass sowohl Genauigkeits- als auch Geschwindigkeits-Kontrolle beeinträchtigt sind. Bei geforderter Genauigkeits-Kontrolle treten bei älteren verkürzte erste Subbewegungen und mehr korrektive Subbewegungen auf, wodurch die Bewegungszeit länger ist. Die Geschwindigkeits-Kontrolle ist insofern beeinträchtigt, dass bei älteren Probanden die Peak-Geschwindigkeit der Bewegung bei steigender Zielentfernung weniger erhöht wird als bei jüngeren Probanden (Ketcham et al., 2002). Die beobachtete, reduzierte Effizienz älterer Nutzer könnte auf diese Aspekte zurückgeführt werden.

Für die reduzierte Genauigkeits-Kontrolle könnte der in der vorliegenden Untersuchung beobachtete, altersabhängige Unterschied im Motoriktest (vgl. Abschnitt 6.2.7) sprechen: Ältere Probanden zeigen deutlich erhöhte Abweichungswerte verglichen zu jüngeren Probanden. Vermutlich ist daher ein Aspekt der langsameren Zielbewegung älterer Nutzer bei absoluter Touchpadbedienung, dass ihre Bewegungen aufgrund der reduzierten Bewegungsgenauigkeit häufiger korrigiert werden müssen. Ein weiterer Aspekt zur Erklärung der langsameren Zielbewegungen könnte in der Doppelaufgabensituation

liegen. Wie in den Ergebnissen zur Spuraabweichung beschrieben, zeigen Ältere stärkere Auswirkungen der Doppelaufgabensituation. Gegebenenfalls werden Zielbewegungen langsamer ausgeführt, um den erhöhten Ressourcenbedarf zu kompensieren.

Ein anderer Befund, der an dieser Stelle kurz aufgegriffen werden soll, ist der (verglichen zu den Empfehlungen von Soukoreff & MacKenzie, 2004) zu hohe Y-Achsenabschnitt bei älteren Probanden, sofern der theoretische Schwierigkeitsindex als Berechnungsbasis verwendet wurde. Ein ähnlicher Effekt trat bereits in Experiment III auf. Allerdings war in dieser Studie (im Gegensatz zu Experiment III) in der Aufzeichnung der Bewegungszeit keine Schwell- oder Reaktionszeit enthalten, sondern nur die reine Bewegungszeit. Eine weitere von Soukoreff und MacKenzie (2004) vermutete Ursache für einen erhöhten Y-Achsenabschnitt ist die Variabilität der Probanden in der Bewegungszeit. Die Standardabweichung der Bewegungszeit ist bei älteren ($M = 265$ ms, $SD = 86$ ms) tatsächlich signifikant höher als bei jüngeren ($M = 183$ ms, $SD = 60$ ms) Probanden ($t(266) = 9.56$, $p < 0.01$). Eine andere Begründung für den hohen Y-Achsenabschnitt könnte auch in den bereits beschriebenen veränderten Regelungsprozessen im Alter liegen. Nach Ketcham et al. (2002) weisen ältere Nutzer in Zielbewegungen eine geringere relative Distanz der ersten Subbewegung, eine höhere Anzahl Korrekturbewegungen und eine niedrigere Peak-Geschwindigkeit auf. Diese Veränderungen führen zu einer verlangsamten Zielbewegung. Entsprechend den Überlegungen von Welsh et al. (2007) könnte in der langsameren Zielbewegung älterer Nutzer des Weiteren eine Strategie vermutet werden, die Veränderung motorischer Fähigkeiten oder auch die in dieser Studie aufgezeigten, stärkeren Auswirkungen der Doppelaufgabensituation zu kompensieren.

Bedienvariante 2

Bedienvariante 2 schließt Überlegungen ein, Fitts' Law zu „schlagen“ (Balakrishnan, 2004; vgl. Abschnitt 1.2.6) und die Zielgröße auf der visuellen und motorischen Ebene zu entkoppeln (vgl. Blanch et al., 2004). Die Entkopplung von visueller und motorischer Ebene wird bei dieser Bedienvariante durch die Vergrößerung der motorischen Tastengröße, ohne Tastengröße und -entfernung visuell anzupassen, realisiert. Neben der potenziellen Steigerung der Leistungsfähigkeit des Nutzers wurde betrachtet, ob die Manipulation von Fitts' Law Erfolg hatte, das heißt, es tatsächlich umgangen werden konnte. Gleichzeitig soll diskutiert werden, ob distale Effekte (visuelle Ebene) oder proximale Effekte (motorische Ebene) für die Schwierigkeit der Aufgabe und die Leistungsfähigkeit der Nutzer entscheidend sind (vgl. Abschnitt 1.2.8, Werkzeuggebrauch als Transformation).

Bei der Modellanpassung von Fitts' Law anhand des Schwierigkeitsindex auf der visuellen Ebene zeigten sich auffällig geringe Varianzaufklärungen von maximal 18.3%. Außerdem war die errechnete Steigung nicht signifikant unterschiedlich von Null. Fitts' Law und die darin vorhergesagte Zunahme der Bewegungszeit mit zunehmender Schwierigkeit der Aufgabe scheint für Bedienvariante 2 damit nicht zu gelten, zumindest insofern der Schwierigkeitsindex der Aufgabe über Tastengrößen und -entfernungen auf der visuellen Ebene berechnet wird. Eine Berechnung des Modells für Bedienvariante 2

auf Grundlage von Tastengrößen und -entfernungen auf der motorischen Ebene macht allerdings keinen Sinn, da bei vier gitterförmig angeordneten Tasten nur zwei *ID*-Werte für eine Berechnung einer Regression zur Verfügung stehen würden. Die schlechte Modellpassung bei Bedienvariante 2 im Gegensatz zu Bedienvariante 1, wobei sich das grundlegende Bedienprinzip nicht geändert hat, gibt damit einen Hinweis darauf, dass es tatsächlich möglich ist, Fitts' Law zu umgehen (vgl. Abschnitt 1.2.6, Beating Fitts' Law). Die konzeptionelle Entkopplung von Zielgröße und -entfernung auf der motorischen und visuellen Ebene führt dazu, dass die visuellen Maße nicht länger zur sinnvollen Berechnung des Schwierigkeitsindex und damit zur Erklärung der Bewegungszeit verwendet werden können. Es lässt sich damit festhalten, dass die distalen Effekten (visuelle Ebene) in den beschriebenen Studien nicht entscheidend für die Schwierigkeit der Aufgabe waren. Aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit im Hinblick unterschiedlicher Schwierigkeitsindizes auf der motorischen Ebene, lässt sich die Rolle proximaler Effekte (motorische Ebene) nur über die effektiven Schwierigkeitsindizes annähern, allerdings nicht abschließend klären.

Wird der effektive Schwierigkeitsindex herangezogen, fällt auf den ersten Blick auf, dass die effektiven Werte (*Min* = 1.16 bits; *Max* = 1.90 bits) des Schwierigkeitsindex deutlich unterschiedlich zu den (aus Tastengröße und -entfernung auf der visuellen Ebene) vorhergesagten (*Min* = 1.22 bits; *Max* = 3.25 bits) waren und außerdem in einem geringeren Bereich streuten (vgl. Anhang, Tabelle 8-5). Damit ist die Generalisierbarkeit der Befunde auf andere Werte-Bereiche der Aufgabenschwierigkeit sehr eingeschränkt. Die geringe Spannweite des effektiven Schwierigkeitsindex könnte es außerdem erschweren, eine hinreichend große Varianzaufklärung durch das Modell zu erreichen. Tatsächlich lagen die ermittelten Varianzaufklärungen deutlich unter den Werten, die für das bisherige absolute Konzept erreicht wurden. Die großen Unterschiede zwischen effektiven und theoretischen Schwierigkeitsindizes weisen außerdem erneut darauf hin, dass eine Berechnung anhand Tastengröße und -entfernung auf der visuellen Ebene nicht sinnvoll ist, da die daraus vorhergesagte Schwierigkeit nur in sehr geringem Maße den effektiven Schwierigkeitsindex widerspiegelt.

Verglichen zur Modellierung über theoretische Schwierigkeitsindizes konnte die Varianzaufklärung auf Grundlage effektiver Schwierigkeitsindizes deutlich gesteigert werden⁴³. Die tatsächlichen Zielgrößen und -entfernungen auf der motorischen Ebene spielen damit eine größere Rolle für die Bewegungszeit als die distalen Kenngrößen auf der visuellen Ebene. Wie eingangs erwähnt, werden hinsichtlich der Rolle distaler und proximaler Handlungseffekte unterschiedliche Befunde berichtet (Blanch et al., 2004; Sutter et al., 2011a; Sutter et al., 2013). Die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse weisen eher darauf hin, dass proximale Handlungseffekte zur Handlungssteuerung genutzt werden und die Leistung der Zeigeaufgabe von der Schwierigkeit auf der motorischen Ebene abhängig ist. Nach Sutter et al. (2013) liegt generell eine Dominanz des distalen Handlungseffektes für die Bewegungssteuerung vor. Lediglich bei relativ komplexen oder bei offensichtlichen Transformationen wird diese Dominanz teilweise aufgehoben (Sutter et al., 2013). In der vorliegenden Arbeit handelte es sich zwar

⁴³ Die Varianzaufklärung lag dennoch nur im mittleren Bereich.

um eine relativ einfache Transformation, allerdings stimmten visuelles (distales) und propriozeptives (proximales) Feedback nur in geringem Maß überein. Des Weiteren wurde den Probanden in der Instrukionsphase zu Beginn des Versuchs die Funktionsweise des Bedienkonzepts genau erläutert. Eine Nutzung des proximalen Feedbacks führte in der vorliegenden Arbeit darüber hinaus zu einer effizienteren Aufgabenbearbeitung als die Nutzung von distalem Feedback. Aus diesen Gründen wird vermutet, dass die Probanden ihr Wissen über die vorliegende Transformation strategisch für eine effizientere Aufgabenbearbeitung eingesetzt und proximales Feedback für die Handlungskontrolle genutzt haben. Dies bietet einen Erklärungsansatz für die in dieser Arbeit festgestellte größere Bedeutung motorischer Kenngrößen für die Bewegungssteuerung.

Die Modellanpassungen für die beiden Alterskategorien, die auf korrigierten Zielgrößen und -entfernungen beruhten, waren in der Steigung tendenziell unterschiedlich: Ältere zeigten eine tendenziell höhere Steigung, so dass sich eine Erhöhung der Schwierigkeit der Bedienaufgabe auf ältere Probanden negativer auswirkte als auf jüngere Probanden. Diesem Befund entsprechend zeigten sich Unterschiede im Durchsatz: Jüngere Probanden ($M = 3.74$ bps, $SD = 1.47$ bps) wiesen einen signifikant höheren Durchsatz auf als ältere Probanden ($M = 2.63$ bps, $SD = 0.70$ bps). Analog zu den Ergebnissen zu Bedienvariante 1 zeigten jüngere Probanden damit eine höhere Effizienz bei Bedienvariante 2. Mögliche Ursachen für die reduzierte Effizienz älterer Probanden bei den absoluten Eingabemethoden wurden bereits im Zuge von Experiment I diskutiert.

Wie bereits erwähnt, wurde kein Vergleich des Durchsatzes zwischen den absoluten Bedienvarianten durchgeführt. Hintergrund ist, dass sich zwischen Bedienvariante 1 und 2 die effektiven Schwierigkeitsindizes sowohl bezogen auf die Spannweite als auch auf die Höhe unterscheiden und auch die Varianzaufklärung der Modellanpassungen deutlich unterschiedlich ist. Damit ist die Vergleichbarkeit des Durchsatzes zwischen den Bedienvarianten eingeschränkt. Es wurden daher nur Vergleiche des Durchsatzes zwischen den Alterskategorien innerhalb der Bedienvarianten durchgeführt.

Bedienvariante 3

Da eine Modellanpassung gemäß Fitts' Law für relative Bedienkonzepte nicht sinnvoll ist, wurde analog zum Ansatz von Card et al. (1978)⁴⁴ versucht, die Zeit der Zielnavigation bei den relativen Bedienkonzepten über die ideale, also minimale Anzahl an Wischgesten zu erklären.

Für Bedienvariante 3 zeigte sich in beiden Altersgruppen ein sehr enger Zusammenhang zwischen der Zeit der Zielnavigation und der idealen, minimalen Gestenanzahl. Beide Modellanpassungen zeigten eine sehr hohe Varianzaufklärung von über 99%. Dies spricht für eine äußerst konstante Bedienung und gleichmäßige Ausführung der Wischgesten. Die Linearität der Modellanpassung weist außerdem darauf hin, dass die einzelnen Wischgesten additiv auf eine zugrundeliegende Zeit der Bewegungsinitiierung wirken könnten.

⁴⁴ Card et al. (1978) zeigten, dass bei tastenbasierten, diskreten Eingabemethoden die Zeit der Positionierung des Cursors proportional zur idealen Anzahl an Tastendrücken ist (vgl. Abschnitt 1.2.5).

Wie bei den absoluten Bedienvarianten zeigte sich hierbei ein Alterseffekt. Jüngere Probanden zeigten einen geringeren Y-Achsenabschnitt und eine niedrigere Steigung als ältere Probanden. Damit wirkte sich bei älteren Probanden eine höhere, nötige Gestenanzahl stärker auf die Gesamtzeit der Zielnavigation aus. Dies erklärt auch den bereits erwähnten Effekt, dass ältere Probanden bei Bedienvariante 3 und diagonal liegenden Zielen überproportional mehr Bearbeitungszeit benötigen. Bei Bedienvariante 3 ist zur Erreichung diagonal liegender Ziele eine zusätzliche Wischgeste erforderlich. Da ältere Nutzer pro Wischgeste mehr Zeit benötigen, ist die Bearbeitungszeit bei älteren Nutzern bei diagonal entfernten Zielen überproportional größer. Jüngere Nutzer sind damit bei dieser Bedienvariante erneut effizienter als ältere Nutzer, insbesondere dann, wenn eine größere Anzahl von Bedienschritten zur Zielerreichung nötig ist. Im Umkehrschluss lässt sich daher empfehlen, dass besonders für ältere Nutzer die wichtigsten Menüinhalte über wenige Schritte bedienbar sind.

Zusammenfassend lässt sich für Bedienvariante 3 festhalten, dass der Ansatz von Card et al. (1978) für diskrete, tastenbasierte Eingabe eine gute Annäherung an die Erklärung der Zeit der Zielnavigation bietet - auch bei gestenbasierten, relativen Touch-Bedienkonzepten. Trotz methodischer Unterschiede (Untersuchung im Doppelaufgabenparadigma) konnte für Bedienvariante 3 eine sehr hohe Varianzaufklärung erreicht werden.

Bedienvariante 4

Auch für Bedienvariante 4 ließ sich in beiden Altersgruppen ein hoher Zusammenhang zwischen der Zeit der Zielnavigation und der idealen, also minimal nötigen Gestenanzahl feststellen. Beide Modellanspassungen zeigten eine sehr hohe Varianzaufklärung von über 85.6%, was für eine konstante Bedienung und gleichmäßige Ausführung der Wischgesten spricht. Verglichen zu Bedienvariante 3 war die Varianzaufklärung jedoch etwas niedriger. Eine mögliche Ursache könnte darin liegen, dass bei Bedienvariante 4 in manchen Aufgaben der Finger auf dem Touchpad umgesetzt werden musste, was Störvarianz erzeugt und die Varianzaufklärung verschlechtern könnte. Für Bedienvariante 3 sollte sich das Problem des Umsetzens auf alle Aufgaben gleichermaßen ausgewirkt haben, da hier der Finger nach jeder Geste angehoben und neu positioniert werden musste (vgl. Problem des Umsetzens, Abschnitt 1.1.6, Relatives Bedienkonzept). Dadurch entstand für Bedienvariante 3 durch das Umsetzen keine unterschiedliche Störvarianz zwischen den Aufgaben, so dass die Varianzaufklärung weniger beeinträchtigt wurde.

Es ließ sich wiederum ein Alterseffekt feststellen. Jüngere Probanden zeigten eine niedrigere Steigung als ältere Probanden. Damit wirkte sich bei jüngeren Probanden eine höhere, nötige Gestenanzahl weniger deutlich auf die Gesamtzeit der Zielnavigation aus als bei älteren Probanden. Insbesondere bei einer höheren Gestenanzahl sind jüngere Nutzer daher auch bei dieser Bedienvariante effizienter als ältere Nutzer.

Aufgrund der hohen Varianzaufklärung scheint der Ansatz von Card et al. (1978) für diskrete tastenbasierte Eingabe auch für die Erklärung der Zeit der Zielnavigation durch relative Wischgesten eine

gute Annäherung zu bieten, obwohl grundsätzliche konzeptionelle Unterschiede vorhanden sind (Problem des Umsetzens bei relativen Bedienkonzepten).

6.4.3 Vergleich der Bedienvarianten in den subjektiven Maßen

Wie eingangs erläutert, ist es bei der Gestaltung menschzentrierter Bedienumgebungen bedeutend, neben objektiven Maßen der Effektivität (zum Beispiel Bediengenauigkeit) und Effizienz (zum Beispiel Bearbeitungszeit) auch die Zufriedenstellung des Nutzers einzubeziehen (DIN EN ISO 9241-11, 1999). Die Zufriedenstellung kann anhand von Skalen subjektiv eingeschätzt werden. Alle drei genannten Aspekte sind für die Gebrauchstauglichkeit eines Systems entscheidend. Eine hohe Gebrauchstauglichkeit weist dabei diverse Vorteile auf, wie eine bessere Zugänglichkeit zum System, eine größere Produktivität der Nutzer und ein größerer kommerzieller Erfolg (DIN EN ISO 9241-210, 2011; vgl. Abschnitt 1.1.3).

Dieser Aspekt wird im vorliegenden Experiment berücksichtigt, indem die Bedienkonzepte neben der Betrachtung objektiver Maße (Bearbeitungszeit, relativer Fehler) auch hinsichtlich der Akzeptanz durch die Nutzer, die anhand einer ausgeweiteten Befragung erhoben wurde, gegenübergestellt werden. Dabei zeigt sich, dass Bedienvariante 1 im Vergleich zu Variante 2 als ablenkender und weniger unterbrechbar bewertet wird. Bedienvariante 3 schneidet in den subjektiven Daten generell sehr schlecht ab. Sie wird als langsamer eingestuft als die anderen drei Bedienvarianten. Im Vergleich zu Variante 2 und 4 gefällt sie den Probanden außerdem weniger, ist weniger intuitiv und macht weniger Spaß. Dementsprechend wird sie am häufigsten als schlechteste Variante benannt. Bedienvariante 4 wird insgesamt positiv bewertet: Sie gefällt den Probanden genauso gut, ist genauso intuitiv und macht genauso viel Spaß wie Variante 2. Die beiden Varianten werden am häufigsten als beste und am seltensten als schlechteste Varianten benannt.

In der im nächsten Abschnitt folgenden, gesamtheitlichen Bewertung der Bedienvarianten und der Ableitung von Empfehlungen werden diese Befunde berücksichtigt.

6.4.4 Empfehlungen

In einem zusammenfassenden Vergleich der Bedienvarianten, lässt sich für Variante 1 ähnlich zu den Experimenten I-III erneut ein hoher relativer Fehler feststellen, vor allem bei zunehmender Tastenentfernung. Auch hinsichtlich der Spurabweichung zeigt sich für Variante 1 eine Zunahme mit steigender Tastenentfernung. Bei großen Tasten oder einer hohen Tastenanzahl ist Variante 1 relativ schnell, bei wenigen, kleinen und weit entfernten Tasten führt Bedienvariante 1 allerdings zu deutlich längeren Bearbeitungszeiten als Variante 2. Bedienvariante 2 zeigt des Weiteren unabhängig von Tastengröße und -entfernung einen niedrigen und gleichbleibenden relativen Fehler.⁴⁵ Dementsprechend wird Bedienvariante 1 in den subjektiven Urteilen von den Nutzern als ablenkender und weniger unterbrechbar

⁴⁵ Bei einer großen Tastenanzahl weist Bedienvariante 2 jedoch ebenfalls eine erhöhte Fehlerhäufigkeit auf. Dies ist auf die bei hoher Tastenanzahl reduzierte Tastengröße auf der motorischen Ebene zurückzuführen.

als Variante 2 eingeschätzt. Gestaltungsaspekte können den Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich daher positiv beeinflussen. Eine Vergrößerung der Tastengröße auf der motorischen Ebene steigert die Leistungsfähigkeit des Nutzers deutlich - vor allem bei wenigen, (auf der visuellen Ebene) kleinen und weit entfernten Tasten. Insbesondere von Fitts' Law vorhergesagte, hohe Schwierigkeitsindizes lassen sich daher durch die Manipulation auf der motorischen Ebene (Bedienvariante 2) umgehen. Dies zeigt sich ebenfalls in den auftretenden Maximalwerten des effektiven Schwierigkeitsindex. Dieser liegt bei Bedienvariante 1 bei 4.09 bits, bei Bedienvariante 2 dagegen nur bei 1.90 bits (vgl. Anhang, Tabelle 8-4 und Tabelle 8-5). Auch hinsichtlich der Ablenkung in der Fahraufgabe ist die entkoppelt absolute Variante gegenüber der klassischen Variante zu bevorzugen.

Auf Grundlage der objektiven Daten lässt sich Bedienvariante 3 gemischt bewerten: Sie zeigt die längste Bearbeitungszeit von allen Varianten, die vor allem bei älteren Probanden überproportional erhöht ist. Die Bearbeitungszeit bleibt aber unabhängig von Tastengröße und -entfernung ungefähr konstant. Der relative Fehler ist bei dieser Variante in allen Bedingungen sehr gering. Auch die relative Häufigkeit von Umwegen ist sehr gering. In der Spurabweichung unterscheidet sich Variante 3 nicht von den anderen Bedienvarianten. Die Bedienung dauert also zwar länger als bei den anderen Varianten, dies scheint aber nicht zu einer Erhöhung des Ressourcenbedarfs oder der Ablenkung von der Primäraufgabe Fahren zu führen. Im Variantenvergleich schneidet diese Variante aufgrund der langen Bearbeitungszeiten und der negativen subjektiven Bewertung (hinsichtlich Gefallen, Intuitivität, Spaß, subjektive Schnelligkeit) insgesamt allerdings schlechter ab als die entkoppelt absolute Variante (Variante 2) und lässt sich daher nicht empfehlen.

Auf Grundlage der objektiven Daten ist Bedienvariante 4 ebenfalls gemischt zu bewerten. Trotz gesteigerter Fehlerhäufigkeit und Häufigkeit von Umwegen ist die Ablenkung in der Fahraufgabe nicht erhöht. Es zeigt sich sogar eine tendenziell geringere Spurabweichung als bei Bedienvariante 1. Gleichzeitig zeigen sich verhältnismäßig kurze Bearbeitungszeiten und positive subjektive Ergebnisse (zum Beispiel häufige Nennung als beste Variante). Dies lässt Bedienvariante 4 nur als geringfügig schlechter als die entkoppelt absolute Variante (Bedienvariante 2) erscheinen. Da Bedienvariante 4 verglichen zu Variante 2 wesentlich mehr Freiheitsgrade in der Gestaltung der Anzeige bietet und eine Ähnlichkeit zur Touchpadbedienung am Laptop aufweist, sollte dieser vielversprechende Ansatz trotz mancher Schwächen nicht direkt verworfen werden. Eine Möglichkeit, die Variante weiterzuentwickeln und Fehler und Umwege zu reduzieren, könnte beispielsweise eine Beschränkung der Wischrichtungen auf die zwei Hauptachsen sein.

7 Allgemeine Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss der Gestaltung von Bedieninteraktionen im Fahrzeug auf die sensomotorische Leistungsfähigkeit des Nutzers zu untersuchen. Aufgrund der eingangs beschriebenen, zunehmenden Funktionsanzahl, der damit einhergehenden Komplexität und außerdem der Doppelaufgabensituation beim Fahren ist es besonders bedeutsam, die Bedienung im Fahrzeug möglichst einfach und ablenkungsarm zu gestalten. Die Erhöhung der Funktionsanzahl führt außerdem zur Notwendigkeit neuartiger Anzeige- und Bedientechnologien, die flexibel auf verschiedene Inhalte angepasst werden können. Der Fokus dieser Arbeit wurde wegen der in der Einleitung beschriebenen Vorteile auf Touchpadbedienung und dabei insbesondere auf das absolute Bedienprinzip gelegt. Das absolute Bedienprinzip impliziert, dass Touchpad- und Anzeigefläche einander direkt zugeordnet sind. Die absolute Position des Bedienfingers auf dem Touchpad wird an der entsprechenden Position auf der Anzeige über einen Cursor repräsentiert, der sich kongruent zum Finger mitbewegt. Virtuelle Tasten auf der Anzeige werden bedient, indem der Cursor an der entsprechenden Stelle positioniert und daraufhin die Auswahl bestätigt wird. Das absolute Bedienkonzept sollte eine intuitive Bedienung ermöglichen, da ein vollständiges Mapping zwischen Anzeige und Bedienelement gegeben ist: Dieses Mapping erleichtert nach Norman (1988) die Entwicklung eines konzeptionellen Modells hinsichtlich der Funktionsweise eines Systems und kann daher zu einem unmittelbaren Systemverständnis und zu intuitiver Bedienbarkeit beitragen. Wie in Abschnitt 1.1.6 beschrieben, handelt es sich beim absoluten Bedienkonzept des Weiteren um eine sehr direkte Bedienung und eine äußerst flexibel einsetzbare Bedienvariante.

Absolute Bedienkonzepte beinhalten zum Großteil Zielbewegungen: Der Cursor, der den Finger repräsentiert, muss zu der gewünschten virtuellen Taste bewegt werden. Es wird angenommen, dass zur Bewegungskontrolle sowohl Closed-loop, also Regelung unter Nutzung von Feedback, als auch Open-loop Prozesse, also Vorprogrammierung von Bewegungssequenzen, eine Rolle spielen. Bei Zielbewegungen ist jeweils der Abgleich von Geschwindigkeit und Genauigkeit entscheidend. In der Literatur finden sich dafür verschiedene Modelle, die in der Einleitung diskutiert wurden. Die Überlegungen dazu haben zu Fitts' Law als relevantem Modell für diese Arbeit geführt. Fitts' Law nimmt einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen der Dauer einer Bewegung und der Schwierigkeit der entsprechenden Zielbewegung an, wobei sich die Schwierigkeit aus der Zielgröße und -entfernung berechnet (Fitts, 1992).

Nachdem in der vorliegenden Arbeit Fitts' Law auf die Bedienung während der Fahraufgabe angewendet werden soll, stellt sich die Frage nach dessen Gültigkeit in Doppelaufgabensituationen. Wenige Studien (Shehab & Schlegel, 1993; Schedlbauer, 2007; vgl. Abschnitt 1.2.5) beschäftigen sich mit Fitts' Law in Mehraufgabensituationen: Die gleichzeitige Ausführung mehrerer Aufgaben scheint die Varianzaufklärung der Bewegungszeit durch die Schwierigkeit einer Zielbewegung zwar zu reduzie-

ren, insgesamt weist die erzielte Varianzaufklärung (61%) jedoch darauf hin, dass Fitts' Law auch in Mehraufgabensituationen angewandt werden kann (Schedlbauer, 2007). Der Gültigkeit von Fitts' Law bei Sekundäraufgaben während der Fahraufgabe wurde bisher allerdings kaum Beachtung geschenkt.

Wie in der Einleitung erläutert, kann die Bedienaufgabe analog zu Werkzeugnutzung gesehen werden (vgl. Heuer, 1983): Die Zieltasten werden nicht mehr direkt angesteuert, sondern indirekt über einen Cursor. Dementsprechend findet eine sensomotorische Transformation statt. Die eigene Körperbewegung wird in die Bewegung des Werkzeugs übersetzt. Dabei müssen zusätzlich zur Körperbewegung in einem zweiten Regelkreis distale Handlungseffekte, also die Bewegung des Werkzeugs, geregelt werden (Müsseler & Sutter, 2012).

Touchpadbedienung stellt dabei eine einfache Transformation dar, weil sich manueller Pfad und Cursorpfad ähnlich sind, wenn auch räumlich verschoben (Sutter, 2007). Vergleicht man das absolute Touchpadbedienkonzept, bei dem die absolute Fingerposition auf dem Touchpad in die Cursorposition auf der Anzeige übersetzt wird, und das relative Touchpadbedienkonzept, bei dem die Bewegungsrichtung des Fingers in die Richtung der Cursorbewegung übersetzt wird, handelt es sich in beiden Fällen um eine einfache Transformation: Es finden nur eine Verschiebung der Bewegungsbahn und eine Verstärkung der Fingerbewegung statt (vgl. Heuer, 1983). Absolute Touchpadbedienkonzepte scheinen auch deshalb besonders einfach, weil die Verschiebung vorhersagbar sowie die Verstärkung konstant und bei ähnlichem Größenverhältnis von Touchpad zu Anzeige gering ist.

In der bisherigen Forschungslandschaft zeigen sich nur geringe Aktivitäten zur Untersuchung von Touchpadbedienung im Kontext Fahren - insbesondere bezogen auf absolute Bedieninteraktionen (vgl. Abschnitt 1.3.2). Hinsichtlich der Gestaltung der Touchpadskalierung und der Gestaltung von virtuellen Tasten auf der Anzeige sind aus der Literatur keine Erkenntnisse bezogen auf die Doppelaufgabensituation Fahren und Bedienen bekannt.⁴⁶ Daher war es die Absicht der ersten beiden Studien der vorliegenden Arbeit, für absolute Bedieninteraktionen im Kontext Fahren den Einfluss der Skalierung auf die sensomotorische Leistungsfähigkeit des Nutzers zu untersuchen. Experiment I konzentrierte sich auf die Skalierung der Anzeige, Experiment II auf die des Touchpads.

Wie außerdem in der Einleitung beschrieben, ist Flexibilität einer der Hauptvorteile der Touchpadbedienung. Beispielsweise besteht die Möglichkeit, das Bedienkonzept oder die sensomotorische Transformation jeweils auf die aktuelle Bedienaufgabe zu optimieren. Dabei ist allerdings fraglich, inwieweit der Nutzer in Bezug auf kognitive Flexibilität mit gemischten Konzepten umgehen kann oder ob dies zu Kosten in der sensomotorischen Leistungsfähigkeit führt. Hinweise auf mögliche Einbußen in der Effizienz der Bedienung durch gemischte Konzepte können Untersuchungen zu Aufgabenwechseln (vgl. Meiran, 2010) und den daraus entstehenden Wechselkosten liefern. Zur Klärung dieser Fra-

⁴⁶ Wie in Abschnitt 1.2.5 und 1.3 beschrieben, zeigen sich für Computerbedienung mit verschiedenen Bedienelementen mehr Forschungsaktivitäten, zum Beispiel hinsichtlich der Gestaltung möglicher Ziele. So konnten Sutter und Ziefle (2004) zeigen, dass sehr kleine Ziele bei Touchpadbedienung zu überproportionalen Leistungseinbußen führen.

ge wurde daher in den ersten beiden Studien der vorliegenden Arbeit das Wechselkostenparadigma auf wechselnde Anforderungen bezüglich der sensomotorischen Transformation übertragen und die Auswirkungen von Wechseln der visuellen und motorischen Verstärkung auf die Bedienleistung betrachtet.

Ein weiterer relevanter Aspekt bei Bedieninteraktionen, der in dieser Arbeit untersucht wurde, ist die Gestaltung von Bedienfeedback. Wie in der Einleitung erläutert, finden sich hierbei kontroverse Ergebnisse zu dessen Nutzung - abhängig von der Anzahl möglicher Ziele (Akamatsu et al., 1995; Cockburn & Brewster, 2005; vgl. Abschnitt 1.2.7). Hierbei sollte die Frage untersucht werden, welche Art von visuellem Bedienfeedback in einer Bediensituation mit unterschiedlichen Anzahlen möglicher Zieltasten den Nutzer am besten unterstützt. Eine Feedback-Möglichkeit bei Zielbewegungen stellt die Rückmeldung über das Erreichen der Zieltaste dar. Dies wurde in Experiment III über unterschiedliches Einfärben der jeweils aktivierbaren Taste realisiert und variiert.

Wie bereits erwähnt, basiert die absolute Bedienung auf Zielbewegungen. Um diese Zielbewegungen zu modellieren, wird in der vorliegenden Arbeit Fitts' Law herangezogen, da hiermit schnell ausgeführte Zielbewegungen unter Closed-loop Kontrolle erklärt werden können (vgl. Abschnitt 1.2.2 und 1.2.3). Hierbei wurde im ersten Schritt betrachtet, ob sich dieses tatsächlich als adäquates Modell für absolute Bedienung mit einem Touchpad als Bedienelement und außerdem in der Fahrsituation eignet. Im Hinblick auf die externe Validität des Experiments wurde dies anhand einer realistisch gestalteten Menübedienaufgabe getestet. Im zweiten Schritt wurde hinsichtlich der unterschiedlichen Feedbackvarianten betrachtet, ob diese zu unterschiedlicher Unterstützung der Zielbewegung führen, was sich in den einzelnen Anpassungen an Fitts' Law widerspiegeln sollte. Daneben wurde die Auswirkung von visuellem Feedback auf die effektive Zielbreite untersucht.

Experiment IV betrachtete die Passung von Fitts' Law mit einer verbesserten Methodik erneut. Die in den ersten Experimenten beobachtete Häufigkeit von Bedienfehlern warf darüber hinaus die Frage nach alternativen Bedienkonzepten auf. Hierbei wurde anhand einer reduzierten Bedienaufgabe ermittelt, welches Bedienkonzept zur besten sensomotorischen Leistung des Nutzers führte und außerdem die geringste Interferenz mit der Fahraufgabe zeigte.

Wie in der Einleitung erläutert, finden sich in der Literatur Ansätze, Fitts' Law zu umgehen (Balakrishnan, 2004; vgl. Abschnitt 1.2.6), indem auf der motorischen Ebene Zielgröße und -entfernung angepasst werden, ohne das generelle grafische Layout (visuelle Ebene) tatsächlich zu verändern. Eine untersuchte Bedienvariante griff diese Überlegung auf: Unter Beibehaltung des absoluten Bedienprinzips sollte durch Entkopplung von visueller und motorischer Ebene (vgl. Blanch et al., 2004) die Zielerreichung erleichtert werden, ohne Tastengröße und -entfernung visuell anzupassen. Die Ziele waren dementsprechend auf der motorischen Ebene näher und größer, als sie es auf der Anzeige (visuelle Ebene) schienen. Wie beim ursprünglichen absoluten Bedienkonzept lag bei dieser entkoppelt absoluten Variante als Transformation eine Verschiebung und Verstärkung (vgl. Heuer, 1983; Abschnitt

1.2.8) vor. Zu betrachten war einerseits, ob Fitts' Law tatsächlich „geschlagen“ werden kann und andererseits, ob distale Effekte (visuelle Ebene) oder proximale Effekte (motorische Ebene) für die Leistungsfähigkeit in der Bedienaufgabe entscheidend sind (Blanch et al., 2004; Sutter et al., 2011a; Sutter et al., 2013; vgl. Abschnitt 1.2.8).

Eine weitere Alternative zum ursprünglichen absoluten Bedienprinzip stellen relative Konzepte dar. Bei relativen Bedienkonzepten ist der Cursor unabhängig von der Fingerposition auf der Anzeige angeordnet und wird in Bewegungsrichtung des Fingers weiterbewegt. Die Transformation ist daher neben dem verwendeten Verstärkungsfaktor einerseits durch die Verschiebung aufgrund der räumlichen Trennung von Bedienung und Anzeige, andererseits durch die Verschiebung der Cursorposition auf der Anzeige gekennzeichnet (vgl. Abschnitt 1.2.8). Der Fokus wurde dabei auf die Betrachtung relativer, gestenbasierter Konzepte mit einem objektgebundenen Cursor⁴⁷ gelegt (vgl. Abschnitt 1.1.6 Cursorkonzepte). Durch die Objektbindung des Cursors sollte ermöglicht werden, dass ein geringeres Maß an Bedienpräzision erforderlich ist. Es wurde außerdem vermutet, dass die Basis der Bedienung auf Gesten zu einer besseren Unterbrechbarkeit und Blindbedienbarkeit in der Doppelaufgabensituation führen könnte, vor allem im Fall von diskreten Wischgesten. Da diese Bedienkonzepte allerdings nicht auf kontinuierlichen Zielbewegungen beruhen, ist eine Modellierung über Fitts' Law nicht sinnvoll. Stattdessen sollte ähnlich zur Vorhersage der Bearbeitungszeit bei diskreten Eingaben (Card et al., 1978; vgl. Abschnitt 1.2.5) versucht werden, die Zeit der Zielnavigation über die Anzahl an Bedienschritten zu modellieren.

Ein zentraler Aspekt für die Gestaltung effizienter Bedienung ist das Alter des Nutzers. Im Hinblick auf die demografische Entwicklung mit einer Zunahme älterer Fahrer ist eine altersgerechte Gestaltung der Bedieninteraktion unumgänglich. Wie eingangs erläutert, gehen mit zunehmendem Alter Veränderungen des sensomotorischen Systems einher (Rinkenauer, 2008; Ketcham & Stelmach, 2004). Auch das Erlernen von Transformationen unterscheidet sich zwischen jüngeren und älteren Nutzern (Hegele & Heuer, 2010; Heuer & Hegele, 2006). Des Weiteren zeigen sich zwischen älteren und jüngeren Nutzern Unterschiede im Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich von Zielbewegungen (Ketcham et al., 2002; Welsh et al., 2007). Insofern ist es kritisch zu betrachten, ob ältere Nutzer andere Anforderungen an die Skalierung von Touchpad und Anzeige haben als jüngere Nutzer. Auch im Hinblick auf die Flexibilität im Umgang mit den Bedienkonzepten sind Alterseffekte zu untersuchen. Gegebenenfalls könnten bei älteren Nutzern verstärkt negative Effekte bei Änderungen der sensomotorischen Transformation auftreten, also sich größere Wechsel- und Mischkosten zeigen, als bei jüngeren Nutzern. Bei der Betrachtung unterschiedlicher Bedienkonzepte stellt sich ebenfalls die Frage nach einer altersabhängigen Eignung.

⁴⁷ Ein objektgebundener Cursor wird diskret zwischen den aktivierbaren Inhalten der Anzeige bewegt.

7.1 Erkenntnisse dieser Arbeit

7.1.1 Alterseffekte

Ältere Probanden benötigen in der vorliegenden Arbeit für die Initiierung und Ausführung der Bedienung mehr Zeit, das heißt, es lässt sich eine generelle Verlangsamung in der Bedienung (vgl. *general slowing effect*; Bashore, 1994) feststellen. In den Fehlermaßen zeigen sich jedoch meist keine Altersunterschiede. Weiterhin lässt sich wie erwartet feststellen, dass ältere Probanden eine Tendenz zur genaueren Ausführung der Bedienung aufweisen (vgl. Experiment II): Sie betätigen die Zieltasten mit einer geringeren Abweichung zum Tastenmittelpunkt als jüngere Probanden. Die langsamere Bedienung bei gleicher Fehlerhäufigkeit und erhöhter Bediengenauigkeit könnte dafür sprechen, dass ältere ein anderes Niveau bezüglich des Geschwindigkeit-Genauigkeit-Abgleichs einnehmen als jüngere Probanden. Sie tendieren eher zu einer genaueren Bedienung auf Kosten der Bediengeschwindigkeit.

Auch in der Analyse der Zielbewegungen anhand von Fitts' Law sind ältere Probanden wie erwartet über alle Schwierigkeitsindizes langsamer als jüngere Probanden. Ketcham et al. (2002) beschreibt Veränderungen in der Zielbewegung älterer Nutzer, auf die dieser Effekt zurückgeführt werden könnte: Ältere legen in der ersten Subbewegung der Zielbewegung eine kürzere Distanz zurück und weisen weiterhin eine höhere Anzahl von Korrekturbewegungen sowie eine geringere Peak-Geschwindigkeit auf (Ketcham et al., 2002). Die veränderte Zielbewegung älterer Nutzer könnte dabei eine Strategie (vgl. Welsh et al., 2007) darstellen, Veränderungen motorischer Fähigkeiten zu kompensieren: Aufgrund von Veränderungen des Bewegungsapparates (vgl. Rinkenauer, 2008; Ketcham & Stelmach, 2004), die sich unter anderem in einer geringeren Bewegungsgenauigkeit niederschlagen, könnte die Aufgabenbearbeitung für Ältere erschwert sein. Für eine reduzierte Bewegungsgenauigkeit bei älteren Probanden könnte beispielsweise die beobachtete, signifikant geringere Leistung im Motoriktest sprechen. Um dies zu kompensieren, könnte von Älteren eine langsamere Bediengeschwindigkeit gewählt werden, so dass die Fehlerhäufigkeit nicht höher ist als bei jüngeren Probanden. Es lässt sich daher vermuten, dass ältere Probanden versuchen, ein bestimmtes Genauigkeitskriterium nicht zu unterschreiten, weshalb sie die Bediengeschwindigkeit entsprechend anpassen.

Entgegen zu Befunden aus der Literatur (Ketcham et al., 2002; Ketcham & Stelmach, 2004; vgl. Abschnitt 1.2.10) ließen sich bei der Betrachtung der Zielbewegungen in der Steigung der Modellanpassungen zwischen den Altersgruppen keine Unterschiede feststellen. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 7.2 diskutiert. Auf weitere Effekte hinsichtlich der Fitts' Law Modellanpassungen in Experiment IV wird in Abschnitt 7.1.7 eingegangen.

Neben der Verlangsamung der Bedienung ist eine erhöhte Spurabweichung in der Fahraufgabe ein weiterer, studienübergreifender Alterseffekt. Wie bereits erläutert, wurde diese als Kenngröße für die Ressourcenanforderung und Ablenkung erhoben (vgl. Theorie multipler Ressourcen; Wickens, 2008; Abschnitt 1.1.4). Als Erklärung der Altersunterschiede ließe sich vermuten, dass die Nebenaufgabe

Bedienen bei älteren Probanden mehr Ressourcen beansprucht⁴⁸, worauf auch die subjektive Beurteilung der Versuchsaufgabe und die geringere Leistung im Motoriktest hinweisen könnten. Wie beispielsweise Mattes und Hallén (2009) zeigen, führt eine höhere Anforderung von Ressourcen durch die Nebenaufgabe zu einer erhöhten Spurabweichung in der Fahraufgabe. Damit könnte man interpretieren, dass durch einen höheren Ressourcenbedarf der Bedienaufgabe bei älteren Probanden weniger Kapazität übrig bleibt, wodurch die Leistung in der Primäraufgabe Fahren verringert wird. Als andere Ursache für den Alterseffekt in der Spurabweichung ließe sich aber auch vermuten, dass ältere Probanden generell eine geringere Ressourcenkapazität zur Verfügung haben. Dadurch würde bei älteren Probanden bei gleicher Bedienaufgabe eine reduzierte Leistung in der Fahraufgabe auftreten. Einen zusätzlichen Erklärungsansatz könnte der Mechanismus der Ressourcenzuteilung⁴⁹ (Wickens, 2008) bieten: Die reduzierte Leistung in der Spurhaltung könnte für einen Fokus älterer Probanden auf die Ausführung der Bedienaufgabe sprechen, entgegen der Instruktion in den Experimenten dieser Arbeit, dass die Fahraufgabe die Primäraufgabe darstellt. Ältere könnten, wie bereits in ähnlicher Weise im Kontext der Bediengeschwindigkeit diskutiert, mehr Ressourcen in die Bedienung der Nebenaufgabe investieren, um trotz geringerer Bewegungsgenauigkeit im Alter (vgl. Ketcham & Stelmach, 2004) eine gleichbleibende Genauigkeit der Bedienung zu ermöglichen. Dies könnte sich neben der Bediengeschwindigkeit auch auf die Spurhaltung auswirken. Weitere alternative Gründe für die verringerte Leistung in der Fahraufgabe könnten auch in der geringeren Erfahrung Älterer mit simulierten Fahrumgebungen liegen oder darin, dass älteren Nutzern die Aufteilung oder der Wechsel der Aufmerksamkeit zwischen Fahr- und Bedienaufgabe schwerer fällt. Insgesamt spricht die schlechtere Spurhaltung älterer Probanden für eine erhöhte Ablenkung von der Fahraufgabe durch die Doppelaufgabensituation.

Neben einer generellen Verlangsamung der Bedienung sowie der geringeren Leistung in der Fahraufgabe zeigten sich teils Interaktionen zwischen dem Alter der Probanden und den untersuchten Faktoren: Bei der Betrachtung unterschiedlicher Bedienkonzepte in Experiment IV wiesen ältere Probanden beim absoluten Bedienkonzept verglichen zu den anderen Bedienkonzepten teils eine überproportional erhöhte Spurabweichung auf. Dies könnte auf eine erhöhte Ablenkung von der Fahraufgabe bei absoluter Bedienung hinweisen. Eine mögliche Ursache könnte darin vermutet werden, dass bei diesem Bedienkonzept (im Gegensatz zu den anderen Bedienkonzepten) kein objektgebundener Cursor verwendet wurde, weshalb bei kleineren Tastengrößen höhere Präzisionsanforderungen an den Nutzer bestehen. Im Einklang zu den Ergebnissen von Mattes und Hallén (2009) führt diese erhöhte Schwierigkeit der Bedienaufgabe zu einem erhöhten Ressourcenbedarf und damit auch zu größeren Leis-

⁴⁸ Effekt des Ressourcenbedarfs: Bei Zunahme der Schwierigkeit einer Aufgabe wird deren Ressourcenverbrauch erhöht, was in Mehraufgabensituationen zu Leistungseinbußen der gleichzeitig ausgeführten Aufgabe führt (Wickens, 2008).

⁴⁹ Weitere Aspekte der Ressourcenmodelle scheinen für die Erklärung der Altersunterschiede nicht geeignet: Die Überlappung von Ressourcen (Wickens, 2008) zwischen Primär- (Fahraufgabe) und Sekundäraufgabe (Bedienaufgabe) und eine zusätzlich zu vermutende strukturelle Interferenz (Kahneman, 1973) - sowohl Fahren als auch Bedienen beinhalten visuelle und manuelle Aufgabenkomponenten - sollten sich auf jüngere und ältere Probanden in ähnlicher Weise auswirken.

tungseinbußen in der Primäraufgabe. Ein Erklärungsansatz dafür, dass sich die erhöhte Genauigkeitsanforderung der Bedienaufgabe insbesondere auf ältere Probanden auswirkt, könnte wiederum in einer Abnahme der Bewegungsgenauigkeit im Alter vermutet werden.

Beim Vergleich der verschiedenen Bedienkonzepte ließ sich weiterhin feststellen, dass ältere Probanden beim diskreten, relativen Bedienkonzept überproportional mehr Zeit für die Bearbeitung der Aufgabe benötigten, vor allem bei diagonal entfernt liegenden Zielen. Dies führte zu der Annahme, dass ältere für jede Teilbewegung beziehungsweise Wischgeste mehr Zeit benötigen als jüngere Probanden. Dementsprechend würde sich bei älteren Probanden das diskrete, relative Konzept besonders auf die Bearbeitungszeit auswirken, da hierbei die Bedienung meistens in mehreren Schritten erfolgt - insbesondere bei diagonal liegenden Zielen. Dieser Vermutung entsprechend war bei Älteren (bei beiden relativen Bedienkonzepten) auch die Steigung in der Modellanpassung der Zeit der Zielnavigation über die Anzahl nötiger Bediengesten höher. Eine größere Anzahl von Teilbewegungen wirkt sich damit für ältere Nutzer stärker auf die Bearbeitungszeit aus.

Des Weiteren führte bei der Untersuchung von Skalierungseffekten der Anzeige bei älteren Probanden eine kleinere Anzeigefläche sowohl in der Eingabezeit als auch in der Leistung in der Fahraufgabe zu negativeren Effekten als bei jüngeren Probanden. Ältere Nutzer scheinen damit höhere Anforderungen an die Skalierung der Anzeige aufzuweisen. Zwischen der Skalierung des Touchpads und der Alterskategorie zeigten sich dagegen keine Interaktionen. Auch im Hinblick auf Wechsel- und Mischkosten ließen sich in den verschiedenen Maßen der sensomotorischen Leistungsfähigkeit keine verstärkten, negativen Effekte der Transformationsänderung für ältere Nutzer feststellen.

7.1.2 Skalierungseffekt von Anzeige und Touchpad

Sowohl die Skalierung der Anzeige als auch die Skalierung des Touchpads hat einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Nutzers: Bezogen auf die Skalierung der Anzeige legen die Befunde nahe, dass eine Änderung der Skalierung zu einer Verschiebung des Geschwindigkeits-Genauigkeits-Niveaus führt. Eine kleinere Skalierung der Anzeige scheint eine langsamere und subjektiv schwierigere Bedienung zu bewirken, ermöglicht allerdings gleichzeitig eine niedrigere Fehlerhäufigkeit. Dies könnte man so interpretieren, dass die Probanden bei kleiner Anzeigenskalierung aufgrund der erhöhten Präzisionsanforderungen auf der visuellen Ebene⁵⁰ den Fokus der Aufgabenbearbeitung auf eine genauere Bedienung legen, was sich wiederum negativ auf die Bediengeschwindigkeit auswirkt. Damit kann keine eindeutige Skalierungsempfehlung für die Anzeige abgeleitet werden. In der Leistung in der Primäraufgabe Fahren lassen sich keine Unterschiede abhängig von der Skalierung der Anzeige zeigen.

Die Skalierung des Touchpads wirkt sich beim absoluten Bedienkonzept ebenfalls auf die sensomotorische Leistungsfähigkeit des Nutzers aus: Ein kleineres Touchpad mit kleineren Abständen zwischen

⁵⁰ Die Bedieninteraktion auf der motorischen Ebene wurde durch die geänderte Skalierung der Anzeige nicht beeinflusst.

den Tasten (auf der motorischen Ebene) führt zu einer geringeren Bediengeschwindigkeit und -genauigkeit. Für die kleinsten untersuchten Touchpadskalierungen zeigt sich weiterhin ein negativer Effekt auf die Leistung in der Primäraufgabe Fahren. Im Einklang mit der Theorie multipler Ressourcen (vgl. Wickens, 2008) könnte man interpretieren, dass die Nebenaufgabe (Bedienen) auf den kleinsten Touchpadskalierungen aufgrund erhöhter Präzisionsanforderungen auf der motorischen Ebene mehr Ressourcen benötigt, wodurch die Leistung in der Primäraufgabe Fahren verringert wird. Ergänzend lässt sich auch in den subjektiven Urteilen der Probanden eine negativere Bewertung bei kleinerer Touchpadskalierung feststellen. Das obere Drittel der untersuchten Touchpadskalierungen weist jedoch in den meisten Vergleichen keine Unterschiede auf. Damit scheinen insbesondere die kleineren untersuchten Skalierungen des Touchpads Einbußen in der sensomotorischen Leistungsfähigkeit der Nutzer zu erzeugen. Bei der Ableitung einer Skalierungsempfehlung sind allerdings die Aspekte Anzahl möglicher Bedienfelder auf der Anzeige (die Tastaturaufgabe stellt hierbei einen Extremfall dar), Bedienkonzept und Dauer des Bedienblocks relevant (vgl. Abschnitt 4.4.5).

7.1.3 Wechselkosten bei Transformationsänderung

Durch den Wechsel der visuellen Skalierung entstehen Kosten in der Bediengeschwindigkeit (Eingabezeit) und -genauigkeit (Bedienweg auf der motorischen Ebene). Auch in der Leistung in der Fahraufgabe (Spurabweichung) lassen sich Kosten eines Wechsels der Anzeigeskalierung feststellen, die auf einen erhöhten Ressourcenbedarf durch die Bedienaufgabe nach einem Wechsel schließen lassen. Ein unerwarteter Wechsel der motorischen Skalierung führt ebenfalls zu Wechselkosten in der sensomotorischen Leistungsfähigkeit in Form einer geringeren Bediengeschwindigkeit (erhöhte Eingabezeit)⁵¹. Diese sind stärker ausgeprägt als nach einem Wechsel der visuellen Skalierung. Abhängig von der relativen Häufigkeit der Aufgabe treten die Wechseleffekte in der ersten Wiederholung oder in beiden Wiederholungen auf. Wie bereits in Abschnitt 4.4.2 diskutiert, könnte der Prozess der retroaktiven Anpassung (Meiran, 1996; Meiran, 2010) eine Erklärung dafür bieten, dass Wechseleffekte in weniger häufigen Aufgaben auch noch in der zweiten Wiederholung nachweisbar sind. Dieser Prozess beschreibt, dass sich das kognitive System auf die Ausführung einer Aufgabe optimiert. Diese Optimierung kann die Ausführung einer nachfolgenden Aufgabe behindern. Bei häufig durchgeführten Aufgaben könnte die Anpassung des kognitiven Systems gegebenenfalls weiter vorangeschritten sein und den Wechsel zu den seltenen Aufgaben damit länger behindern.

Beim Wechsel zur kleineren motorischen Skalierung lassen sich außerdem Wechselkosten in der Fehlerhäufigkeit zeigen. Bei großer motorischer Skalierung bleibt die Fehlerhäufigkeit dagegen über die Aufgaben annähernd konstant. Die Genauigkeitsanforderung der Bedienung könnte hierbei als Erklärung herangezogen werden. Bei einem Wechsel zu einer kleineren Skalierung steigt die geforderte Bediengenauigkeit durch kleinere Zieltasten auf der motorischen Ebene an. Bis das mentale Aufgaben-

⁵¹ Für den Wechsel der motorischen Skalierung spiegelten sich diese Kosten in der Bedienleistung allerdings nicht in der Primäraufgabe Fahren wider.

Set (Meiran, 2010) an die kleinere Skalierung angepasst ist, könnten daher vermehrt Fehler auftreten. Beim Wechsel zu einer größeren Touchpadskalierung werden die Genauigkeitsanforderungen dagegen reduziert, was einen Wechsel erleichtern könnte.

Zusammenfassend zeigen sich damit bei plötzlichen Veränderungen der sensomotorischen Transformation deutliche Einbußen in der Effizienz der Bedienung. Daher sollte die Skalierung von Anzeige und Touchpad innerhalb eines Menüs möglichst konstant gehalten werden. Eine Nutzung der Flexibilität von Touchpadbedienung durch gemischte Konzepte oder Verstärkungsfaktoren scheint nicht empfehlenswert.

Hervorzuheben ist hierbei, dass Wechselkosten in einer natürlich gestalteten Bediensituation während einer Doppelaufgabe nachgewiesen werden konnten. Ihre Höhe, insbesondere bezogen auf die beobachteten Eingabezeiten, könnte dabei für deren Bedeutsamkeit auch in der praktischen Anwendung sprechen. Damit erweist sich das aus der Grundlagenforschung übertragene Wechselkostenparadigma als sensitives Mittel, durch Transformationsänderung entstehende Kosten in der Leistungsfähigkeit des Nutzers nachzuweisen.

7.1.4 Mischkosten bei Transformationsänderung

Nach dem Wechselkostenparadigma ließe sich erwarten, dass die sensomotorische Leistungsfähigkeit des Nutzers in gemischten Blöcken, in denen Aufgabenwechsel stattfinden, verglichen zu nicht gemischten Blöcken (Baseline) reduziert ist. In dieser Arbeit lassen sich allerdings weder hinsichtlich der Nutzung verschiedener Skalierungen der Anzeige noch hinsichtlich verschiedener Skalierungen des Touchpads Mischkosten feststellen: Im Hinblick auf die motorische Skalierung zeigten sich keine Effekte des Bedienblocks, in Blöcken mit gemischter visueller Skalierung eher Mischgewinne gegenüber der Baseline. Würden keinerlei Effekte des Blocks auftreten, ließen sich die Ergebnisse durch die Annahme erklären, dass Wechsel der sensomotorischen Transformation nur lokale Kosten in der Folgeaufgabe verursachen, die generelle Bedienleistung im Block aber nicht verringern. Die erhöhte Bedienleistung in gemischten Blöcken steht den Vorhersagen des Wechselkostenparadigmas allerdings entgegen. Wie bereits erwähnt, ist eine mögliche Erklärung, dass die Bedienung in den kürzeren Baseline-Blöcken nicht mit den längeren gemischten Blöcken vergleichbar ist. Eine weitere mögliche Ursache könnte in Motivationseffekten der Probanden in den vermeintlich schwierigeren gemischten Blöcken liegen. Diese Effekte könnten das Auftreten von Mischkosten überdeckt haben.

7.1.5 Fitts' Law als Beurteilungsgrundlage verschiedener Feedbackvarianten

Wie eingangs erläutert, diente Fitts' Law in Experiment III als Grundlage, um die absolute Bedieninteraktion hinsichtlich der Unterstützung des Nutzers durch verschiedene visuelle Feedbackvarianten zu beurteilen. Obwohl eine prinzipielle Anwendbarkeit von Fitts' Law auf das absolute Bedienkonzept

gegeben scheint, da sich trotz methodischer Einschränkungen⁵² eine angemessene Varianzaufklärung durch die Modellanpassungen zeigte, ließen sich im Vergleich der Modellanpassungen der einzelnen Feedbackvarianten keine Unterschiede aufzeigen. Gemäß den Überlegungen von Akamatsu et al. (1995) könnte man daher interpretieren, dass Fitts' Law nicht sensitiv für Unterschiede zwischen den Feedbackvarianten ist, da sich die Varianten nur in der Endphase der Bewegung unterscheiden. Vermutlich wird die Zielbewegung an sich durch die grafische Rückmeldung der Zielerreichung nicht verändert. Stattdessen wurde in der vorliegenden Studie wie bei Akamatsu et al. (1995) die Zielgröße effizienter ausgenutzt, sofern deutliches Feedback (in Form eines dominanten Einfärbens der aktivierbaren Taste) über die Zielerreichung gegeben wurde. Damit scheint vom Nutzer in dieser Feedbackbedingung die geringste Bediengenaugigkeit gefordert zu werden. In den ergänzend erhobenen subjektiven Maßen zeigte sich, dass jede getestete Feedbackbedingung verglichen zu der Variante ohne zusätzliches Feedback als unterstützender eingeschätzt wird. Gleichzeitig weisen die Ergebnisse der Befragung auch darauf hin, das Einfärben der Taste gegenüber der verwendeten Visualisierung des Cursors nicht zu dominant zu gestalten.

7.1.6 Vergleich verschiedener Bedienkonzepte

In den ersten Experimenten wurde für das absolute Bedienkonzept eine hohe Fehlerrate festgestellt. Hohe Fehlerraten sind im Hinblick auf eine ablenkungsarme Bedienung im Fahrzeug negativ zu bewerten, da jeder Fehler zu einer Aufmerksamkeitsabwendung von der Fahraufgabe hin zur Bedienungsführung führt und die Aufgabendauer und damit die Ablenkung verlängert. Dies führte zum Vergleich des bisherigen absoluten Bedienkonzepts mit alternativen Bedienkonzepten.

In dieser Vergleichsstudie ließ sich für das absolute Bedienkonzept erneut eine große Fehleranfälligkeit feststellen, insbesondere bei zunehmender Tastenentfernung, was sich durch die gesteigerte Schwierigkeit der Zielbewegung bei größerer Tastenentfernung erklären lässt (vgl. Fitts' Law). Auch hinsichtlich der Eignung für die Fahraufgabe ließen sich für das absolute Bedienkonzept negative Effekte einer zunehmenden Tastenentfernung zeigen. Nach Fitts' Law wird die Aufgabe bei zunehmender Tastenentfernung schwieriger und sollte daher mehr Ressourcen erfordern (vgl. Theorie multipler Ressourcen; Wickens, 2008). Dieser Vermutung entsprechend ließ sich bei zunehmender Tastenentfernung ein Anstieg der Spurabweichung beobachten, der auf eine erhöhte Ablenkung von der Fahraufgabe hinweist. In Einklang dazu wird das Bedienkonzept in der subjektiven Bewertung der Probanden (verglichen zur entkoppelt absoluten Bedienvariante) als ablenkender und weniger unterbrechbar eingeschätzt.

Für die entkoppelt absolute Bedienvariante, die versucht, die Zielbewegung durch Entkopplung von visueller und motorischer Ebene zu erleichtern (vgl. Balakrishnan, 2004; Blanch et al., 2004), ließen

⁵² Mögliche Ursachen für eine etwas reduzierte Varianzaufklärung wurden im verwendeten Doppelaufgabenparadigma - Schedlbauer (2007) zeigte in der Doppelaufgabensituation eine reduzierte Varianzaufklärung (61 %) verglichen zur Varianzaufklärung in der reinen Bedienungsaufgabe (83 %) - und in der natürlich gestalteten Menüsituation vermutet.

sich einige Vorzüge verglichen zum ursprünglichen absoluten Konzept aufzeigen: Bei wenigen, (auf der visuellen Ebene) kleinen und weit entfernten Tasten ermöglicht die entkoppelte Variante deutlich kürzere Bearbeitungszeiten, das heißt, eine höhere Bediengeschwindigkeit. Außerdem weist das entkoppelt absolute Konzept unabhängig von Tastengröße und -entfernung auf der visuellen Ebene eine niedrige Fehlerhäufigkeit auf. Gestaltungsaspekte können den Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich daher positiv beeinflussen: Wie beabsichtigt, scheint das entkoppelte Konzept die Bedienung (insbesondere in nach Fitts' Law schwierigen Aufgaben) zu erleichtern und die sensomotorische Leistungsfähigkeit des Nutzers zu erhöhen. Die Bedienung bei der entkoppelt absoluten Variante scheint außerdem weniger Ressourcen zu benötigen, was sich in einer besseren Leistung in der Primäraufgabe Fahren verglichen zum ursprünglichen absoluten Bedienkonzept widerspiegelt und damit für eine bessere Eignung für die Fahrsituation spricht. Vervollständigt wird die positive Einschätzung der entkoppelt absoluten Bedienvariante durch eine gute subjektive Bewertung durch die Probanden.

Das diskrete relative Bedienkonzept lässt sich im Hinblick auf die sensomotorische Leistungsfähigkeit gemischt bewerten: Die Befunde weisen darauf hin, dass das Bedienkonzept eine hohe Bediengenauigkeit auf Kosten der Bediengeschwindigkeit fördert. Trotz erhöhter Bearbeitungszeiten lassen sich aber hinsichtlich des Ressourcenbedarfs durch die Bedienaufgabe beziehungsweise der Ablenkung von der Primäraufgabe Fahren keine Unterschiede zu den anderen getesteten Bedienkonzepten feststellen. Bezüglich der Akzeptanz durch die Probanden schneidet das Konzept allerdings sehr schlecht ab.

Auch das kontinuierlich relative Konzept ist bezüglich der sensomotorischen Leistungsfähigkeit und der Eignung für die Fahraufgabe gemischt zu bewerten. Zwar zeigten sich meist relativ kurze Bearbeitungszeiten und keine erhöhte Ablenkung in der Fahraufgabe, allerdings war die relative Häufigkeit von Fehlern und Umwegen erhöht. Um dies zu optimieren, könnte beispielsweise versucht werden, die Variante durch eine Beschränkung der Wischrichtungen auf die zwei Hauptachsen weiterzuentwickeln. Die subjektive Bewertung des Bedienkonzepts durch die Probanden stellt sich wiederum positiv dar. Des Weiteren weist das Bedienkonzept auch praktische Vorteile in der Anwendung auf, zum Beispiel bietet es mehr Freiheitsgrade in der Gestaltung der Anzeige verglichen zur entkoppelt absoluten Variante.

Zusammenfassend scheinen damit im Gesamtbild der sensomotorischen Leistungsfähigkeit, Eignung für die Fahraufgabe und Akzeptanz durch die Nutzer zwei Bedienkonzepte empfehlenswert: Das entkoppelt absolute Bedienkonzept sowie - nach Verbesserung zu Gunsten der Bediensicherheit - das kontinuierlich relative Bedienkonzept.

7.1.7 Erklärung der Bearbeitungszeit abhängig vom Eingabekonzept

Wie eingangs erläutert, beinhalten absolute Bedienkonzepte zum Großteil Zielbewegungen. Auch bei relativen Konzepten stellt die Navigation zum Ziel einen großen Teil der Aufgabenbearbeitung dar. Eine Modellierung dieser Bewegungszeit (vgl. Fitts' Law) beziehungsweise Zeit zur Zielnavigation

(vgl. Ansatz von Card et al., 1978) über Parameter der Aufgabe (Zielgröße, -entfernung, nötige Gestenanzahl) bietet daher einen Ansatzpunkt für die Erklärung der Bearbeitungszeit.

Für das absolute Bedienkonzept können die Modellanpassungen gemäß Fitts' Law für beide Alterskategorien einen sehr großen Teil der Varianz in der Bewegungszeit anhand des theoretischen und effektiven Schwierigkeitsindex aufklären. Die sehr hohe Varianzaufklärung legt nahe, dass Fitts' Law auch im Kontext absoluter Touchpadbedienung während der Fahraufgabe Geltung findet. Damit scheinen schwierigere Zielbewegungen (weiter entfernte oder kleinere Ziele) wie erwartet höhere Bewegungs- und damit auch Bearbeitungszeiten⁵³ zu erzeugen. Jüngere Probanden weisen in Bezug auf Fitts' Law einen signifikant höheren Durchsatz auf als ältere Probanden. Es zeigt sich damit ein altersabhängiger Unterschied in der Effizienz des absoluten Bedienkonzepts. Die altersabhängigen Unterschiede im Motoriktest, also die erhöhten Abweichungswerte älterer Probanden, könnten ebenfalls im Sinne einer generell niedrigeren sensomotorischen Leistungsfähigkeit älterer Nutzer bei absoluter Touchpadbedienung interpretiert werden (vgl. Abschnitt 6.2.7).

Für das entkoppelt absolute Bedienkonzept zeigen sich in den Modellanpassungen basierend auf distalen Kenngrößen (Tastengrößen und -entfernungen auf der visuellen Ebene) nur sehr geringe Varianzaufklärungen. Des Weiteren ist die errechnete Steigung der Modellanpassungen nicht signifikant unterschiedlich von Null. Dies spricht einerseits für eine erfolgreiche Manipulation von Fitts' Law durch Entkopplung der motorischen und visuellen Ebene. Andererseits wird durch diese Befunde deutlich, dass die distalen Handlungseffekte (visuelle Ebene) beim entkoppelt absoluten Bedienkonzept weniger entscheidend für die Schwierigkeit der Zielbewegung sind und zur Erklärung der Bewegungszeit nicht verwendet werden können. In den Modellanpassungen basierend auf effektiven Schwierigkeitsindizes konnte die Varianzaufklärung deutlich gesteigert werden. Dies gibt einen Hinweis darauf, dass in dieser Arbeit die motorischen Kenngrößen eine größere Rolle für die Bewegungszeit spielen als die visuellen, distalen Kenngrößen. Nach den Befunden von Sutter et al. (2013) liegt für die Bewegungssteuerung dagegen generell eine Dominanz des distalen Handlungseffektes vor. Bei einer Dominanz distaler Effekte hätte man erwartet, dass die Bewegungszeit dem auf der visuellen Ebene vorliegenden Schwierigkeitsindex folgt. Nach Sutter et al. (2013) wird diese Dominanz distaler Handlungseffekte lediglich bei relativ komplexen oder bei sehr deutlichen Transformationen, bei denen visuelles und propriozeptives Feedback kaum übereinstimmen, aufgehoben. Wie in Abschnitt 6.4.2 diskutiert, bieten daher folgende Aspekte einen Erklärungsansatz für die in dieser Arbeit festgestellte größere Bedeutung motorischer Kenngrößen für die Bewegungssteuerung: Bei der untersuchten Bedienvariante stimmen visuelles (distales) und propriozeptives (proximales) Feedback nur in geringem Maß überein, das heißt, es liegt eine sehr deutliche Transformation vor. Außerdem wurde den Probanden die Funktionsweise der Bedienvariante zu Versuchsbeginn genau erläutert, sie verfügten also über explizites Wissen über die Funktionsweise der Transformation. Da es bei der untersuchten Bedienvariante für die Aufgabenbearbeitung effizient ist, die Zielgrößen und -entfernungen auf der motorischen Ebene

⁵³ Dies ließ sich für das absolute Bedienkonzept auch in den Analysen der Bearbeitungszeit beobachten.

für die Handlungskontrolle zu nutzen, könnten die Probanden ihr Wissen über die Transformation bewusst und strategisch eingesetzt haben: Sie könnten ihre Aufmerksamkeit darauf gerichtet haben, die Bewegungen ihrer Hand, nicht die Bewegungen des Cursors auf der Anzeige zu steuern. Man könnte vermuten, dass dadurch im vorliegenden Experiment die distalen Kenngrößen nicht zur Erklärung der Bewegungszeit genutzt werden können.

Wie in den Befunden für die klassisch absolute Bedienvariante zeigen sich auch für die entkoppelt absolute Bedienvariante Unterschiede zwischen den Altersgruppen. Diese treten sowohl in der Steigung⁵⁴ als auch im Durchsatz auf. Auch für das entkoppelt absolute Bedienkonzept zeigen ältere Nutzer daher eine geringere Effizienz bei der Eingabe, die erneut auf eine niedrigere sensomotorische Leistungsfähigkeit älterer Nutzer bei absoluter Touchpadbedienung zurückgeführt werden könnte.

Bei den relativen Bedienkonzepten sollte die Bearbeitungszeit über die nötige Anzahl an Bedienschritten angenähert werden. Für beide untersuchten relativen Bedienkonzepte zeigt sich in den Modellanpassungen eine sehr hohe Varianzaufklärung beziehungsweise ein sehr enger Zusammenhang zwischen der Zeit der Zielnavigation und der idealen, minimalen Gestenanzahl. Dies spricht für eine äußerst konstante Bedienung und gleichmäßige Ausführung der Wischgesten. Der Ansatz von Card et al. (1978) für diskrete, tastenbasierte Eingabe bietet damit trotz methodischer (beispielsweise Doppelaufgabensituation) und grundsätzlicher konzeptioneller Unterschiede (beispielsweise Problem des Umsetzens) eine gute Annäherung an die Erklärung der Zeit der Zielnavigation bei gestenbasierten, relativen Touch-Bedienkonzepten. Damit lässt sich anhand der ermittelten Regressionsgleichungen die nötige Zeit der Zielnavigation in einer Aufgabe, in welcher die zur Zielerreichung benötigte Gestenanzahl bekannt ist, sehr gut vorhersagen.

Wie bei den absoluten Bedienvarianten zeigt sich bei den Modellanpassungen der relativen Bedienkonzepte ein Alterseffekt, der bereits in Abschnitt 7.1.1 diskutiert wurde: Bei älteren Probanden scheint sich eine größere Anzahl von Teilbewegungen stärker auf die Zeit der Zielnavigation auszuwirken.

Aus diesen Befunden hinsichtlich der Effizienz der verschiedenen Eingabemethoden lassen sich Empfehlungen für die Gestaltung von Menüsituationen ableiten, die in Abschnitt 7.4 ausgeführt werden.

7.2 Integration der Ergebnisse

Wie eingangs erläutert, sollten in dieser Arbeit mittels einer menschenzentrierten Vorgehensweise Gestaltungsempfehlungen für Touchpadbedienung im Fahrzeug abgeleitet werden. Dazu wurde der Nutzungskontext in der Doppelaufgabensituation Fahren beschrieben und in der Evaluation berücksichtigt, verschiedene Gestaltungslösungen entworfen und verglichen und der Nutzer in die Bewertung einbezogen. Des Weiteren wurden verschiedene Maße der Gebrauchstauglichkeit erfasst.

⁵⁴ Eine Erhöhung der Schwierigkeit der Bedienaufgabe wirkt sich bei älteren Probanden stärker auf die Bewegungszeit aus als bei jüngere Probanden.

Generell erweist sich die Bedienung eines Menüs über ein Touchpad als ein vielversprechendes Konzept. Neben allgemeinen Aspekten hinsichtlich Flexibilität, Einfachheit und Mapping zwischen Anzeige und Bedienelement, zeigen sich Potentiale abhängig vom konkret eingesetzten Bedienkonzept. Die beiden absoluten Konzepte werden in den vorliegenden Studien von den Probanden als einfach, intuitiv und schnell eingeschätzt. Als Vorzüge der diskreten, relativen Variante sind ihre Unterbrechbarkeit und die geringe Anzahl von Bedienfehlern zu bewerten. Vorteile der kontinuierlich relativen Bedienvariante sehen die Nutzer in der Ähnlichkeit zu Laptop-Bedienkonzepten und im erlebten Bedienspaß (vgl. Abschnitt 6.3.7). Ein direkter Vergleich zu einem klassischen, zentralen Bedienelement im Fahrzeug wie dem Dreh-Drück-Steller wurde allerdings nicht durchgeführt.

Alterseffekte sind hinsichtlich der Bedienbarkeit besonders bedeutsam. Ältere Probanden bedienen in den vorliegenden Studien langsamer als jüngere, was durch eine erhöhte Reaktions- und Bewegungszeit begründet werden könnte und in Abschnitt 7.1.1 detaillierter diskutiert wurde. Im Abgleich von Geschwindigkeit und Genauigkeit lässt sich allerdings festhalten, dass ältere Probanden in den beschriebenen Experimenten nicht mehr Fehler machen. Ältere Probanden scheinen ihren Bedienfokus daher auf eine Erhaltung der Bediengenauigkeit zu legen, wobei die Bediengeschwindigkeit reduziert wird. Diese Befunde stehen im Einklang mit den in der Literatur beschriebenen Effekten (für eine Übersicht siehe Rinkeauer, 2008).

Daneben zeigen sich langsamere Zielbewegungen bei älteren Nutzern (siehe Experiment IV). Im Gegensatz zu den von Ketcham und Stelmach (2004) beschriebenen Effekten lässt sich allerdings für die klassische absolute Bedienvariante keine höhere Steigung in den für die älteren Nutzer aufgestellten Fitts' Law Modellanpassungen zeigen. Einzig für das entkoppelt absolute Konzept findet sich ein tendenzieller Unterschied, wobei hier die generelle Modellpassung nicht optimal ist. Gegebenenfalls zeigt sich ein größerer Alterseffekt bei schwierigeren Zielaufgaben erst ab einem gewissen Wert des Schwierigkeitsindex. In der vorliegenden Studie war die zu untersuchende Bandbreite an Schwierigkeitsindizes aufgrund der im Fahrzeug begrenzten Anzeigefläche und der zur Bedienung nötigen und praktisch relevanten Tastengröße eingeschränkt. Dies könnte zur Erklärung des fehlenden Altersunterschiedes in der Steigung der Regressionsgeraden herangezogen werden. Wie erwähnt, zeigt sich für ältere Nutzer aber dennoch eine geringere Effizienz bei dieser Eingabemethode, die sich im reduzierten Durchsatz älterer Probanden niederschlägt.

Analog zu den Modellen der Bewegungskontrolle und einem kombinierten Ansatz von Open-loop und Closed-loop Prozessen bei Zielbewegungen stellt sich allerdings die Frage, ob die initiale Bewegungsphase, die Korrekturphase oder beide Phasen bei älteren Nutzern langsamer ablaufen. Theoretisch könnten beide Phasen im Alter betroffen sein, die initiale Phase von der generell erhöhten Bewegungszeit, die Korrekturphase von der im Alter erhöhten Variabilität der Bewegungsendpunkte, die verstärkt Korrekturen erfordert (eine Übersicht über altersabhängige Veränderungen des sensomotorischen Systems bieten Rinkeauer, 2008 oder Ketcham & Stelmach, 2004). Auch die Befunde von Ketcham et al. (2002) weisen darauf hin, dass sich die Komponenten der Zielbewegung zwischen ältere-

ren und jüngeren Probanden unterscheiden und beide Phasen der Zielbewegung betroffen sein können. Erstens zeigen ältere Nutzer kürzere erste Subbewegungen und geringere Peak-Geschwindigkeiten, die der initialen Bewegungsphase zugeordnet werden können. Zweitens ist die Korrekturphase von einer erhöhten Anzahl von Korrekturbewegungen geprägt (Ketcham et al., 2002). Da in der vorliegenden Arbeit keine Bewegungstrajektorie aufgezeichnet wurde, konnte dies für den Kontext absoluter Touchpadbedienung allerdings nicht untersucht und daher nicht repliziert werden.

Bezüglich des Wechsels der sensomotorischen Transformation hinsichtlich der Skalierung von Anzeige und Touchpad zeigen sich keine Interaktionen mit dem Alter. In der Literatur werden Effekte berichtet, dass ältere hinsichtlich expliziten, strategischen Anpassungen an Transformationen und beim Erlernen von nichtlinearen Transformationen beziehungsweise schwierigen Transformationen beeinträchtigt sind (Hegele & Heuer, 2010; Heuer & Hegele, 2006). Vermutlich können in dieser Arbeit Unterschiede zwischen den untersuchten Altersgruppen hinsichtlich des expliziten Wissens über die vorliegende Transformation beziehungsweise die Änderung der Transformation ausgeschlossen werden, da sowohl die Funktionsweise der Bedienkonzepte als auch das Auftreten von Wechseln der Skalierung detailliert instruiert wurden. Dies könnte begünstigen, dass ältere Nutzer ähnliche Gegenstrategien als Reaktion auf den Wechsel der Skalierung verwenden wie jüngere Nutzer. Als Alternativerklärung für das Fehlen von Alterseffekten beim Wechsel der Skalierung ließe sich anführen, dass die Anpassung an den Wechsel implizit erfolgt (implizite Prozesse bei Anwendung von Transformationen sind bei älteren Nutzern weniger betroffen; Hegele & Heuer, 2010). Des Weiteren könnte vermutet werden, dass die Transformation als reine Verstärkung beziehungsweise deren Wechsel generell und auch für ältere Nutzer nicht allzu schwierig ist, so dass sich keine Unterschiede zwischen den Altersgruppen im Umgang mit Skalierungswechseln ergeben.

Ein Kernaspekt der vorliegenden Arbeit war die Anwendung von Fitts' Law auf absolute Touchpadbedienung. Hinsichtlich der Skalierung von Anzeige oder Bedienelement postuliert Fitts' Law allerdings Invarianz. Die Schwierigkeit der Zielerreichung hängt lediglich vom Verhältnis aus Zielentfernung und -breite ab und so lange das Verhältnis konstant ist, bleibt auch die Schwierigkeit konstant. Dem entgegengesetzt berichten einige Autoren allerdings Leistungseinbußen bei kleinen Zielen, das heißt, eine Erhöhung der Zielbreite verbessert die Leistung mehr als eine Reduzierung der Zielentfernung. So identifizierten beispielsweise Chapuis und Dragicevic (2011) 1 - 4 mm auf der Anzeige (bei einer Distanz von 70 cm von Auge zu Anzeige) und 0.1 - 0.2 mm auf der motorischen Ebene als kritische Schwelle für die Bedienung mit einer Computermaus. Sutter und Ziefle (2004) konnten für Touchpad und Trackpoint zeigen, dass der errechnete Schwierigkeitsindex bei Zielen unter 5 mm die Schwierigkeit der Zielaufgabe unterschätzt und raten zu einer Vermeidung entsprechender Zielgrößen. Entsprechend dieser Studien lassen sich auch in der vorliegenden Arbeit Skalierungseffekte nachweisen, obwohl das Verhältnis aus Zielbreite und -entfernung konstant blieb. Eine größere Skalierung der Anzeige und größere Tasten auf der visuellen Ebene zeigen kürzere Eingabezeiten und eine subjektiv weniger schwierige Bedienung, führen allerdings zu einer erhöhten relativen Fehlerhäufigkeit. Inso-

fern liegt für die Anzeige neben einem reinen Skalierungseffekt eine Verschiebung des Geschwindigkeits-Genauigkeits-Niveaus vor. Bezogen auf das Bedienelement führt ein größeres Touchpad mit größeren Abständen zwischen den Tasten zu einer besseren Leistung. Die Ergebnisse legen hierbei nahe, dass der Tastenabstand mindestens 5.5 mm betragen sollte, was in der vorliegenden Studie einer Tastenbreite von 4.8 mm entspricht. Insofern liegt die ermittelte Skalierungsempfehlung für das Touchpad und die virtuellen Tasten in einem zu den Ergebnissen von Sutter und Ziefle (2004) ähnlichen Bereich. Der Nachweis von Skalierungseffekten spricht insofern auch gegen die von Fitts' Law postulierte Skalierungsinvarianz. Stattdessen zeigen die vorliegenden Studien eine nicht vorhergesagte Zunahme der Bedienschwierigkeit bei kleinen Zielen.

Eine weitere zentrale Frage dieser Arbeit war die Nutzbarkeit der Flexibilität von Touchpadbedienumgebungen in Bezug auf sensomotorische Transformationen. Zur Untersuchung von negativen Effekten von Transformationsänderungen wurde das Wechselkostenparadigma, das in der Grundlagenforschung zur Untersuchung von Aufgabenwechseln verwendet wird, auf die Bediensituation mit unterschiedlichen Skalierungen übertragen. Tatsächlich erwies sich das Paradigma als geeignet, Wechselkosten aufzuzeigen. Sowohl für die Anzeige als auch für das Touchpad ließen sich Wechselkosten in Form längerer Eingabezeiten, teils auch längerer Bedienwege, einer größeren Fehlerhäufigkeit oder erhöhten Spurabweichung in der Fahraufgabe feststellen. Damit lässt sich festhalten, dass die Skalierung innerhalb eines Menüs und die sensomotorische Transformation bei absoluter Touchpadbedienung konstant gehalten werden sollte.

Wie des Weiteren in dieser Arbeit gezeigt werden konnte, lässt sich Fitts' Law für die Beschreibung von Bedienbewegungen in Doppelaufgabensituationen heranziehen. Im Unterschied zu bisherigen Studien (Shehab & Schlegel, 1993; Schedlbauer, 2007) konnten trotz Doppelaufgabe Varianzaufklärungen von über 90% erreicht werden (vgl. Abschnitt 1.2.5). Die hohen Varianzaufklärungen sprechen außerdem dafür, dass Zielbewegungen eine gute Annäherung an das absolute Bedienprinzip bieten. Laut Schedlbauer (2007) wirkt die Doppelaufgabensituation additiv auf die Fitts' Law Gerade. Da die Bedienung in der vorliegenden Arbeit allerdings nicht separat (ohne Fahraufgabe) getestet wurde, kann dieser Befund nicht verifiziert werden. Gegebenenfalls liegt in diesem Effekt allerdings eine weitere Begründung, weshalb sich in einigen Bedingungen der Fitts' Law Modellanpassungen ein zu hoher Y-Achsenabschnitt feststellen lässt. Erhöhte Achsenabschnitte könnten mit der Belastung der Ressourcen durch die Doppelaufgabensituation (vgl. Wickens, 2008) in Zusammenhang stehen. Durch die gleichzeitige Fahraufgabe stehen weniger Ressourcen für die Bedienaufgabe zur Verfügung, wodurch die Zielbewegung länger dauern könnte als in einer Situation ohne Parallelaufgabe. Beispielsweise überschneiden sich Fahr- und Bedienaufgabe hinsichtlich der genutzten Informationsverarbeitungsstufe⁵⁵, so dass die Leistung bei gleichzeitiger Ausführung reduziert wird (Wickens, 2008). Möglicherweise ist die Zielbewegung in einer Doppelaufgabensituation auch deswegen verlangsamt,

⁵⁵ Beide Aufgaben beinhalten sowohl perzeptuelle und kognitive Komponenten sowie eine Handlungsauswahl und -ausführung.

da die Korrekturphase der Zielbewegung länger dauert, weil sie durch den nötigen Wechsel der Aufmerksamkeit zwischen beiden gleichzeitigen Aufgaben erschwert wird. Dies ließe sich eher als ein Aspekt der Ressourcenzuteilung (vgl. Wickens, 2008) charakterisieren.

Als weiterer Aspekt absoluter Touchpadbedienung wurde in dieser Arbeit untersucht, welche Art von visuellem Bedienfeedback zur Unterstützung des Nutzers eingesetzt werden kann. Feedback veränderte analog zu den Ergebnissen von Akamatsu et al. (1995) (vgl. Abschnitt 1.2.7) nicht die Fitts' Law Modellanpassung für die Zielbewegung. In der Untersuchung von Akamatsu et al. (1995) wurden fünf Feedbackbedingungen bei einer multimodalen Maus verglichen: Normal, akustisch (Ton bei Zielerreichung), farblich (Helligkeitsänderung des Ziels bei Zielerreichung), taktil und eine Kombination dieser Feedbackvarianten. Ähnlich zu den Ergebnissen dieser Arbeit zeigten sich keine Unterschiede in den Bearbeitungszeiten und im Durchsatz, sondern nur in der Zeit der finalen Positionierung (Zeit zwischen Zielerreichung und -bestätigung). In den Ergebnissen dieser Arbeit ließen sich ebenfalls nur Effekte für die Phase der Zielbestätigung zeigen: Visuelles Feedback in Form des Einfärbens einer aktivierbaren Taste führte zu einer Vergrößerung der effektiv (von den Probanden) genutzten Zielfläche. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Cockburn und Brewster (2005) scheint das Feedback die Nutzer auch auf dicht belegten Anzeigen nicht negativ zu beeinflussen. Cockburn und Brewster (2005) untersuchten allerdings akustisches, taktilen und pseudohaptisches Feedback, was deutlicher ist und die Nutzer daher auf dicht belegten Anzeigen stärker stören könnte als visuelles Feedback. Die Befunde der vorliegenden Arbeit legen daher zusammenfassend nahe, dass visuelles Feedback den Nutzer auch auf dicht belegten Anzeigeflächen in der Bedienung unterstützt, sich aber nur auf die Phase der Zielbestätigung, nicht auf die Bewegung zum Ziel auswirkt.

Hinsichtlich der sensomotorischen Transformation wurde erwartet, dass absolute Konzepte aufgrund der Vorhersagbarkeit der Verschiebung zwischen Bewegung und Anzeige die einfachste Bedienvariante darstellen (vgl. Abschnitt 1.2.8). Die Ergebnisse der vorliegenden Studien stellen jedoch die Probleme dieser Variante, insbesondere die größere Fehleranfälligkeit heraus. Relative Konzepte scheinen für die Fahrsituation besser geeignet zu sein, da der Cursor liegen bleibt und somit die Bedienung unterbrechbar ist. Die von den Nutzern positiv bewertete, kontinuierliche Bedienvariante weist allerdings noch Schwächen hinsichtlich der Bediengenauigkeit auf. Wie bereits erwähnt, könnte dies durch konzeptuelle Änderungen wie eine weniger sensitive Übersetzung der Weglänge (auf der motorischen Ebene) in Gesten oder eine Beschränkung der möglichen Bewegungsrichtung des Cursors auf die beiden Hauptachsen optimiert werden. Dabei bleibt allerdings zu prüfen, ob die positive Bewertung des Konzepts erhalten werden kann. Die Zeit zur Erreichung eines Bewegungsziels kann bei relativen Konzepten nicht über Fitts' Law modelliert werden: Die relative Bedienung basiert erstens nicht auf Zielbewegungen im engeren Sinne, sondern eher auf Bewegungen in die entsprechende Zielrichtung, zweitens wurde die relative Bedienung in dieser Arbeit im Hinblick auf die Bedienpräzision gestenbasiert ausgelegt. Für diskrete Eingabemethoden stellten Card et al. (1978) einen vielversprechenden Ansatz vor (vgl. Abschnitt 1.2.5): Für tastenbasierte Eingabe konnten sie die Positionierungs-

zeit des Cursors über die nötige Anzahl von Eingabeschritten vorhersagen. In dieser Arbeit wurde versucht, eine Analogie zwischen tastenbasierter Eingabe und gestenbasierten, relativen Touchkonzepten zu ziehen. Eine Erklärung der Zeit, zur Zieltaste zu navigieren, war über die nötige Anzahl an Wischgesten sehr gut möglich. Gerade für die diskrete Variante zeigt sich ein annähernd linearer Zusammenhang. Bei der wegabhängigen Bedienvariante ist die Varianzaufklärung zwar etwas geringer, aber dennoch lässt sich festhalten, dass die Bediengesten äußerst konstant ausgeführt werden und insofern der Eingabe über Navigationstasten ähnlich sind.

Alternativ stellte sich das entkoppelt absolute Konzept als besonders vielversprechend dar, weil die Genauigkeitsanforderung an den Nutzer hierbei reduziert wurde. Die Überlegungen, Fitts' Law zu umgehen (vgl. Balakrishnan, 2004; Abschnitt 1.2.6), lassen sich damit auf das Fahrzeugsetting und die realistische Menügestaltung übertragen. Auf dicht belegten Anzeigen sind die Vorzüge der Bedienvariante ähnlich vielen anderen Beating Fitts' Law-Methoden (vgl. Abschnitt 1.2.6) allerdings geringer. Ähnlich zu der Methode von Blanch et al. (2004) wurden die motorische und visuelle Ebene entkoppelt, um die Zielgröße auf der motorischen Ebene zu maximieren und Präzisionsanforderungen zu minimieren.

Die Leistung in der Bedienaufgabe hängt für das entkoppelt absolute Konzept dabei eher von der Schwierigkeit der Zielbewegung auf der motorischen Ebene ab. Wie bereits erläutert, wird in der Literatur hinsichtlich der Rolle distaler (visueller) und proximaler (propriozeptiver) Handlungseffekte dagegen meist eine Dominanz distaler Handlungseffekte festgestellt (Sutter et al., 2013). In Abschnitt 6.4.2 wurde bereits diskutiert, dass in der vorliegenden Arbeit die Probanden ihr Wissen über die vorliegende Transformation vermutlich strategisch für eine effizientere Aufgabenbearbeitung eingesetzt und daher proximales Feedback für die Handlungskontrolle genutzt haben, was die in dieser Arbeit größere Bedeutung motorischer Kenngrößen für die Bewegungssteuerung erklären könnte.

Gegen die Nutzung des distalen Feedbacks spricht auch die verwendete visuelle Repräsentation: In der vorliegenden Arbeit wird für das entkoppelt absolute Bedienkonzept ein objektgebundener Cursor eingesetzt, der diskret zwischen den möglichen Zieltasten bewegt wird. Dieser vermittelt eine sehr reduzierte Information über den Schwierigkeitsindex auf der visuellen Ebene, da bei Berührung des Touchpads unabhängig von der visuellen Tastengröße immer eine Taste aktivierbar ist. Durch das diskrete Bewegen wird außerdem ein verfälschter Eindruck der Entfernung auf der visuellen Ebene suggeriert, da der Cursor über die Leerbereiche springt. Durch die Bewegungseigenschaften des Cursors wird damit gegebenenfalls eine Transformation vermittelt, bei der die visuelle Ebene in Richtung der motorischen Ebene verzerrt wird: Aufgrund der Eigenschaften des Cursors scheinen die Tasten für den Nutzer maximal groß zu sein und direkt nebeneinander zu liegen. Daher könnte man interpretieren, dass die Bewegungszeiten den proximalen Effekten (also der Bewegung der Hand) folgen, weil die Probanden einerseits um die vorliegende Transformation wissen und die Transformation andererseits über die Cursorbewegung auch entsprechend visuell (unabhängig von der grafischen Zielgröße und -entfernung) veranschaulicht wird.

7.3 Offene Fragen und zukünftige Forschung

Ein Aspekt, der in dieser Arbeit nicht geklärt werden kann, ist die Art der Prozesse, die an der Bewegungssteuerung beteiligt sind. Nach Heuer und Hegele (2006) sind bei der Anpassung an neue, sensorische Transformationen zu Beginn Closed-loop Prozesse, also eine Regelung unter Nutzung von Feedback, dann Open-loop Prozesse, also Vorprogrammierung von Bewegungen unter Nutzung eines internen Modells, involviert. Zusätzlich sind strategische Bewegungsänderungen möglich. Ein Ansatz, dies zu untersuchen, wäre die Betrachtung von Blickdaten. Visuelles Feedback sollte bei Closed-loop Kontrolle während der Bewegung stärker genutzt werden als bei Open-loop Kontrolle. Eine weitere Möglichkeit, die zu Grunde liegenden Prozesse zu untersuchen, ist die Trajektorie der Bewegung. Unter Closed-loop Kontrolle sollten beispielsweise häufiger Korrekturbewegungen auftreten als bei Open-loop Kontrolle. Hierbei wäre interessant, ob die beschriebenen Phasen auch in der Anpassung an die Touchpad-Transformation auftreten.

Des Weiteren konnte aufgrund der fehlenden Aufzeichnung von Blickdaten nicht untersucht werden, ob die getesteten Bedienkonzepte in unterschiedlichem Ausmaß zu visueller Ablenkung führen. Es lässt sich lediglich vermuten, dass beispielsweise das diskrete relative Bedienkonzept aufgrund seiner Kontrollierbarkeit und Unterbrechbarkeit wenig visuelle Aufmerksamkeit erfordert. Dies könnte ein interessanter Ansatz für weitere Forschung sein.

Entgegen den Erwartungen ließen sich bei der Betrachtung von Skalierungswechseln keine Mischkosten feststellen, was auf methodische Aspekte zurückgeführt werden könnte. Als Erklärung ist denkbar, dass die länger dauernden Blöcke gemischter Bedienung zu einem besseren Bedienfluss des Nutzers geführt haben könnten. Die Baseline-Blöcke waren mit jeweils zehn Aufgaben sehr kurz ausgeführt. Zur dedizierten Untersuchung von Mischkosten könnte daher das Setting dahingehend modifiziert werden, dass sich Baseline und Mischblöcke in ihrer Anzahl getesteter Aufgaben ähnlicher sind.

Zu Gunsten der externen Validität wurden zur Untersuchung der Zielbewegungen nicht die in der DIN EN ISO 9241-9 (2002) beziehungsweise die von Soukoreff und MacKenzie (2004) empfohlenen, standardisierten Testaufgaben verwendet. Außerdem konnte nur eine geringere Bandbreite an Schwierigkeitsindizes getestet werden, da Einschränkungen bezüglich denkbarer Anzeige- und Touchpadflächen im Fahrzeug berücksichtigt wurden. Dies kann allerdings wegen einer geringen Übertragbarkeit auf andere Bereiche des Schwierigkeitsindex und einer damit eingeschränkten Vorhersagbarkeit entsprechender Bewegungszeiten kritisch bewertet werden. Außerdem ergibt sich durch die eingeschränkte Bandbreite an getesteten Schwierigkeitsindizes eine geringere Vergleichbarkeit zu anderen Studien.

Als weiterer Ansatz für zukünftige Forschung wäre die Optimierung des absoluten Bedienkonzepts durch zusätzlichen Einsatz von haptischem Feedback denkbar. Spies et al. (2011) konnten beispielsweise sehr vielversprechende Ergebnisse für die Kombination des absoluten Bedienkonzepts mit hap-

tischem Feedback zeigen: Die Spurabweichung und visuelle Ablenkung waren geringer als bei einem normalen Touchpad. Eine haptische Unterstützung der absoluten Bedienung hätte die in dieser Arbeit festgestellten Probleme wie die erhöhte Fehlerhäufigkeit vielleicht reduzieren können und zu ähnlich positiven Befunden wie die alternativ betrachteten Konzepte führen können. Daneben werden in der Literatur auch andere Optimierungen der Touchpadbedienung durch neuartige Hardware beschrieben: So könnte die Zielbewegung beispielsweise durch einen veränderten Reibungskoeffizienten (vgl. Casiez, Roussel, Vanbellegem, & Giraud, 2011; Lévesque et al., 2011) erleichtert werden. Technisch wird dabei der Reibungskoeffizient der Touchpad-Oberfläche durch einen Luftfilm, der durch Vibrationen erzeugt wird, verändert. Eine erhöhte Reibung auf Zielen kann als taktiles Feedback genutzt werden und die Unterscheidbarkeit von Hintergrund und Zielobjekten verbessern. Dies könnte ähnlich zum Einfärben der aktivierbaren Taste die Zielerreichung verdeutlichen. Insofern ist ein derartiger Vergleich der Hardware-Optimierung des absoluten Bedienkonzepts mit den in dieser Arbeit entwickelten, alternativen Bedienkonzepten in zukünftigen Studien wünschenswert.

In der Literatur werden auch Möglichkeiten beschrieben, relative Bedienkonzepte durch neuartige Hardware zu erweitern. Es werden Techniken angeführt, die die Touchpadbedienung mit einem Kraftsensor im Touchpad-Rahmen kombinieren (vgl. Casiez et al., 2007; Kulik, Kunert, Huckauf, & Froehlich, 2012). Durch diese Konzepte kann das sonst bei relativen Bedienkonzepten nötige Umsetzen der Hand vermieden werden: Neben der Bedienbewegung auf der Touchpadfläche verschiebt auch ein Druck gegen den Kraftsensor den Cursor. So muss ein Bedienvorgang, der mit einer Bedienbewegung auf der Touchpadfläche begonnen wurde, bei Erreichen der Touchpad-Begrenzung (bevor das Ziel erreicht wurde) nicht unterbrochen werden, sondern kann durch das Ausüben von Druck auf den Touchpad-Rahmen abgeschlossen werden. Es wäre für zukünftige Forschung interessant, ob sich eine entsprechende Erweiterung der Hardware positiv auf relative Touchpadbedienung auswirken kann.

In Bezug auf die vorliegende Arbeit ist sehr positiv festzuhalten, dass das Wechselkostenparadigma aus der Grundlagenforschung auch auf die praktische Anwendung der Menübedienung übertragen werden konnte. Auch der Nachweis der Eignung von Fitts' Law für das absolute Bedienkonzept in der Doppelaufgabensituation ist gelungen. Neben einer Erklärung der empirischen Bewegungszeiten können die Ergebnisse daher ebenfalls genutzt werden, die Dauer von Bedienaufgaben vorherzusagen. Auch die Bediendauern bei relativen Eingabemethoden lassen sich laut den Ergebnissen der Arbeit gut vorhersagen. Dies kann in zukünftigen Konzeptphasen bei der Entwicklung und Gestaltung von Menüs und der entsprechenden Anzeige und Bedienung sehr hilfreich sein.

7.4 Empfehlungen für die Gestaltung von Touchpadbedienung im Fahrzeug

Aus den vorliegenden Studien lassen sich einige Gestaltungsempfehlungen für Touchpadbedienung im Fahrzeug ableiten:

- Ältere Nutzer benötigten bei diskreten, gestenbasierten Eingaben pro Wischgeste mehr Zeit als jüngere, das heißt, die Bearbeitungszeit steigt bei älteren mit Zunahme der Schrittzahl stärker an (kumulativer Effekt der Einzelbewegungen). Für ältere Nutzer ist es daher besonders vorteilhaft, wenn insbesondere die wichtigsten Menüinhalte über wenige Schritte bedient werden können.
- Ältere Nutzer zeigen generell eine langsamere Bedienung und eine höhere Spurabweichung in der Fahraufgabe, wobei aber nur selten eine höhere Fehlerhäufigkeit in der Bedienung auftritt. Es zeigen sich kaum Interaktionen zu den untersuchten Gestaltungsaspekten, so dass ältere keine andersartigen Anforderungen an die Bedienbarkeit stellen als jüngere Nutzer.
- Eine größere Skalierung der Anzeige zeigt kürzere Eingabezeiten und eine subjektiv weniger schwierige Bedienung, führt allerdings zu einer erhöhten relativen Fehlerhäufigkeit. Hinsichtlich der Skalierung der Anzeige lässt sich aufgrund der Verschiebung des Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleichs daher keine eindeutige Empfehlung ableiten.
- Ein Touchpad für die absolute Bedieninteraktion sollte einen Tastenabstand von mindestens 5.5 mm und eine Tastenbreite von mindestens 4.8 mm ermöglichen (die Werte beziehen sich auf Tastenmaße auf der motorischen Ebene). Die Verwendung einer extrem großen Touchpadskalierung ist allerdings aufgrund des geringeren Bedienkomforts bei langen Bedienwegen nicht empfehlenswert.
- Wechsel der visuellen oder motorischen Skalierung beziehungsweise der sensomotorischen Transformation erzeugen deutliche Kosten in der Bedienleistung. Bei der Menügestaltung empfiehlt es sich daher, entsprechende Wechsel zu vermeiden.
- Für die Dauer der Bewegungszeit bei absoluten Bedieninteraktionen gilt Fitts' Law. Um eine möglichst einfache Bedienung zu gewährleisten, sollten in der Menügestaltung dementsprechend hohe Zielentfernungen oder geringe Zielbreiten vermieden werden.
- Das Erreichen einer aktivierbaren Taste kann über ein farbliches Highlight rückgemeldet werden. Dies erhöht die effektiv genutzte Zielgröße und führt zu einer subjektiven Erleichterung der Bedienung. In Bezug auf das Nutzererleben empfiehlt es sich allerdings, das Feedback nicht zu auffällig zu gestalten.
- Absolute Bedieninteraktionen stellen hohe Anforderungen an die Bedienpräzision und erzeugen in der Doppelaufgabesituation eine hohe Fehlerhäufigkeit. Sie können durch Einsatz neuer

Hardware-Technologien optimiert werden, wobei eine genaue Gestaltung hierbei noch zu prüfen ist. Alternativ ist eine konzeptseitige Weiterentwicklung durch Entkopplung von visueller und motorischer Ebene erfolgversprechend (vgl. entkoppelt absolutes Bedienkonzept).

- Relative Bedienkonzepte scheinen ebenfalls vielversprechend. Kontinuierliche Konzepte sind hierbei aufgrund des Nutzererlebens gegenüber diskreten Konzepten zu bevorzugen. Es ist allerdings empfehlenswert, ihre Gestaltung zu Gunsten der Bediensicherheit weitergehend zu optimieren.

Literaturverzeichnis

- Akamatsu, M., & MacKenzie, I. S. (2002). Changes in applied force to a touchpad during pointing tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 29 (3), 171-182.
- Akamatsu, M., MacKenzie, I. S., & Hasbroucq, T. (1995). A Comparison of Tactile, Auditory, and Visual Feedback in a Pointing Task Using a Mouse-Type Device. *Ergonomics*, 38 (4), 816-827.
- Armbrüster, C., Sutter, C., & Ziefle, M. (2007). Notebook input devices put to the age test: the usability of trackpoint and touchpad for middle-aged adults. *Ergonomics*, 50 (3), 426-445.
- Balakrishnan, R. (2004). "Beating" Fitts' law: virtual enhancements for pointing facilitation. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61 (6), 857-874.
- Bashore, T. R. (1994). Some thoughts on neurocognitive slowing. *Acta Psychologica*, 86, 295-325.
- Bernardin, B. J., & Mason, A. H. (2011). Bimanual coordination affects motor task switching. *Experimental Brain Research*, 215 (3-4), 257-267.
- Blanch, R., Guiard, Y., & Beaudouin-Lafon, M. (2004). Semantic Pointing: Improving Target Acquisition with Control-Display Ratio Adaptation. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 519-526). New York, NY: ACM.
- Burnett, G. E., Millen, L., Lawson, G., & Pickering, C. (2010). Investigating design issues for the use of touchpad technology within vehicles. *Advances in Transportation Studies, Special 2010*, 19-32.
- Card, S. K., English, W. K., & Burr, B. J. (1978). Evaluation of Mouse, Rate-Controlled Isometric Joystick, Step Keys, and Text Keys for Text Selection on a CRT. *Ergonomics*, 21 (8), 601-613.
- Carlton, L. G. (1994). The Effects of Temporal-Precision and Time-Minimization Constraints on the Spatial and Temporal Accuracy of Aimed Hand Movements. *Journal of Motor Behavior*, 26 (1), 43-50.
- Carroll, J. M., & Olson, J. R. (1987). *Mental Models in Human-Computer Interaction: Research Issues About What the User of Software Knows*. Washington, DC: National Academy Press.
- Casiez, G., Roussel, N., Vanbelleghem, R., & Giraud, F. (2011). Surfpad: Riding Towards Targets on a Squeeze Film Effect. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 2491-2500). New York, NY: ACM.
- Casiez, G., Vogel, D., Balakrishnan, R., & Cockburn, A. (2008). The Impact of Control-Display Gain on User Performance in Pointing Tasks. *Human-Computer Interaction*, 23 (3), 215-250.
- Casiez, G., Vogel, D., Pan, Q., & Chaillou, C. (2007). RubberEdge: Reducing Clutching by Combining Position and Rate Control with Elastic Feedback. In *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (pp. 129-138). New York, NY: ACM.
- Chapuis, O., & Dragicevic, P. (2011). Effects of Motor Scale, Visual Scale and Quantization on Small Target Acquisition Difficulty. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 18 (3), 13:01-13:32.
- Chapuis, O., Labrune, J.-B., & Pietriga, E. (2009). DynaSpot: Speed-Dependent Area Cursor. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1391-1400). New York, NY: ACM.
- Cockburn, A., & Brewster, S. (2005). Multimodal feedback for the acquisition of small targets. *Ergonomics*, 48 (9), 1129-1150.
- Crossman, E. R. F. W., & Goodeve, P. J. (1983). Feedback control of hand-movement and Fitts' law. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology*, 35 (2), 251-278.
- DIN EN ISO 9241-11 (1999). *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit - Leitsätze*. Berlin, Deutschland: Beuth.

- DIN EN ISO 9241-12 (2000). *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 12: Informationsdarstellung*. Berlin, Deutschland: Beuth.
- DIN EN ISO 9241-9 (2002). *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 9: Anforderungen an Eingabemittel - ausgenommen Tastaturen*. Berlin, Deutschland: Beuth.
- DIN EN ISO 9241-110 (2008). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung*. Berlin, Deutschland: Beuth.
- DIN EN ISO 9241-210 (2011). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*. Berlin, Deutschland: Beuth.
- Dingus, T. A., Hanowski, R. J., & Klauer, S. G. (2011). Estimating Crash Risk. *Ergonomics in Design: The Quarterly of Human Factors Applications*, 19 (4), 8-12.
- Donders, F. C. (1969). On the Speed of Mental Processes. *Acta Psychologica*, 30, 412-431.
- Fitts, P. M. (1992). The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement. *Journal of Experimental Psychology: General*, 121 (3), 262-269.
- Fitts, P. M., & Seeger, C. M. (1953). S-R Compatibility: Spatial Characteristics of Stimulus and Response Codes. *Journal of Experimental Psychology*, 46 (3), 199-210.
- González, I. E., Wobbrock, J. O., Chau, D. H., Faulring, A., & Myers, B. A. (2007). Eyes on the Road, Hands on the Wheel: Thumb-based Interaction Techniques for Input on Steering Wheels. In *Proceedings of Graphics Interface 2007* (pp. 95-102). New York, NY: ACM.
- Graf, S., Spiessl, W., Schmidt, A., Winter, A., & Rigoll, G. (2008). In-car Interaction using Search-Based User Interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1685-1688). New York, NY: ACM.
- Grossman, T., & Balakrishnan, R. (2005). The Bubble Cursor: Enhancing Target Acquisition by Dynamic Resizing of the Cursor's Activation Area. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 281-290). New York, NY: ACM.
- Guiard, Y., Blanch, R., & Beaudouin-Lafon, M. (2004). Object Pointing: A Complement to Bitmap Pointing in GUIs. In *Proceedings of Graphics Interface 2004* (pp. 9-16). Waterloo, Kanada: Canadian Human-Computer Communications Society.
- Hegele, M., & Heuer, H. (2010). Adaptation to a direction-dependent visuomotor gain in the young and elderly. *Psychological Research*, 74 (1), 21-34.
- Hertzum, M., & Hornbæk, K. (2010). How Age Affects Pointing with Mouse and Touchpad: A Comparison of Young, Adult, and Elderly Users. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 26 (7), 703-734.
- Heuer, H. (1983). *Bewegungslernen*. Stuttgart, Deutschland: Kohlhammer.
- Heuer, H. (2010). Wahrnehmung und Arbeitshandeln. In U. Kleinbeck & K.-H. Schmidt (Eds.), *Arbeitspsychologie* (pp. 177-214). Göttingen, Deutschland: Hogrefe.
- Heuer, H., & Hegele, M. (2006). Bewegungen mit indirekter Sicht im Altersverlauf. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 60 (4), 221-229.
- Hommel, B., & Nattkemper, D. (2011). *Handlungspsychologie: Planung und Kontrolle intentionalen Handelns*. Berlin, Deutschland: Springer.
- Horrey, W. J., Wickens, C. D., & Consalus, K. P. (2006). Modeling Drivers' Visual Attention Allocation While Interacting With In-Vehicle Technologies. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 12 (2), 67-78.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Kamp, J.-F., Marin-Lamellet, C., Forzy, J.-F., & Causeur, D. (2001). HMI Aspects of the Usability of Internet Services with an In-Car Terminal on a Driving Simulator. *IATSS Research*, 25 (2), 29-39.
- Kamp, J.-F., Poirier, F., & Doignon, P. (2004). Interaction with In-Vehicle Electronic Systems: A Complete Description of a Neural Network Approach. *Neural Processing Letters*, 19 (2), 109-129.
- Keele, S. W. (1968). Movement Control in Skilled Motor Performance. *Psychological Bulletin*, 70 (6), 387-403.

- Ketcham, C. J., Seidler, R. D., van Gemmert, A. W. A., & Stelmach, G. E. (2002). Age-Related Kinematic Differences as Influenced by Task Difficulty, Target Size, and Movement Amplitude. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 57 (1), 54-64.
- Ketcham, C. J., & Stelmach, G. E. (2004). Movement Control in the Older Adult. In R. W. Pew & S. B. van Hemel (Eds.), *Technology for Adaptive Aging* (pp. 64-92). Washington, DC: National Academies Press.
- Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M., Falkenstein, M., Jost, K., Philipp, A. M., & Koch, I. (2010). Control and Interference in Task Switching—A Review. *Psychological Bulletin*, 136 (5), 849-874.
- Kulik, A., Kunert, A., Huckauf, A., & Froehlich, B. (2012). The Groovepad: Ergonomic Integration of Isotonic and Elastic Input for Efficient Control of Complementary Subtasks. In *Proceedings of the 10th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction* (pp. 75-84). New York, NY: ACM.
- Lévesque, V., Oram, L., MacLean, K., Cockburn, A., Marchuk, N. D., Johnson, D., ... Peshkin, M. A. (2011). Enhancing Physicality in Touch Interaction with Programmable Friction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 2481-2490). New York, NY: ACM.
- MacKenzie, I. S. (1989). A Note on the Information-Theoretic Basis for Fitts' Law. *Journal of Motor Behavior*, 21 (3), 323-330.
- MacKenzie, I. S., & Buxton, W. (1992). Extending Fitts' Law to Two-Dimensional Tasks. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 219-226). New York, NY: ACM.
- Mattes, S. (2010, December). *Anzeigeconzepte für Elektro- und Hybridfahrzeuge: Mercedes F800 Style*. Slides presented at the VDI - Automobiles Cockpit, Sindelfingen, Deutschland.
- Mattes, S., & Hallén, A. (2009). Surrogate Distraction Measurement Techniques: The Lane Change Test. In M. A. Regan, J. D. Lee, & K. L. Young (Eds.), *Driver Distraction. Theory, Effects, and Mitigation* (pp. 107-122). Boca Raton, FL: CRC Press.
- McCallum, D. C., & Irani, P. (2009). ARC-Pad: Absolute+Relative Cursor Positioning for Large Displays with a Mobile Touchscreen. In *Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (pp. 153-156). New York, NY: ACM.
- Meiran, N. (1996). Reconfiguration of Processing Mode Prior to Task Performance. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22 (6), 1423-1442.
- Meiran, N. (2010). Task Switching: Mechanisms Underlying Rigid vs. Flexible Self-Control. In R. R. Hassin, K. N. Ochsner, & Y. Trope (Eds.), *Self control in society, mind, and brain* (pp. 202-220). Oxford, England: Oxford University Press.
- Meyer, D. E., Abrams, R. A., Kornblum, S., Wright, C. E., & Smith, J. E. K. (1988). Optimality in Human Motor Performance: Ideal Control of Rapid Aimed Movements. *Psychological Review*, 95 (3), 340-370.
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, 7 (3), 134-140.
- Müsseler, J., & Sutter, C. (2012). Menschliche Informationsverarbeitung beim Werkzeuggebrauch: Zur Koordination proximaler und distaler Handlungseffekte. In T. H. Schmitz & H. Groninger (Eds.), *Werkzeug - Denkzeug: Manuelle Intelligenz und Transmedialität kreativer Prozesse* (pp. 247-261). Bielefeld, Deutschland: transcript Verlag.
- Navon, D., & Gopher, D. (1979). On the Economy of the Human-Processing System. *Psychological Review*, 86 (3), 214-255.
- Norberg, S., & Rahe, U. (2009). *Touchpad as Interaction Input Control for Use of In-Vehicle Infotainment Systems*. Retrieved from <https://document.chalmers.se/download?docid=1264242407>.
- Norman, D. A. (1988). *The Design of Everyday Things*. New York, NY: Basic Books.
- Norman, D. A. (2011). *Living with Complexity*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Pitts, M. J., Burnett, G., Skrypchuk, L., Wellings, T., Attridge, A., & Williams, M. A. (2012). Visual-haptic feedback interaction in automotive touchscreens. *Displays*, 33 (1), 7-16.
- Proctor, R. W., & van Zandt, T. (2008). *Human Factors in Simple and Complex Systems* (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.

- Rinkenauer, G. (2008). Motorische Leistungsfähigkeit im Alter. In B. Schlag (Ed.), *Leistungsfähigkeit und Mobilität im Alter* (pp. 143-180). Köln, Deutschland: TÜV-Media GmbH.
- Salvucci, D. D., Taatgen, N. A., & Borst, J. P. (2009). Toward a Unified Theory of the Multitasking Continuum: From Concurrent Performance to Task Switching, Interruption, and Resumption. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1819-1828). New York, NY: ACM.
- Schattenberg, K. (2002). *Fahrzeugführung und gleichzeitige Nutzung von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen: Untersuchungen zur sicherheitsoptimierten Gestaltung und Positionierung von Anzeige- und Bedienkomponenten im Kraftfahrzeug* (Dissertation). Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen. Retrieved from <http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2002/441/>
- Schattenberg, K., & Debus, G. (2001). Multimodale Anzeige- und Bedienkonzepte zur Steuerung technischer Systeme während der Fahrt im Kraftfahrzeug: Evaluationsbefunde zur Systemweiterentwicklung mit paralleler Sprachbedienung. In T. Jürgensohn & K.-P. Timpe (Eds.), *Kraftfahrzeugführung* (pp. 177-193). Berlin, Deutschland: Springer.
- Schedlbauer, M. (2007). Completion Time Predictions of Mobile Touch-Screen Interactions in Dual-Task Situations. In *Proceedings of the 29th International Conference on Information Technology Interfaces* (pp. 271-277). Zagreb, Kroatien: SRCE University Computing Centre.
- Schmidt, R. A. (1975). A Schema Theory of Discrete Motor Skill Learning. *Psychological Review*, 82 (4), 225-260.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2011). *Motor Control and Learning: A Behavioral Emphasis* (5th ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schmidt, R. A., Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J. S., & Quinn Jr., J. T. (1979). Motor-Output Variability: A Theory for the Accuracy of Rapid Motor Acts. *Psychological Review*, 86 (5), 415-451.
- Shehab, R. L., & Schlegel, R. E. (1993). A Test of Fitts' Law in a Dual-Task Paradigm. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 37th Annual Meeting* (pp. 559-563). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Simon, J. R. (1969). Reactions Toward the Source of Stimulation. *Journal of Experimental Psychology*, 81 (1), 174-176.
- Simon, J. R., & Rudell, A. P. (1967). Auditory S-R Compatibility: The Effect of an Irrelevant Cue on Information Processing. *Journal of Applied Psychology*, 51 (3), 300-304.
- Soukoreff, R. W., & MacKenzie, I. S. (2004). Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61 (6), 751-789.
- Spies, R., Blattner, A., Lange, C., Wohlfarter, M., Bengler, K., & Hamberger, W. (2011). Measurement of Driver's Distraction for an Early Prove of Concepts in Automotive Industry at the Example of the Development of a Haptic Touchpad. In J. A. Jacko (Ed.), *Human-Computer Interaction. Interaction Techniques and Environments. 14th International Conference, HCI International 2011, Orlando, FL, USA, July 2011, Proceedings, Part II* (pp. 125-132). Berlin, Deutschland: Springer.
- Sternberg, S. (1969). The Discovery of Processing Stages: Extensions of Donders' Method. *Acta Psychologica*, 30, 276-315.
- Sutter, C. (2006). *Charakteristische Nutzereigenschaften und ihr Einfluss auf die Bedienung von Notebook-Eingabegeräten: Eine arbeitspsychologische Evaluation von Touchpad und Trackpoint* (Dissertation). Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen. Retrieved from <http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2006/1697/>
- Sutter, C. (2007). Sensorimotor transformation of input devices and the impact on practice and task difficulty. *Ergonomics*, 50 (12), 1999-2016.
- Sutter, C., Müsseler, J., & Bardos, L. (2011a). Effects of sensorimotor transformations with graphical input devices. *Behaviour & Information Technology*, 30 (3), 415-424.

- Sutter, C., Oehl, M., & Armbrüster, C. (2011b). Practice and carryover effects when using small interaction devices. *Applied Ergonomics*, 42 (3), 437-444.
- Sutter, C., Sülzenbrück, S., Rieger, M., & Müsseler, J. (2013). Limitations of distal effect anticipation when using tools. *New Ideas in Psychology*, 31 (3), 247-257.
- Sutter, C., & Ziefle, M. (2004). Psychomotor Efficiency in Users of Notebook Input Devices: Confirmation and Restrictions of Fitts' Law as an Evaluative Tool for User Friendly Design. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 48th Annual Meeting* (pp. 773-777). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Sutter, C., & Ziefle, M. (2006). Psychomotor Performance of Input Device Users and Optimized Cursor Control. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 50th Annual Meeting* (pp. 742-746). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Vilimek, R., & Zimmer, A. (2007). Development and Evaluation of a Multimodal Touchpad for Advanced In-Vehicle Systems. In D. Harris (Ed.), *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. 7th International Conference, EPCE 2007, Held as Part of HCI International 2007, Beijing, China, July 22-27, 2007, Proceedings* (Vol. 4562, pp. 842-851). Berlin, Deutschland: Springer.
- Weber, J. (2011). *Die Menschmaschine*. Retrieved from <http://www.daimler-technicity.com/hmi>.
- Welsh, T. N., Higgins, L., & Elliott, D. (2007). Are there age-related differences in learning to optimize speed, accuracy, and energy expenditure? *Human Movement Science*, 26 (6), 892-912.
- Wickens, C. D. (1976). The Effects of Divided Attention on Information Processing in Manual Tracking. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2 (1), 1-13.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3 (2), 159-177.
- Wickens, C. D. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50 (3), 449-455.
- Wickens, C. D., Hollands, J. G., Banbury, S., & Parasuraman, R. (2013). *Engineering Psychology and Human Performance* (4th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson.
- Winer, B. J. (1971). *Statistical Principles in Experimental Design* (2nd ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Wolpert, D. M., Diedrichsen, J., & Flanagan, J. R. (2011). Principles of sensorimotor learning. *Nature Reviews Neuroscience*, 12, 739-751.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Abgesetztes, zentrales Bedienelement angelehnt an Schattenberg (2002).....	2
Abbildung 1-2: Vierdimensionales Ressourcenmodell nach Wickens (2008).....	7
Abbildung 1-3: Das Multitasking Kontinuum nach Salvucci et al. (2009).....	8
Abbildung 1-4: Cam-Touch-Pad (Weber, 2011).....	12
Abbildung 1-5: Absolutes Bedienprinzip.....	13
Abbildung 1-6: Absolutes Bedienprinzip mit Rückmeldung der aktivierbaren Taste (Highlight).....	14
Abbildung 1-7: Relatives Bedienprinzip.....	15
Abbildung 1-8: Stufenmodell der Informationsverarbeitung nach Schmidt und Lee (2011).....	18
Abbildung 1-9: Closed-loop Bewegungskontrolle nach Schmidt und Lee (2011).....	20
Abbildung 1-10: Open-loop Bewegungskontrolle nach Schmidt und Lee (2011).....	20
Abbildung 1-11: Schematische Darstellung von Fitts' Law nach Schmidt und Lee (2011).....	23
Abbildung 1-12: Schematische Darstellung von Schmidt's Law nach Schmidt et al. (1979).....	24
Abbildung 1-13: Regelkreise beim Werkzeuggebrauch nach Müsseler und Sutter (2012).....	34
Abbildung 1-14: Bahntransformationen nach Heuer (1983).....	36
Abbildung 2-1: Versuchsaufbau.....	53
Abbildung 2-2: Fahraufgabe.....	54
Abbildung 2-3: Touchpad.....	54
Abbildung 2-4: Absolutes Bedienprinzip ohne (links) und mit (rechts) Highlight.....	55
Abbildung 3-1: Dargebotene Tastatur mit Cursor in zwei Skalierungen.....	60
Abbildung 3-2: Demonstration der abzufahrenden Wege beim Eintippen der ausgewählten Ortsnamen.....	61
Abbildung 3-3: Ablauf einer Aufgabe am Beispiel „Maltis“.....	61
Abbildung 3-4: Beispielhafte Darstellung der Einzelaufgaben-Abfolgen, wobei A (100 %) und B (25%) die beiden Aufgabenskalierungen repräsentieren. Im Mittelwert war die Aufgabenabfolge im einen Block 10 Aufgaben A, 3 Aufgaben B, 10 Aufgaben A etc., im anderen Block 10 Aufgaben B, 3 Aufgaben A, 10 Aufgaben B etc.....	62
Abbildung 3-5: Grafische Darstellung des Versuchsablaufs von Experiment I.....	64
Abbildung 3-6: Mittelwert der subjektiven Schwierigkeit der Aufgabenbearbeitung (1 „nicht schwierig“ - 5 „sehr schwierig“) in Abhängigkeit von der Skalierung der Anzeige, dem Zeitpunkt und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.....	66
Abbildung 3-7: Mittlere Ersteingabezeit [ms] (links) und Gesamteingabezeit [ms] (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung der Anzeige, dem Zeitpunkt und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.....	66
Abbildung 3-8: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung der Anzeige, dem Zeitpunkt und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.....	67
Abbildung 3-9: Mittlerer Weg auf dem Touchpad [mm] für die Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung der Anzeige, dem Zeitpunkt und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.....	68
Abbildung 3-10: Mittlerer Betrag der Spurabweichung [m] (links) und mittlere <i>SD</i> der Spurabweichung [m] (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung der Anzeige, dem Zeitpunkt und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.....	68
Abbildung 3-11: Mittlere Ersteingabezeit [ms] in Abhängigkeit von der Aufgabe und der relativen Häufigkeit der Aufgabe. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.....	70
Abbildung 3-12: Mittlere Ersteingabezeit [ms] (links) und Gesamteingabezeit [ms] (rechts) in Abhängigkeit von der Aufgabe, der Skalierung der Anzeige, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.....	70
Abbildung 3-13: Mittlere Gesamteingabezeit [ms] in Abhängigkeit von der Aufgabe und der relativen Häufigkeit der Aufgabe. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.....	71

Abbildung 3-14: Mittlere Gesamteingabezeit [ms] in Abhängigkeit von der Skalierung der Anzeige und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	71
Abbildung 3-15: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des ersten Buchstabens in Abhängigkeit von der Aufgabe und der Skalierung der Anzeige. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	72
Abbildung 3-16: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit von der Aufgabe, der Skalierung der Anzeige, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	72
Abbildung 3-17: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des gesamten Wortes in Abhängigkeit von der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	73
Abbildung 3-18: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des gesamten Wortes in Abhängigkeit von der Aufgabe, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	73
Abbildung 3-19: Mittlerer Weg auf dem Touchpad [mm] für die Eingabe des ersten Buchstabens in Abhängigkeit von der Aufgabe und der Skalierung der Anzeige. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	74
Abbildung 3-20: Mittlerer Weg auf dem Touchpad [mm] für die Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit von der Aufgabe, der Skalierung der Anzeige, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	74
Abbildung 3-21: Mittlerer Weg auf dem Touchpad [mm] für die Eingabe des gesamten Wortes in Abhängigkeit von der Aufgabe und der Skalierung der Anzeige. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	75
Abbildung 3-22: Mittlerer Betrag der Spurabweichung [m] (links) und mittlere <i>SD</i> der Spurabweichung [m] (rechts) in Abhängigkeit von der Aufgabe, der Skalierung der Anzeige, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	75
Abbildung 3-23: Mittlere <i>SD</i> der Spurabweichung [m] in Abhängigkeit von der Skalierung der Anzeige und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	76
Abbildung 3-24: Mittlere Ersteingabezeit [ms] (links) und Gesamteingabezeit [ms] (rechts) in Abhängigkeit vom Block, der Skalierung der Anzeige und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	77
Abbildung 3-25: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit vom Block, der Skalierung der Anzeige und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	78
Abbildung 4-1: Auf der Anzeige dargestellte Tastaturen zur Untersuchung von Effekten des Skalierungswechsels	88
Abbildung 4-2: Auf der Anzeige dargestellte Tastatur zur Untersuchung von Skalierungseffekten (zweiter Teil des Experiments).....	89
Abbildung 4-3: Beispielhafte Darstellung der Einzelaufgaben-Abfolgen, wobei A (100 %) und B (49%) die beiden Aufgabenskalierungen repräsentieren. Im Mittelwert war die Aufgabenabfolge im einen Block 10 Aufgaben A, 3 Aufgaben B, 10 Aufgaben A etc., im anderen Block 10 Aufgaben B, 3 Aufgaben A, 10 Aufgaben B etc.	90
Abbildung 4-4: Veranschaulichung des Abstands [px] zwischen Tastendruck und Mittelpunkt der gedrückten Taste auf der Anzeige	91
Abbildung 4-5: Motoriktest.....	92
Abbildung 4-6: Grafische Darstellung des Versuchsablaufs von Experiment II.....	94
Abbildung 4-7: Mittlere standardisierte Abweichung im Motoriktest in Pixel [px] in Abhängigkeit von der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	95
Abbildung 4-8: Mittlere Ersteingabezeit [ms] (links) und Gesamteingabezeit [ms] (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung des Touchpads und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	96
Abbildung 4-9: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung des Touchpads und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.....	97

Abbildung 4-10: Mittlerer Abstand zum Tastenmittelpunkt [px] für die Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung des Touchpads und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	98
Abbildung 4-11: Mittlerer Betrag der Spurabweichung [m] (links) und mittlere <i>SD</i> der Spurabweichung [m] (rechts) in Abhängigkeit von der Skalierung des Touchpads und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	99
Abbildung 4-12: Mittelwert der subjektiven Akzeptanz in Abhängigkeit von der Skalierung des Touchpads und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	99
Abbildung 4-13: Häufigkeit der Nennungen hinsichtlich der präferierten Touchpadskalierung in Abhängigkeit davon, welche Skalierung im vorangegangenen Block häufiger bedient wurde.	100
Abbildung 4-14: Mittlere Ersteingabezeit [ms] (links) und Gesamteingabezeit [ms] (rechts) in Abhängigkeit von der Aufgabe, der Skalierung des Touchpads, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	102
Abbildung 4-15: Mittlere Gesamteingabezeit [ms] in Abhängigkeit von der Aufgabe und der relativen Häufigkeit der Aufgabe. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	102
Abbildung 4-16: Mittlere Gesamteingabezeit [ms] in Abhängigkeit von der Skalierung des Touchpads und der relativen Häufigkeit der Aufgabe. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	103
Abbildung 4-17: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des ersten Buchstabens (links) und des gesamten Wortes (rechts) in Abhängigkeit von der Aufgabe, der Skalierung des Touchpads, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	103
Abbildung 4-18: Mittlerer relativer Fehler bei Eingabe des gesamten Wortes in Abhängigkeit von der Aufgabe und der Skalierung des Touchpads. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	104
Abbildung 4-19: Mittlerer Betrag der Spurabweichung [m] in Abhängigkeit von der Aufgabe und der Skalierung des Touchpads. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	104
Abbildung 4-20: Mittlerer Betrag der Spurabweichung [m] (links) und mittlere <i>SD</i> der Spurabweichung [m] (rechts) in Abhängigkeit von der Aufgabe, der Skalierung des Touchpads, der relativen Häufigkeit der Aufgabe und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	105
Abbildung 4-21: Mittlere <i>SD</i> der Spurabweichung [m] in Abhängigkeit von der Skalierung des Touchpads und der relativen Häufigkeit der Aufgabe. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	105
Abbildung 5-1: Beispielanzeige Radiomenü im Menüsystem	116
Abbildung 5-2: Feedbackvarianten 1-4 (nähere Erläuterungen zu Feedbackvarianten siehe Text)	117
Abbildung 5-3: Visuelle Analogskala für das Item „Wie gut gefällt Ihnen diese Darstellungsvariante?“	118
Abbildung 5-4: Farbsehtest	119
Abbildung 5-5: Grafische Darstellung des Versuchsablaufs von Experiment III	120
Abbildung 5-6: Modellanpassung an Fitts' Law für Feedbackvariante 1 (links oben), 2 (rechts oben), 3 (links unten) und 4 (rechts unten) auf Basis des Schwierigkeitsindex (<i>ID</i>).	122
Abbildung 5-7: Modellanpassung an Fitts' Law für Feedbackvariante 1 (links oben), 2 (rechts oben), 3 (links unten) und 4 (rechts unten) auf Basis des effektiven Schwierigkeitsindex (<i>ID_e</i>).	123
Abbildung 5-8: Mittlere effektiv genutzte Zielbreite [px] in Abhängigkeit von der Feedbackvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	124
Abbildung 5-9: Mittlerer Abstand zum Tastenmittelpunkt [px] in Abhängigkeit von der Feedbackvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	125
Abbildung 5-10: Mittelwert der subjektiven Erkennbarkeit der Tastenerreichung (0 „sehr schlecht erkennbar“ - 15 „sehr gut erkennbar“) in Abhängigkeit von der Feedbackvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	125
Abbildung 5-11: Mittelwert der subjektiven Erkennbarkeit des Highlights (0 „sehr schlecht erkennbar“ - 7.5 „genau richtig“ - 15 „zu auffällig“) in Abhängigkeit von der Feedbackvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	126
Abbildung 5-12: Mittelwert der subjektiven Erkennbarkeit des Cursors (0 „sehr schlecht erkennbar“ - 7.5 „genau richtig“ - 15 „zu auffällig“) in Abhängigkeit von der Feedbackvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	126
Abbildung 6-1: Touchpad	134
Abbildung 6-2: Zielkennzeichnung (Haus-Icon) und aktuelle Tastenselektion (orangenes Highlight)	134
Abbildung 6-3: Absolute Bedienvarianten: Bedienvariante 1 (links) und Bedienvariante 2 (rechts)	135

Abbildung 6-4: Zuordnung der Winkelbereiche der Wischbewegung auf die Richtung der Cursorbewegung bei Bedienvariante 3	137
Abbildung 6-5: Relative Bedienvarianten: Bedienvariante 3 (links) und Bedienvariante 4 (rechts)	138
Abbildung 6-6: Zuordnung der Winkelbereiche der Wischbewegung auf die Richtung der Cursorbewegung bei Bedienvariante 4, sofern die Tasten auf der Anzeige gitterförmig angeordnet sind	138
Abbildung 6-7: Faktor Tastengröße	141
Abbildung 6-8: Faktor Tastenentfernung	141
Abbildung 6-9: Faktor Tastenanzahl	142
Abbildung 6-10: Visuelle Analogskala für das Item „Wie gut gefällt Ihnen diese Bedienvariante?“	144
Abbildung 6-11: Grafische Darstellung des Versuchsablaufs von Experiment IV	146
Abbildung 6-12: Mittlere standardisierte Abweichung im Motoriktest in Pixel [px] in Abhängigkeit von der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	147
Abbildung 6-13: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Tastengröße, der Bewegungsrichtung, der Alterskategorie und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	149
Abbildung 6-14: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Bedienvariante, der Bewegungsrichtung und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	149
Abbildung 6-15: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Tastengröße und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	150
Abbildung 6-16: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Tastenentfernung, der Bewegungsrichtung, der Alterskategorie und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	151
Abbildung 6-17: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Tastenentfernung und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	151
Abbildung 6-18: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Bedienvariante, der Bewegungsrichtung und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	152
Abbildung 6-19: Mittlere Bewegungsgeschwindigkeit [cm/s] in Abhängigkeit von der Tastenentfernung, der Bewegungsrichtung und der Alterskategorie für Bedienvariante 1. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	153
Abbildung 6-20: Mittlere Bewegungsgeschwindigkeit [cm/s] in Abhängigkeit von der Tastenentfernung, der Bewegungsrichtung und der Alterskategorie für Bedienvariante 2. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	153
Abbildung 6-21: Mittlere Bewegungsgeschwindigkeit [cm/s] in Abhängigkeit von der Tastenentfernung, der Bewegungsrichtung und der Alterskategorie für Bedienvariante 3. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	154
Abbildung 6-22: Mittlere Bewegungsgeschwindigkeit [cm/s] in Abhängigkeit von der Tastenentfernung, der Bewegungsrichtung und der Alterskategorie für Bedienvariante 4. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	154
Abbildung 6-23: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenanzahl 4. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	155
Abbildung 6-24: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenanzahl 9. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	156
Abbildung 6-25: Mittlere Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenanzahl 25. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	156
Abbildung 6-26: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Tastengröße, der Bewegungsrichtung, der Alterskategorie und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	157
Abbildung 6-27: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Tastengröße und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	157
Abbildung 6-28: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Bedienvariante, der Alterskategorie und der Bewegungsrichtung. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	158
Abbildung 6-29: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Tastenentfernung, der Bewegungsrichtung, der Alterskategorie und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	158

Abbildung 6-30: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Tastenentfernung und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	159
Abbildung 6-31: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Tastenentfernung, der Alterskategorie und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	159
Abbildung 6-32: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenanzahl 4. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	160
Abbildung 6-33: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenanzahl 9. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	160
Abbildung 6-34: Mittlerer relativer Fehler in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenanzahl 25. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	160
Abbildung 6-35: Mittlere <i>SD</i> der Spurabweichung [m] in Abhängigkeit von der Tastenentfernung, der Alterskategorie und der Bedienvariante. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	161
Abbildung 6-36: Mittlere <i>SD</i> der Spurabweichung [m] in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenanzahl 4. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	162
Abbildung 6-37: Mittlere <i>SD</i> der Spurabweichung [m] in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenanzahl 9. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	162
Abbildung 6-38: Mittlere <i>SD</i> der Spurabweichung [m] in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie bei Tastenanzahl 25. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	162
Abbildung 6-39: Modellanpassung an Fitts' Law für Bedienvariante 1 für jüngere (links) und ältere Probanden (rechts) auf Basis des Schwierigkeitsindex (<i>ID</i>).	164
Abbildung 6-40: Modellanpassung an Fitts' Law für Bedienvariante 1 für jüngere (links) und ältere Probanden (rechts) auf Basis des effektiven Schwierigkeitsindex (<i>ID_e</i>).	165
Abbildung 6-41: Modellanpassung an Fitts' Law für Bedienvariante 2 für jüngere (links) und ältere Probanden (rechts) auf Basis des Schwierigkeitsindex (<i>ID</i>).	166
Abbildung 6-42: Modellanpassung an Fitts' Law für Bedienvariante 2 für jüngere (links) und ältere Probanden (rechts) auf Basis des effektiven Schwierigkeitsindex (<i>ID_e</i>).	167
Abbildung 6-43: Erklärung der Zeit der Zielnavigation [ms] für Bedienvariante 3 für jüngere (links) und ältere Probanden (rechts) in Abhängigkeit von der Idealanzahl an Wischgesten.	168
Abbildung 6-44: Erklärung der Zeit der Zielnavigation [ms] für Bedienvariante 4 für jüngere (links) und ältere Probanden (rechts) in Abhängigkeit von der Idealanzahl an Wischgesten.	169
Abbildung 6-45: Mittelwert des subjektiven Gefallens (0 „sehr schlecht“ - 15 „sehr gut“) in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	170
Abbildung 6-46: Mittelwert der subjektiven Intuitivität (0 „sehr wenig“ - 15 „sehr“) in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	170
Abbildung 6-47: Mittelwert des subjektiven Spaßes (0 „sehr wenig“ - 15 „sehr viel“) in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	171
Abbildung 6-48: Mittelwert der subjektiven Ablenkung (0 „sehr stark“ - 15 „kaum“) in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	171
Abbildung 6-49: Mittelwert der subjektiven Unterbrechbarkeit (0 „sehr schlecht“ - 15 „sehr gut“) in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	171
Abbildung 6-50: Mittelwert der subjektiven Schnelligkeit (0 „sehr langsam“ - 15 „sehr schnell“) in Abhängigkeit von der Bedienvariante und der Alterskategorie. Die Fehlerbalken repräsentieren 95% Konfidenzintervalle.	172
Abbildung 6-51: Anzahl der Nennungen als beste Variante	172
Abbildung 6-52: Anzahl der Nennungen als schlechteste Variante	172
Abbildung 8-1: Akzeptanzfragebogen für die jeweilige Touchpadskalierung in Experiment II.....	219
Abbildung 8-2: Akzeptanzfragebogen für die jeweilige Feedbackvariante in Experiment III.....	221
Abbildung 8-3: Vergleichender Akzeptanzfragebogen für die Feedbackvarianten in Experiment III.....	222
Abbildung 8-4: Akzeptanzfragebogen für das jeweilige Bedienkonzept in Experiment IV	225
Abbildung 8-5: Vergleichender Akzeptanzfragebogen für die Bedienkonzepte in Experiment IV, Seite 1	226
Abbildung 8-6: Vergleichender Akzeptanzfragebogen für die Bedienkonzepte in Experiment IV, Seite 2	227

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Klassifikation von Bedienelementen hinsichtlich Schwierigkeit der räumlichen Transformation nach Sutter (2007)	39
Tabelle 2-1: Übersicht der abhängigen Variablen	58
Tabelle 4-1: Untersuchte Touchpadskalierungen [cm], entsprechende Abstände zwischen zwei benachbarten Tastenmittelpunkten [mm] und Größenverhältnisse der Zieltasten auf dem Touchpad [mm]	88
Tabelle 6-1: Übersicht der untersuchten Bedienvarianten	140
Tabelle 6-2: Übersicht der untersuchten Faktorenkombinationen bei Analyse der Tastengröße und -entfernung	143
Tabelle 6-3: Übersicht der untersuchten Faktorenkombinationen bei Analyse verschiedener Tastenanzahlen ..	143
Tabelle 6-4: Übersicht durchgeführter Analysen und vorhandener Konfundierungen zwischen den untersuchten Faktoren	144
Tabelle 6-5: M und SD der Bearbeitungszeit [ms] für jüngere und ältere Probanden in den verschiedenen Analysen	148
Tabelle 6-6: M und SD der relativen Häufigkeit von Bedienumwegen für Bedienvariante 3 und 4 in den verschiedenen Analysen.....	163
Tabelle 8-1: Bedienaufgaben in Experiment III	220
Tabelle 8-2: Datengrundlage zur Berechnung der Modellanpassungen an Fitts' Law in Experiment III	223
Tabelle 8-3: Anzeigekonfigurationen in Experiment IV	224
Tabelle 8-4: Datengrundlage zur Berechnung der Modellanpassungen an Fitts' Law für Bedienvariante 1 in Experiment IV	227
Tabelle 8-5: Datengrundlage zur Berechnung der Modellanpassungen an Fitts' Law für Bedienvariante 2 in Experiment IV	228
Tabelle 8-6: Datengrundlage zur Modellierung der Zeit der Zielnavigation für Bedienvariante 3 in Experiment IV	228
Tabelle 8-7: Datengrundlage zur Modellierung der Zeit der Zielnavigation für Bedienvariante 4 in Experiment IV	229

8 Anhang


Wie sehr stimmen Sie den folgenden Aussagen zu?					
	trifft völlig zu				trifft überhaupt nicht zu
Diese Version wirkt benutzerfreundlich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Diese Version lässt sich gut handhaben.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Diese Version lässt sich schnell bedienen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Beim Umgang mit dieser Version muss man sich sehr stark konzentrieren.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Diese Version lässt sich komfortabel bedienen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Der Umgang mit dieser Version ist einfach.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Diese Version ist fehleranfällig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Diese Version ist leicht verständlich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Diese Version ist schwierig zu bedienen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mit dieser Version komme ich gut zurecht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Bedienung dieser Version lenkt sehr stark ab.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Diese Version finde ich insgesamt sehr gut.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich kann mir gut vorstellen, Diese Version zu nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Diese Version gefällt mir.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Diese Version würde ich weiterempfehlen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung 8-1: Akzeptanzfragebogen für die jeweilige Touchpadskalierung in Experiment II

Tabelle 8-1: Bedienungsaufgaben in Experiment III

01	Radio	Klang	Verstellen Sie im Radio im Klang die Höhen um zwei Einheiten
02	Fahrzeug	Automat. Verrieg.	Jetzt bei den Fahrzeugfunktionen die automatische Verriegelung umschalten.
03	Telefon	Nummer eingeben	Rufen Sie [Ihren Partner] an. Anrufen und gleich wieder auflegen.
04	Navi	Letzte Ziele	Im Navi bei den letzten Zielen den dritten Eintrag vorlesen.
05	Radio	nächster Sender	Wechseln Sie im Radio auf den nächsten Sender.
06	Navi	Karte Vollbild	Nun möchten Sie im Navi die Karte auf dem ganzen Bildschirm anschauen.
07	Telefon	Mail schreiben	Bitte schreiben Sie eine Mail mit dem Text: „Ich komme heim.“
08	Radio	Klang	Schalten Sie im Radio den Raumklang Logic ein bzw. aus.
09	Fahrzeug	Heckrollo	Jetzt bitte in den Fahrzeugfunktionen das Heckrollo öffnen bzw. schließen.
10	Telefon	Tel.buch - Anrufen	Sie möchten Frau Keller im Büro anrufen. Benutzen sie das Telefonbuch. Anrufen und gleich wieder auflegen.
11	Navi	Ziel-eingabe	Geben Sie in das Navi ein neues Ziel ein: [Frankfurt am Main, Adelheidstraße 12]. Starten Sie dann die Zielführung.
12	Telefon	Anrufliste	Welches ist der zuletzt eingegangene Anruf im Telefon?
13	Navi	Routen-info	Ihre Routenführung ist noch aktiv. Schauen Sie bitte nach, zu welcher Uhrzeit sie am Ziel ankommen.
			Jetzt die Zielführung abbrechen.
14	Telefon	Tel.buch - Details	Lassen Sie sich im Telefonbuch die Details zum Eintrag "Bartel, Frieder" anzeigen. Anrufen und gleich wieder auflegen.

1. Wie gut gefällt Ihnen diese Darstellungsvariante?

Sehr schlecht Sehr gut

2. Wie leicht fiel Ihnen die Bedienung?

Sehr schwer Sehr leicht

3. Wie gut war der Cursor erkennbar?

Sehr schlecht erkennbar Genau richtig Zu auffällig

4. [Wie gut war die Tastenmarkierung erkennbar?]

Sehr schlecht erkennbar Genau richtig Zu auffällig

5. Wie sehr lenkt Sie diese Darstellungsvariante vom Fahren ab?

Sehr stark ablenkend Kaum ablenkend

6. Wie gut war erkennbar, ob Sie die gewünschte Taste mit dem Cursor erreicht haben?

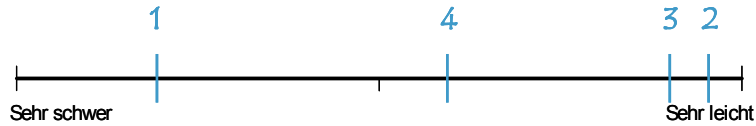
Sehr schlecht erkennbar Sehr gut erkennbar

Abbildung 8-2: Akzeptanzfragebogen für die jeweilige Feedbackvariante in Experiment III

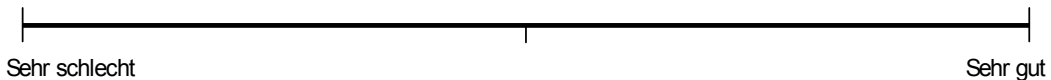
Bitte schätzen Sie in diesem letzten Abschnitt unseres Fragebogens die verschiedenen Darstellungen im Vergleich zueinander ein.

Ziehen Sie dazu nun für jede Darstellungsvariante einen Strich an einer Stelle der Linie, die Ihre Meinung zu der darüberstehenden Frage widerspiegelt. Markieren Sie bitte Ihre Striche mit der für die jeweilige Darstellungsvariante vorgesehenen Ziffer (s. Abbildungen vom Versuchsleiter).

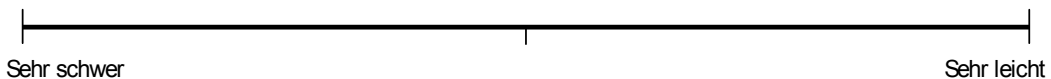
Beispiel: Wie leicht fiel Ihnen die Bedienung?



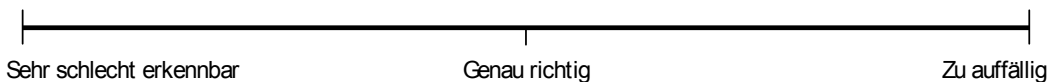
1. Wie gut gefällt Ihnen die Darstellungsvariante?



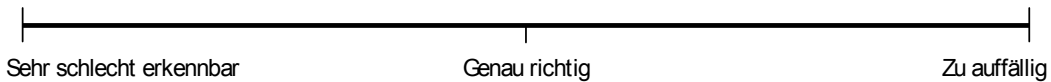
2. Wie leicht fiel Ihnen die Bedienung?



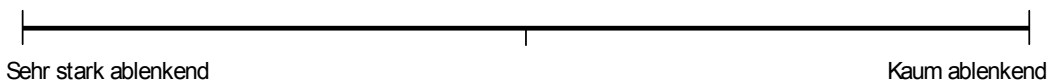
3. Wie gut war der Cursor erkennbar?



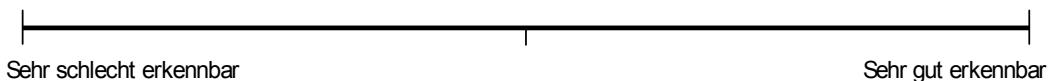
4. Wie gut war die Tastenmarkierung erkennbar?



5. Wie sehr lenkt Sie die Darstellungsvariante vom Fahren ab?



6. Wie gut war erkennbar, ob Sie die gewünschte Taste mit dem Cursor erreicht haben?



7. Wie oft passieren Bedienfehler?

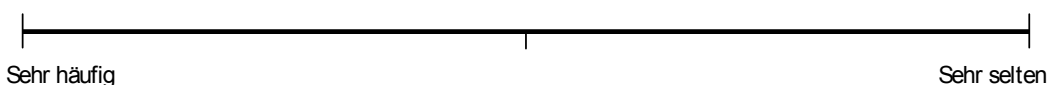


Abbildung 8-3: Vergleichender Akzeptanzfragebogen für die Feedbackvarianten in Experiment III

Tabelle 8-2: Datengrundlage zur Berechnung der Modellanpassungen an Fitts' Law in Experiment III

Bedingung	D [px]	W [px]	ID [bits]	Mittlere Bewegungs- dauer [ms]	D e [px]	W e [px]	ID e [bits]	N Trials
1	79,0	82,0	,97	778	85,38	23,76	2,49	444
1	83,0	82,0	1,01	696	85,29	31,13	1,96	1395
1	114,6	82,0	1,26	852	110,53	36,97	2,09	1320
1	158,0	82,0	1,55	917	163,60	33,35	2,80	456
1	166,0	82,0	1,60	936	168,65	33,64	2,67	1620
1	183,8	82,0	1,70	846	182,94	30,55	3,21	560
1	249,0	82,0	2,01	1264	243,73	37,00	3,06	1260
1	294,9	82,0	2,20	1172	302,02	36,68	3,45	560
1	332,0	82,0	2,34	1213	328,33	25,59	3,92	1335
1	341,3	82,0	2,37	1210	344,61	18,58	4,68	392
1	581,0	82,0	3,02	1351	571,94	32,68	4,49	825
2	79,0	82,0	,97	841	80,29	28,77	2,46	455
2	83,0	82,0	1,01	679	83,01	43,04	1,60	1616
2	114,6	82,0	1,26	814	112,59	32,71	2,27	1230
2	158,0	82,0	1,55	943	161,49	37,00	2,58	494
2	166,0	82,0	1,60	1027	164,27	34,80	2,57	1695
2	183,8	82,0	1,70	811	179,76	35,09	2,75	507
2	249,0	82,0	2,01	1151	245,09	32,76	3,21	1232
2	294,9	82,0	2,20	1168	297,38	49,56	2,91	630
2	332,0	82,0	2,34	1183	325,70	35,73	3,41	1536
2	341,3	82,0	2,37	1125	330,66	34,94	4,24	465
2	581,0	82,0	3,02	1432	574,54	33,10	4,51	795
3	79,0	82,0	,97	852	83,35	34,96	1,80	574
3	83,0	82,0	1,01	662	84,88	39,51	1,74	1520
3	114,6	82,0	1,26	793	117,38	34,83	2,31	1392
3	158,0	82,0	1,55	837	169,97	36,72	2,74	645
3	166,0	82,0	1,60	1030	163,54	31,88	2,75	1808
3	183,8	82,0	1,70	739	191,41	23,72	3,52	507
3	249,0	82,0	2,01	1265	245,62	35,05	3,12	1296
3	294,9	82,0	2,20	1120	301,62	31,31	3,52	690
3	332,0	82,0	2,34	1205	330,14	30,94	3,70	1520
3	341,3	82,0	2,37	1144	347,46	20,01	4,71	338
3	581,0	82,0	3,02	1200	569,72	26,99	4,62	840
4	79,0	82,0	,97	886	85,76	24,69	2,38	615
4	83,0	82,0	1,01	700	83,21	36,07	1,81	1520
4	114,6	82,0	1,26	818	117,39	29,93	2,43	1305
4	158,0	82,0	1,55	801	170,59	34,16	3,25	615
4	166,0	82,0	1,60	986	167,61	33,69	2,82	1728
4	183,8	82,0	1,70	830	193,49	35,16	2,81	374
4	249,0	82,0	2,01	1206	245,58	36,13	3,02	1392
4	294,9	82,0	2,20	1176	306,22	48,62	3,01	660
4	332,0	82,0	2,34	1196	334,95	30,51	3,67	1584
4	341,3	82,0	2,37	1216	348,90	15,11	5,04	406
4	581,0	82,0	3,02	1223	576,22	29,71	4,51	885

Tabelle 8-3: Anzeigekonfigurationen in Experiment IV.

Positionierung der virtuellen Tasten auf der Anzeige (480 x 480 px). Der Nullpunkt des Koordinatensystems liegt unten links. Die Positionierung bezieht sich auf die linke untere Ecke des Objekts.

1. Anzeigekonfiguration: 4 kleine Tasten (60 x 60 px), kurze Entfernung
150/150, 270/150, 150/270, 270/270

2. Anzeigekonfiguration: 4 mittelgroße Tasten (120 x 120 px)
90/90, 270/90, 90/270, 270/270

3. Anzeigekonfiguration: 4 große Tasten (180 x 180 px)
30/30, 270/30, 30/270, 270/270

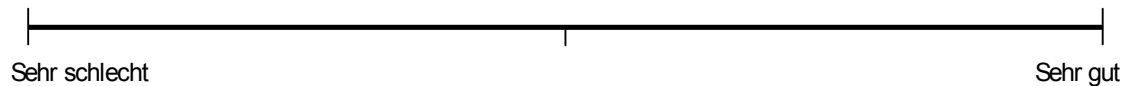
4. Anzeigekonfiguration: 4 kleine Tasten (60 x 60 px), mittlere Entfernung
90/90, 330/90, 90/330, 330/330

5. Anzeigekonfiguration: 4 kleine Tasten (60 x 60 px), große Entfernung
30/30, 390/30, 30/390, 390/390

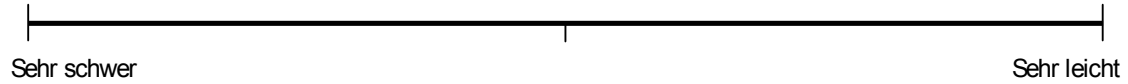
6. Anzeigekonfiguration: 9 kleine Tasten (60 x 60 px)
30/30, 210/30, 390/30, 30/210, 30/390, 210/210, 210/390, 390/210, 390/390

7. Anzeigekonfiguration: 25 kleine Tasten (60 x 60 px)
30/30, 120/30, 210/30, 300/30, 390/30, 30/120, 120/120, 210/120, 300/120, 390/120, 30/210, 120/210, 210/210, 300/210, 390/210, 30/300, 120/300, 210/300, 300/300, 390/300, 30/390, 120/390, 210/390, 300/390, 390/390

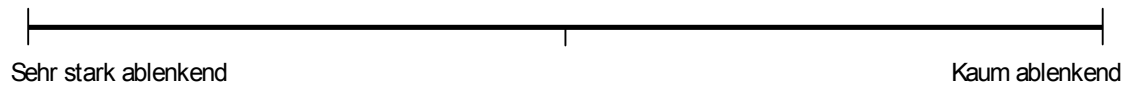
1. Wie gut gefällt Ihnen diese Bedienvariante?



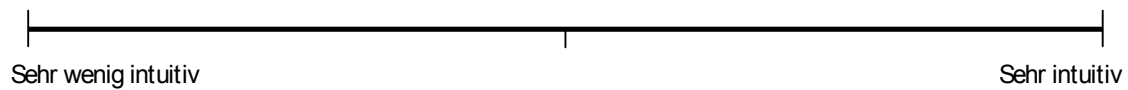
2. Wie leicht fiel Ihnen die Bedienung?



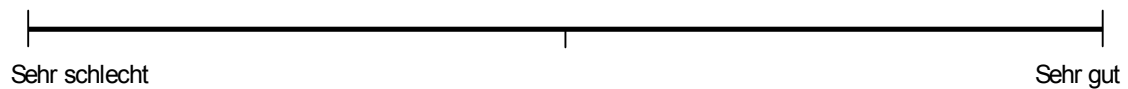
3. Wie sehr lenkt Sie diese Bedienvariante vom Fahren ab?



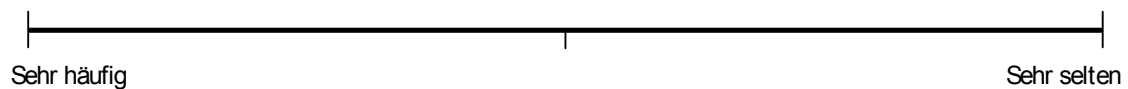
4. Wie intuitiv ist diese Bedienvariante?



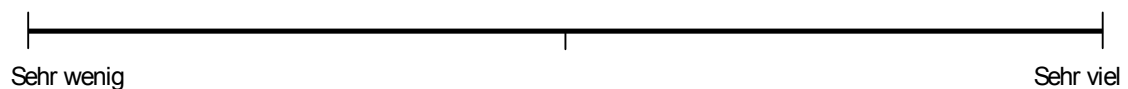
5. Wie gut war die Bedienung kontrollierbar?



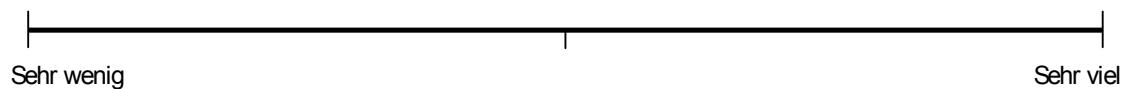
6. Wie häufig passieren Bedienfehler?



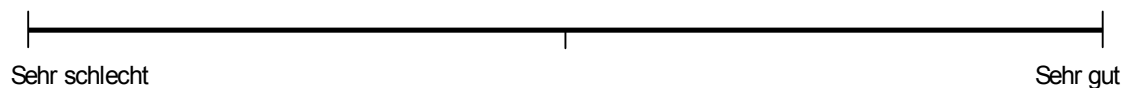
7. Wie viel Übung braucht man?



8. Wie viel Spaß macht die Bedienung?



9. Wie gut kann man die Bedienung unterbrechen?



10. Wie schnell kann man bedienen?

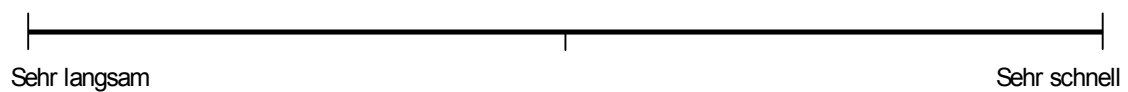
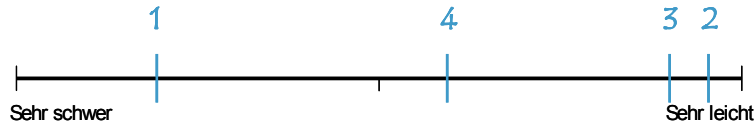


Abbildung 8-4: Akzeptanzfragebogen für das jeweilige Bedienkonzept in Experiment IV

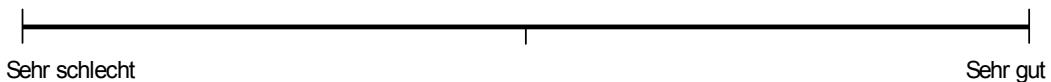
Bitte schätzen Sie in diesem letzten Abschnitt unseres Fragebogens die verschiedenen Bedienvarianten im Vergleich zueinander ein.

Ziehen Sie dazu nun für jede Bedienvariante einen Strich an einer Stelle der Linie, die Ihre Meinung zu der darüberstehenden Frage widerspiegelt. Markieren Sie bitte Ihre Striche mit der für die jeweilige Bedienvariante vorgesehenen Ziffer (s. Abbildungen vom Versuchsleiter).

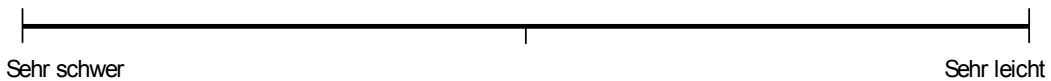
Beispiel: Wie leicht fiel Ihnen die Bedienung?



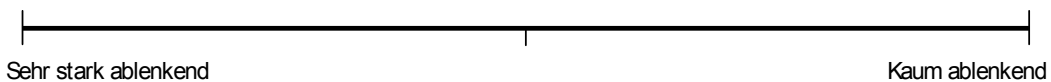
- Wie gut gefällt Ihnen diese Bedienvariante?



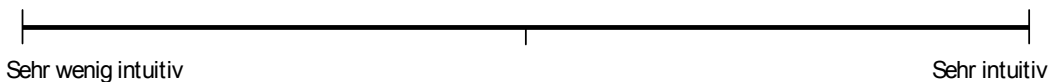
- Wie leicht fiel Ihnen die Bedienung?



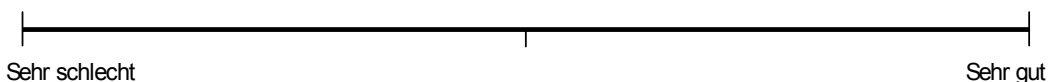
- Wie sehr lenkt Sie diese Bedienvariante vom Fahren ab?



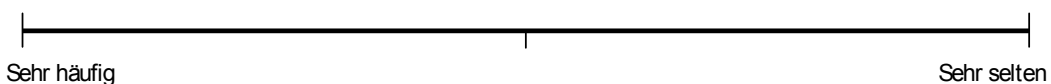
- Wie intuitiv ist diese Bedienvariante?



- Wie gut war die Bedienung kontrollierbar?



- Wie häufig passieren Bedienfehler?



- Wie viel Übung braucht man?

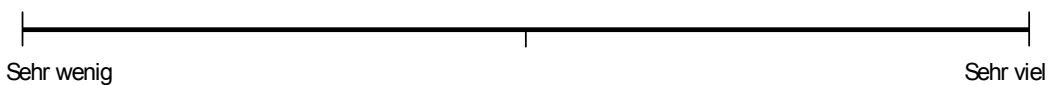
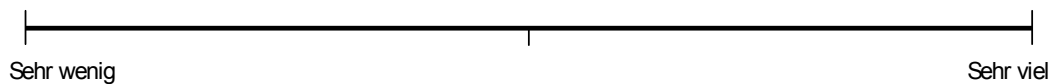
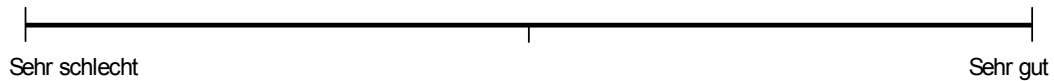


Abbildung 8-5: Vergleichender Akzeptanzfragebogen für die Bedienkonzepte in Experiment IV, Seite 1

- We viel Spaß macht die Bedienung?



- We gut kann man die Bedienung unterbrechen?



- We schnell kann man bedienen?

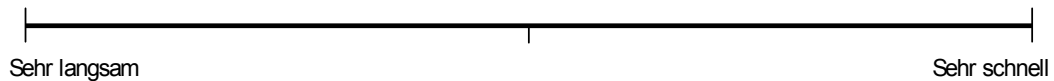


Abbildung 8-6: Vergleichender Akzeptanzfragebogen für die Bedienkonzepte in Experiment IV, Seite 2

Tabelle 8-4: Datengrundlage zur Berechnung der Modellanpassungen an Fitts' Law für Bedienvariante 1 in Experiment IV

Alterskategorie	D [px]	W [px]	ID [bits]	Mittlere Bewegungs- dauer [ms]	D e [px]	W e [px]	ID e [bits]	N Trials
jünger	120,0	60,0	1,58	499	119,12	30,63	2,30	924
jünger	169,7	60,0	1,94	530	169,42	28,82	2,79	465
jünger	180,0	120,0	1,32	444	164,25	55,64	1,99	876
jünger	240,0	60,0	2,32	590	228,65	31,79	3,04	933
jünger	240,0	180,0	1,22	416	200,52	72,81	1,94	891
jünger	254,6	120,0	1,64	428	225,69	56,98	2,32	450
jünger	339,4	60,0	2,73	632	326,67	31,64	3,52	464
jünger	339,4	180,0	1,53	423	274,20	77,22	2,25	426
jünger	360,0	60,0	2,81	687	337,06	29,94	3,63	949
jünger	509,1	60,0	3,25	725	486,72	30,59	4,09	438
älter	120,0	60,0	1,58	735	124,31	30,04	2,37	837
älter	169,7	60,0	1,94	770	170,84	30,09	2,75	438
älter	180,0	120,0	1,32	672	175,96	48,22	2,23	788
älter	240,0	60,0	2,32	801	229,39	30,24	3,11	895
älter	240,0	180,0	1,22	653	210,35	70,22	2,02	833
älter	254,6	120,0	1,64	697	245,14	44,88	2,73	404
älter	339,4	60,0	2,73	848	324,64	30,58	3,55	461
älter	339,4	180,0	1,53	693	295,20	65,94	2,48	399
älter	360,0	60,0	2,81	868	326,82	31,42	3,51	850
älter	509,1	60,0	3,25	965	469,35	31,24	4,01	401

8 Anhang

Tabelle 8-5: Datengrundlage zur Berechnung der Modellanpassungen an Fitts' Law für Bedienvariante 2 in Experiment IV

Alterskategorie	D [px]	W [px]	ID [bits]	Mittlere Bewegungsdauer [ms]	D e [px]	W e [px]	ID e [bits]	N Trials
jünger	120,0	60,0	1,58	436	158,92	98,34	1,33	880
jünger	169,7	60,0	1,94	468	210,50	98,73	1,60	451
jünger	180,0	120,0	1,32	441	168,05	105,62	1,35	878
jünger	240,0	60,0	2,32	437	200,25	100,27	1,55	880
jünger	240,0	180,0	1,22	424	183,93	111,84	1,38	891
jünger	254,6	120,0	1,64	485	222,88	108,17	1,58	452
jünger	339,4	60,0	2,73	453	271,39	108,72	1,77	450
jünger	339,4	180,0	1,53	462	242,73	114,31	1,63	434
jünger	360,0	60,0	2,81	449	219,14	106,37	1,59	897
jünger	509,1	60,0	3,25	490	294,07	108,93	1,88	430
älter	120,0	60,0	1,58	549	120,66	95,97	1,16	890
älter	169,7	60,0	1,94	655	167,18	94,79	1,46	449
älter	180,0	120,0	1,32	514	146,76	103,78	1,26	887
älter	240,0	60,0	2,32	546	166,71	112,64	1,29	883
älter	240,0	180,0	1,22	550	186,56	104,46	1,44	867
älter	254,6	120,0	1,64	647	205,75	100,96	1,56	445
älter	339,4	60,0	2,73	651	227,89	104,59	1,66	447
älter	339,4	180,0	1,53	665	257,01	106,75	1,78	424
älter	360,0	60,0	2,81	581	223,77	107,14	1,60	876
älter	509,1	60,0	3,25	674	309,61	110,65	1,90	425

Tabelle 8-6: Datengrundlage zur Modellierung der Zeit der Zielnavigation für Bedienvariante 3 in Experiment IV

Alterskategorie	Idealanzahl Wischgesten	Dauer Zielnavigation [ms]
jünger	1	710
jünger	2	1111
jünger	3	1519
jünger	4	1891
jünger	5	2306
jünger	6	2635
älter	1	1045
älter	2	1701
älter	3	2249
älter	4	2821
älter	5	3366
älter	6	3738

Tabelle 8-7: Datengrundlage zur Modellierung der Zeit der Zielnavigation für Bedienvariante 4 in Experiment IV

Alterskategorie	Idealanzahl Wischgesten	Dauer Zielnavigation [ms]
jünger	1	608
jünger	2	990
jünger	3	1552
jünger	4	1479
älter	1	887
älter	2	1512
älter	3	2140
älter	4	2372

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass meine Dissertation selbständig verfasst und alle in Anspruch genommenen Quellen und Hilfen in der Dissertation vermerkt wurden.

Ich erkläre, dass meine Dissertation in der gegenwärtigen oder in einer anderen Fassung weder an der Technischen Universität Dortmund noch an einer anderen Hochschule im Zusammenhang mit einer staatlichen oder akademischen Prüfung vorgelegt worden ist.

Dortmund, im Oktober 2014

Susanne Schild

