

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
Institut für Arbeitswissenschaft

**Aktive haptische Bedienelemente
zur Interaktion
mit Fahrerinformationssystemen**

Dipl.-Ing. Simon Zeilinger

Von der
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
der Universität der Bundeswehr München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Axel Schulte
1. Berichterstatter: Prof. Dr. Berthold Färber
2. Berichterstatter: PD Dr. Michael Popp
3. Berichterstatter: Prof. Dr. rer.nat. Heiner Bubb

Tag der mündlichen Prüfung: 01.03.2005

Danksagung

Mein Dank gilt

zu aller erst meinem Betreuer Herrn Prof. Dr. Berthold Färber sowie Herrn PD Dr. Michael Popp für das entgegengebrachte Vertrauen, die wertvollen Gespräche und die stets konstruktive Kritik beim Entstehen der Arbeit;

Herrn Prof. Dr. Heiner Bubb für die Übernahme des Mitberichts;

den vielen involvierten Kollegen bei DaimlerChrysler. Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Werner Reichelt für das Ermöglichen der Arbeit, Herrn Jan Petzel für die Betreuung bei DaimlerChrysler, Herrn Dr. Kay Schattenberg für die vielen inhaltlichen Diskussionen und technischen Ratschläge;

meinen Eltern und meiner Freundin Dorothee für ihre Unterstützung und Motivation.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	1
1 EINLEITUNG	3
1.1 FAHRER-FAHRZEUG-UMWELT-INTERAKTION	3
1.1.1 <i>Menschliche Informationsverarbeitung</i>	3
1.1.2 <i>Fahrzeugführung</i>	4
1.1.3 <i>Systembedienung</i>	6
1.2 BEDIENELEMENTE IN KRAFTFAHRZEUGEN	7
1.2.1 <i>Begriffsdefinitionen</i>	7
1.2.2 <i>Überblick über Bedienelemente in Kraftfahrzeugen</i>	8
1.2.3 <i>Analyse der Bedienelemente in Kraftfahrzeugen</i>	9
1.3 FAHRERINFORMATIONSSYSTEME IN KRAFTFAHRZEUGEN	11
1.3.1 <i>Begriffsdefinitionen</i>	11
1.3.2 <i>Heutige Fahrerinformationssysteme</i>	12
1.3.3 <i>Zukünftige Entwicklungen</i>	13
1.3.4 <i>Forderungen des Designs und der Ergonomie</i>	14
2 BETÄTIGUNGSHAPTİK	17
2.1 PHYSIOLOGISCHE ASPEKTE	17
2.1.1 <i>Psychophysische Grundlagen</i>	17
2.1.2 <i>Haptische Wahrnehmung</i>	19
2.1.2.1 <i>Begriffsbestimmung</i>	19
2.1.2.2 <i>Taktile Wahrnehmung</i>	20
2.1.2.3 <i>Propriozeptive Wahrnehmung</i>	22
2.1.3 <i>Motorische Fähigkeiten</i>	22
2.1.4 <i>Zusammenspiel von Sensorik und Motorik</i>	25
2.2 DIE HAPTİK VON BEDIENELEMENTEN	25
2.2.1 <i>Haptische Eigenschaften</i>	26
2.2.2 <i>Haptische Gestaltungsrichtlinien</i>	26
2.2.3 <i>Untersuchungen zum Einfluss der haptischen Eigenschaften von Bedienelementen</i>	28
3 TECHNISCHE AUSFÜHRUNGEN	31
3.1 PASSIVE BEDIENELEMENTE	31
3.1.1 <i>Bedienelemente heutiger Fahrerinformationssysteme</i>	31
3.1.2 <i>Bedienelemente zur Interaktion mit Computern</i>	34
3.2 AKTIVE HAPTISCHE BEDIENELEMENTE	34
3.2.1 <i>Funktionsweise</i>	34
3.2.2 <i>Anwendungen</i>	36
3.2.2.1 <i>Automotive</i>	37
3.2.2.2 <i>Spiele / Entertainment</i>	38
3.2.2.3 <i>Weitere Beispiele</i>	39

4	ZIELSETZUNG UND FRAGESTELLUNG	45
4.1	ZIELSETZUNG DER ARBEIT	45
4.2	LÖSUNGSANSATZ	46
4.2.1	<i>Joystick als Multifunktionsbedienelement.....</i>	<i>47</i>
4.2.2	<i>Frei programmierbares aktives Bedienelement.....</i>	<i>48</i>
4.3	HYPOTHESEN UND FRAGESTELLUNGEN	48
5	AUFBAU EINER ENTWICKLUNGSUMGEBUNG FÜR BEDIENKONZEPTE MIT AKTIVEN HAPTISCHEN BEDIENELEMENTEN.....	51
5.1	HARDWARE	51
5.1.1	<i>Joystick</i>	<i>51</i>
5.1.2	<i>Peripherie.....</i>	<i>52</i>
5.2	SOFTWARE.....	53
5.2.1	<i>TouchSense for VAPS™.....</i>	<i>53</i>
5.2.2	<i>Programmierung mit C++ - das 3-Ebenen-Modell.....</i>	<i>54</i>
5.3	MMI-FAHRSIMULATOR	57
5.4	VERSUCHSFAHRZEUG	58
6	UNTERSUCHUNG ZUR DIFFERENZIERBARKEIT VON BETÄTIGUNGSKRÄFTEN UND –WEGEN EINES AKTIVEN HAPTISCHEN JOYSTICKS.....	59
6.1	EINLEITUNG.....	59
6.2	ZIELSETZUNG UND FRAGESTELLUNG	59
6.3	HYPOTHESEN	60
6.4	METHODE	60
6.4.1	<i>Stichprobe.....</i>	<i>60</i>
6.4.2	<i>Hard- und Software.....</i>	<i>60</i>
6.4.3	<i>Versuchsdesign</i>	<i>60</i>
6.5	VERSUCHSABLAUF.....	62
6.6	ERGEBNISSE	62
6.6.1	<i>Betätigungskraft.....</i>	<i>62</i>
6.6.2	<i>Betätigungsweg</i>	<i>63</i>
6.7	DISKUSSION	63
6.8	SCHLUSSFOLGERUNG	64
7	UNTERSUCHUNG ZU DEN HAPTISCHEN EIGENSCHAFTEN EINES AKTIVEN HAPTISCHEN JOYSTICKS IN EINEM SIMULATOREXPERIMENT	65
7.1	EINLEITUNG.....	65
7.2	ZIELSETZUNG UND FRAGESTELLUNG	65
7.3	HYPOTHESEN	65
7.4	METHODE	66
7.4.1	<i>Stichprobe.....</i>	<i>66</i>
7.4.2	<i>Hard- und Software.....</i>	<i>67</i>
7.4.3	<i>Datenaufzeichnung.....</i>	<i>67</i>
7.4.4	<i>Versuchsdesign</i>	<i>67</i>
7.5	VERSUCHSABLAUF.....	69

7.6	ERGEBNISSE	70
7.6.1	<i>Ergebnisse kumuliert</i>	70
7.6.2	<i>Betätigungsrichtung</i>	72
7.6.3	<i>Betätigungsweg bis mechanischer Widerstand</i>	74
7.6.4	<i>Fragebogenergebnisse</i>	75
7.6.5	<i>Weitere Ergebnisse</i>	77
7.7	DISKUSSION	79
7.8	SCHLUSSFOLGERUNG	81
8	VERGLEICH EINES AKTIVEN HAPTISCHEN JOYSTICKS UND EINES AKTIVEN HAPTISCHEN SCHIEBESTELLERS IN EINEM SIMULATOREXPERIMENT	83
8.1	EINLEITUNG	83
8.2	ZIELSETZUNG UND FRAGESTELLUNG	83
8.3	HYPOTHESEN	84
8.4	METHODE	85
8.4.1	<i>Stichprobe</i>	85
8.4.2	<i>Hardware</i>	86
8.4.2.1	Aktiver haptischer Joystick	86
8.4.2.2	Aktiver haptischer Schiebesteller	86
8.4.3	<i>Software</i>	87
8.4.3.1	Bedienaufgabe Menüauswahl	87
8.4.3.2	Bedienaufgabe Listenauswahl	87
8.4.3.3	Bedienaufgabe Alphanumerische Eingabe	88
8.4.4	<i>Fahrssimulator</i>	89
8.4.5	<i>Datenaufzeichnung</i>	89
8.4.6	<i>Versuchsdesign</i>	89
8.5	VERSUCHSABLAUF	92
8.6	ERGEBNISSE	93
8.6.1	<i>Bediendauer</i>	93
8.6.1.1	Alle Messwerte	93
8.6.1.2	Messwerte 0. bis 95. Perzentil	94
8.6.2	<i>Bedienfehler</i>	95
8.6.2.1	Alle Messwerte	95
8.6.2.2	Messwerte 0. bis 95. Perzentil	97
8.6.3	<i>Subjektive Bewertung der einzelnen Varianten</i>	98
8.6.4	<i>Abschließende Gesamtbewertung</i>	99
8.6.5	<i>Weitere Auswertungen</i>	102
8.6.5.1	Alphanumerische Eingabe – direkt benachbarte Buchstaben	102
8.6.5.2	Menüauswahl – Hauptrichtungen vs. Diagonalen	102
8.6.5.3	Menüauswahl – detaillierte Auswertung der Diagonalen	103
8.7	DISKUSSION	103
8.8	SCHLUSSFOLGERUNG	104

9	VERGLEICH VON OBERFLÄCHENVARIANTEN ZUR ALPHANUMERISCHEN EINGABE MIT EINEM AKTIVEN HAPTISCHEN JOYSTICK	105
9.1	EINLEITUNG.....	105
9.2	ZIELSETZUNG UND FRAGESTELLUNG	105
9.3	HYPOTHESEN	106
9.4	METHODE	106
9.4.1	<i>Stichprobe</i>	106
9.4.2	<i>Hardware und Software</i>	106
9.4.2.1	Eingabeoberfläche 10-Finger-Tastatur („Qwertz-Speller“)	106
9.4.2.2	Alphabetisch geordnete Eingabeoberfläche („ABC-Speller“)	108
9.4.2.3	Eingabeoberfläche 10er-Block, 1-2-3-System („Handy-Speller“)	108
9.4.2.4	Eingabeoberflächen mit polarer Anordnung („Polar-Speller“).....	109
9.4.3	<i>Versuchsfahrzeug</i>	111
9.4.4	<i>Datenaufzeichnung</i>	111
9.4.5	<i>Versuchsdesign</i>	112
9.5	VERSUCHSABLAUF.....	113
9.6	ERGEBNISSE	113
9.6.1	<i>Bediendauer</i>	113
9.6.2	<i>Bedienfehler</i>	114
9.6.3	<i>Klicks</i>	116
9.6.4	<i>Subjektive Bewertung</i>	117
9.6.5	<i>Demographische Merkmale</i>	117
9.7	DISKUSSION	118
9.8	SCHLUSSFOLGERUNG	119
10	VERGLEICH VON VARIABLER HAPTİK UND KONSTANTER HAPTİK IN EINEM SIMULATOREXPERIMENT	121
10.1	EINLEITUNG.....	121
10.2	ZIELSETZUNG UND FRAGESTELLUNG	121
10.3	HYPOTHESEN	122
10.4	METHODE	123
10.4.1	<i>Stichprobe</i>	123
10.4.2	<i>Hardware</i>	124
10.4.2.1	Joystick mit variabler Haptik.....	124
10.4.2.2	Joystick mit konstanter Haptik.....	124
10.4.3	<i>Software</i>	125
10.4.3.1	Teil 1: Separate Analyse einzelner Bedienaufgaben.....	125
10.4.3.2	Teil 2: Untersuchung der Ablenkungswirkung bei der Bedienung eines Navigationssystems	128
10.4.4	<i>Fahrsimulator</i>	130
10.4.5	<i>Datenaufzeichnung</i>	130
10.4.6	<i>Versuchsdesign</i>	130
10.4.6.1	Teil 1: Separate Analyse einzelner Bedienaufgaben.....	131
10.4.6.2	Teil 2: Untersuchung der Ablenkungswirkung bei der Bedienung eines Navigationssystems.	132
10.5	VERSUCHSABLAUF.....	136

10.6	ERGEBNISSE	137
10.6.1	<i>Erster Versuchsteil</i>	137
10.6.1.1	Menüauswahl	137
10.6.1.2	Buchstabeneingabe mit Listenauswahl	138
10.6.1.3	Zieleingabe über Karte	139
10.6.1.4	Subjektive Bewertung	140
10.6.2	<i>Zweiter Versuchsteil</i>	141
10.6.2.1	Anzahl bearbeiteter Bedienungsaufgaben	141
10.6.2.2	Bremsreaktionszeit	141
10.6.2.3	Fahrdaten	141
10.6.2.4	Blickdaten	143
10.6.2.5	Subjektive Bewertung	145
10.7	DISKUSSION	146
10.8	SCHLUSSFOLGERUNG	147
11	VERGLEICH VON VARIABLER UND KONSTANTER HAPTİK IN EINEM FELDEXPERIMENT	149
11.1	EINLEITUNG	149
11.2	ZIELSETZUNG UND FRAGESTELLUNG	149
11.3	HYPOTHESEN	150
11.4	METHODE	151
11.4.1	<i>Stichprobe</i>	151
11.4.2	<i>Hard- und Software</i>	151
11.4.3	<i>Versuchsfahrzeug</i>	152
11.4.4	<i>Datenaufzeichnung</i>	152
11.4.5	<i>Versuchsdesign</i>	152
11.5	VERSUCHSABLAUF	153
11.6	ERGEBNISSE	154
11.6.1	<i>Einfahrbahn</i>	154
11.6.2	<i>Schnellstraße</i>	156
11.6.3	<i>Subjektive Bewertung</i>	161
11.7	DISKUSSION	162
11.8	SCHLUSSFOLGERUNG	163
11.9	VERGLEICH DER VERSUCHSUMGEBUNGEN	163
12	ZUSAMMENFASSUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE	165
12	INTERPRETATION UND AUSBLICK	169
13	LITERATURVERZEICHNIS	171

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der optimierten Gestaltung des Fahrerarbeitsplatzes, im Speziellen der manuellen Bedieneinheit von Fahrerinformationssystemen. Die steigende Informationsdichte im heutigen Straßenverkehr resultiert zunehmend in einer starken Belastung des visuellen und auditiven Sinneskanals des Kraftfahrers. Zur Optimierung der Schnittstelle Mensch-Maschine im Fahrzeug wird versucht, durch die Verwendung eines in seinen haptischen Eigenschaften frei programmierbaren aktiven Joysticks als Multifunktionsbedienelement zusätzliche Information über den haptischen Sinneskanal zu übertragen. Dadurch soll die visuelle Ablenkung des Fahrers sowie dessen kognitive Beanspruchung bei Bedienung des Systems minimiert werden.

Die Arbeit beginnt mit theoretischen Überlegungen zur Interaktionen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Straßenverkehr. Es folgt eine Einführung in die Thematik der Bedienelemente und Fahrerinformationssysteme in Kraftfahrzeugen. Im Weiteren werden die zwei Seiten der Schnittstelle Mensch-Fahrerinformationssystem betrachtet. Zunächst werden grundlegende physiologische Aspekte zur Betätigungshaptik besprochen. Die sensorischen und motorischen Fähigkeiten des Menschen in Bezug auf den haptischen Wahrnehmungskanal erweisen sich dabei als ein überaus leistungsfähiges System. Analog werden die haptischen Eigenschaften von Bedienelementen sowie relevante Gestaltungsrichtlinien besprochen. Anschließend werden die Bedienelemente zur Interaktion mit heutigen Fahrerinformationssystemen analysiert und bewertet. Des Weiteren wird ein Überblick über relevante aktive haptische Bedienelemente gegeben.

Es folgt eine Beschreibung der in den Probandenuntersuchungen verwendeten Hard- und Software sowie die Vorgehensweise bei der Anwendungsprogrammierung. In den folgenden sechs Experimenten wird für einen in seiner Haptik variablen, aktiven Joystick ein Bedien- und Anzeigekonzept eines Navigationssystems entwickelt, evaluiert und optimiert. Es beinhaltet grundlegende Interaktionsaufgaben wie Menüauswahl, Alphanumerische Eingabe, Listenauswahl und Zieleingabe über Karte. Dabei werden unterschiedliche Bedien- und Anzeigemöglichkeiten im Hinblick auf Bedienperformanz und Ablenkungswirkung verglichen. Die Experimente wurden in den Versuchsumgebungen MMI-Fahrsimulator der DaimlerChrysler-Forschung sowie in einem Versuchsfahrzeug auf der Straße durchgeführt.

Die Ergebnisse des experimentellen Teils der Arbeit lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Große Betätigungskräfte und ein auf den Betätigungsweg bezogen später Druckpunkt unterstützen die Erkennbarkeit einer Betätigung durch Auslenken des Joysticks.
- Die „Qwertz“-Anordnung der Buchstaben ist für eine positionscodierte Alphanumerische Eingabe mit dem beschriebenen Bedienelement am besten geeignet.
- Die Bedienart Schwenken ist unter Betrachtung mehrerer Interaktionsaufgaben verglichen mit der Bedienung mit einem aktiven haptischen Schieberegler insgesamt besser geeignet für die Bedienung eines Fahrerinformationssystems.
- Die Bedienung des entwickelten Bedien- und Anzeigekonzepts mit einem Joystick mit variabler, aktiver Haptik wurde mit der Bedienung mit einem Joystick mit konstanter, passiver Haptik in einem Simulator- und einem Feldexperiment verglichen. Es ergaben sich keine Vorteile, aber auch keine signifikant schlechteren Werte bei Bedienung mit variabler Haptik. Demgegenüber schneidet variable Haptik bei subjektiven Bewertungen durchweg besser ab.

In Bezug auf die Ablenkungswirkung konnte innerhalb der Untersuchungen dieser Arbeit kein signifikanter Vorteil variabler, aktiver Haptik nachgewiesen werden. Die Ergebnisse machen jedoch das Potenzial aktiver haptischer Bedienelemente zur Interaktion mit Fahrerinformationssystemen deutlich. So konnten bei zweidimensionalen Anwendungen wie Zieleingabe über Karte oder Buchstabeneingabe signifikante Vorteile für den frei programmierbaren aktiven haptischen Joystick gegenüber dem passiven Bedienelement festgestellt werden.

Heutige technische Lösungen besitzen noch erhebliche Schwachstellen in der Qualität der erzeugten Haptik, z. B. bei der Simulation einer mechanischen Kulissee für Menüauswahlen. Zukünftige technologische Entwicklungen sollten daher ihren Schwerpunkt auf die Verbesserung der Qualität aktiver Haptik legen. Dann erscheint es realistisch, dass die Vorteile frei programmierbarer Haptik - etwa auch bei zukünftigen Internet-Applikationen mit haptisch markierten Hyperlinks sowie bei Office-Funktionen im Fahrzeug - überwiegen werden und dazu führen, dass aktive haptische Bedienelemente zur Interaktion mit Fahrerinformationssystemen – neben anderen möglichen Anwendungsbereichen im Fahrzeug - entwickelt und eingesetzt werden.

1 Einleitung

Die Tätigkeiten des Autofahrers beschränken sich schon lange nicht mehr darauf, sein Fahrzeug von A nach B zu bewegen. Klimaanlage, Audiosystem, Autotelefon, Navigationssystem und Bordcomputer – heutige Kraftfahrzeuge besitzen eine Vielzahl von Funktionen. Die Interaktion mit diesen technischen Systemen kann zu einer starken visuellen Ablenkung und zu einer hohen kognitiven Beanspruchung des Benutzers führen. Gleichzeitig steht der visuelle und auditive Sinneskanal nur eingeschränkt zur Informationsübertragung zwischen Fahrzeug und Fahrer zur Verfügung, da diese für die Hauptaufgabe des Autofahrens benötigt werden. Dies kann in Verbindung mit dem dichter werdenden Straßenverkehr negative Folgen für die Verkehrssicherheit haben.

Die Automobilindustrie sucht bei der Gestaltung des Fahrerarbeitsplatzes nach neuen Wegen. So kann nicht einfach für jede neu hinzukommende Funktion ein weiterer Schalter auf dem Armaturenbrett generiert werden. Vielmehr ist man bestrebt, den Fahrzeuginnenraum so zu gestalten, dass beim Benutzer der Eindruck eines aufgeräumten Interieurs entsteht. Dies ergibt auf der einen Seite die Forderung nach einer Reduzierung der Anzahl der Bedienelemente, auf der anderen Seite nimmt aber gleichzeitig die Anzahl der Bedienfunktionen in Kraftfahrzeugen drastisch zu.

Zukünftige Lösungen müssen das Ziel haben, den visuellen Sinneskanal des Fahrers zu entlasten. Neben einer verstärkten Anwendung von Sprachbedienung legt der obige Zielkonflikt die Fokussierung des haptischen Sinneskanals bei der Entwicklung neuer Mensch-Maschine-Schnittstellen nahe. Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Bedien- und Anzeigekonzepts für ein Fahrerinformationssystem, bei dem versucht wurde, den haptischen Sinneskanal verstärkt für die Informationsübertragung zwischen Fahrzeug und Fahrer zu nutzen. Dies erfolgte durch die Verwendung eines in seinen haptischen Eigenschaften frei programmierbaren aktiven Joysticks als Multifunktionsbedienelement.

Im ersten Teil dieses einleitenden Kapitels wird zunächst in knapper Form auf die Wirkungsweise menschlicher Informationsverarbeitung eingegangen. Anschließend wird die spezielle Situation des Autofahrers - die Interaktionen zwischen Fahrer, Fahrzeug und dessen Umwelt - beleuchtet. Dabei werden die Aufgaben der Fahrzeugführung und der Systembedienung aus psychologischer Sicht beschrieben. In den folgenden Teilkapiteln wird in die Thematik der Bedienelemente im Kraftfahrzeug eingeführt und heutige Fahrerinformationssysteme besprochen. Zukünftige Entwicklungen werden zum einen durch eine weitere Zunahme der Funktionalität und zum anderen durch Forderungen des Designs und der Ergonomie geprägt sein, wie abschließend erläutert wird.

1.1 Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Interaktion

Bevor wir auf die zwei Aufgaben des Autofahrers - der Fahrzeugführung und der Systembedienung - eingehen, soll im folgenden Teilkapitel kurz erläutert werden, wie menschliche Informationsverarbeitung generell aus psychologischer Sicht funktioniert.

1.1.1 Menschliche Informationsverarbeitung

In der Literatur finden sich zahlreiche Theorien zur menschlichen Informationsverarbeitung. Im Wesentlichen lassen sich diese Aufmerksamkeitstheorien in Kapazitätsmodel-

le und Strukturmodelle einteilen [für eine ausführliche Beschreibung siehe FÄRBER, 1987]:

- **Kapazitätsmodelle** (engl. Single-Ressource-Modelle) gehen von einer globalen und begrenzten Verarbeitungskapazität des Menschen aus. Die verfügbare Menge an Verarbeitungskapazität ist zwischen den verschiedenen Anforderungen zu verteilen [FÄRBER, 1987].
- Im Gegensatz dazu postulieren **Strukturmodelle** (engl. Multiple-Ressource-Modelle) mehrere, voneinander unabhängige Verarbeitungsstrukturen. Die Beachtung und Verarbeitung eines Reizes kann unter Umständen unbeeinflusst von der Verarbeitung eines anderen erfolgen [FÄRBER, 1987].

Eine Vielzahl von Studien zeigen, dass die gleichzeitige Ausführung von zwei Aufgaben ohne Leistungsminderung möglich ist [z. B. ALLPORT ET AL., 1972, in FÄRBER & FÄRBER, 1987]. Die voneinander unabhängige Informationsverarbeitung kann jedoch nur dann erfolgen, wenn zum einen die Informationen über unterschiedliche sensorische Kanäle wahrgenommen und zum anderen im menschlichen Gehirn in getrennten Strukturen verarbeitet werden. Der Engpass in der Informationsverarbeitung kann also auf der sensorischen und/oder auf der informationsverarbeitenden Ebene liegen.

Besteht im Falle des Autofahrers die Informationsüberlastung in erster Linie auf der sensorischen Ebene, so läge es im wahrsten Sinne des Wortes auf der Hand, durch die Hinzunahme eines weiteren Sinneskanals den sensorischen Verarbeitungsengpass zu entschärfen. So steigt die Verarbeitungskapazität des Benutzers bei Ausnutzung verschiedener Kanäle und Verarbeitungsstrukturen deutlich an [FÄRBER, 2002]. Fraglich ist nur, ob durch eine entsprechende Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle es gelingt, verschiedene Verarbeitungsstrukturen im Gehirn anzusprechen.

Im Folgenden konzentrieren wir uns nun auf die spezielle Situation des Autofahrers. Dessen Beanspruchung resultiert in psychologischer Hinsicht aus der Kombination der Anforderungen aus der Fahraufgabe und der parallelen Bedienung einer wachsenden Anzahl von Funktionen. Die Problematik, die daraus für den Kraftfahrer entsteht, ist die Ausgangssituation der weiteren Arbeit. Die beiden Aufgaben der Fahrzeugführung und der Systembedienung lassen sich auch in eine primäre und in eine sekundäre Aufgabe oder in eine Haupt- und eine Nebenaufgabe einteilen:

- Die **primäre Aufgabe / Hauptaufgabe** ist die **Fahraufgabe**, d. h. das sichere Führen des Fahrzeugs. Dies entspricht einem zweidimensionalen Bewegen des Fahrzeugs im Straßenverkehr.
- Die **sekundäre Aufgabe / Nebenaufgabe** ist die **Bedienaufgabe**, d. h. das Betätigen eines Bedienelements oder das Bedienen eines Fahrerinformationssystems.

Im Weiteren werden die zwei Aufgaben erläutert.

1.1.2 Fahrzeugführung

Die Fahraufgabe stellt kontinuierliche und intermittierende Anforderungen an den Kraftfahrer, die abhängig von der jeweiligen Situation sehr unterschiedlich sein können. Die Fahrzeugführung erfordert die ständige Erfüllung der Teilaufgaben der Spurhaltung und der Geschwindigkeitsregulierung. Die Spurhaltung ist eine kontinuierliche Aneinanderreihung automatisierter Lenkbewegungen, die durch Signale aus der Umgebung initiiert werden [RASMUSSEN, 1986, nach SCHATTENBERG, 2002]. Dem gegenüber existieren wechselnde und oftmals unvorhersehbare Einflüsse der Fahrzeugumgebung. So unterscheiden sich die Aufgabensituationen bei einer Stadtfahrt deutlich von der Fahrt auf

einer Schnellstraße. Des Weiteren muss zwischen Tag- und Nachtfahrten unterschieden werden.

KRAISS (1985) gliedert die Tätigkeiten bei der Fahrzeugführung in die drei Ebenen der Stabilisierung, Lenkung und Planung. Diese Gliederung entspricht im Wesentlichen der hierarchischen Mehrebenenstruktur von Mensch-Maschine-Systemen für die Kraftfahrzeugführung nach JOHANNSEN (1993). Hierbei sind für das Ziel der Beförderung von Personen und Gütern Navigations-, Lenkungs- und Stabilisierungsaufgaben auszuführen:

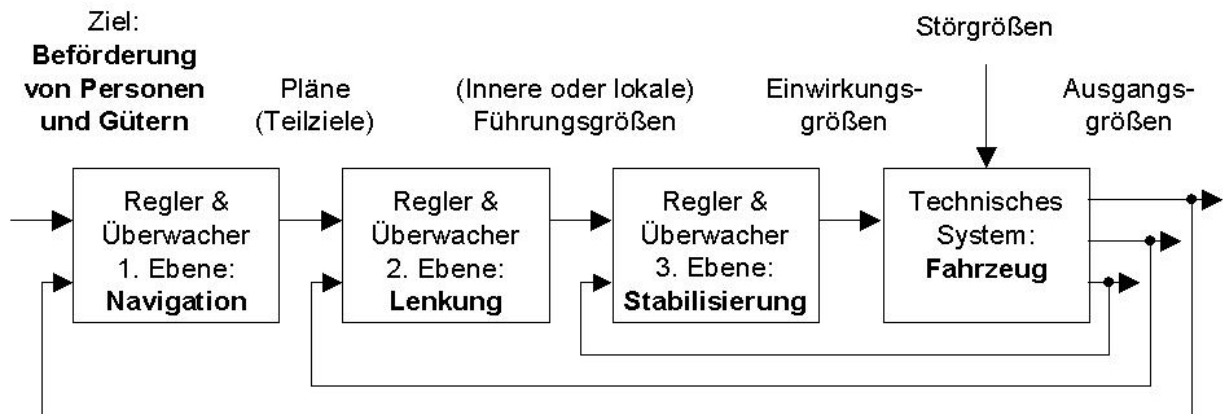


Abbildung 1.1: Hierarchische Mehrebenenstruktur von Mensch-Maschine-Systemen für die Kraftfahrzeugführung [nach JOHANNSEN, 1993]

Der Prozess der Informationsverarbeitung während der Fahrzeugführung kann mit dem allgemeinen Handlungsregulationsmodell von RASMUSSEN beschrieben werden:

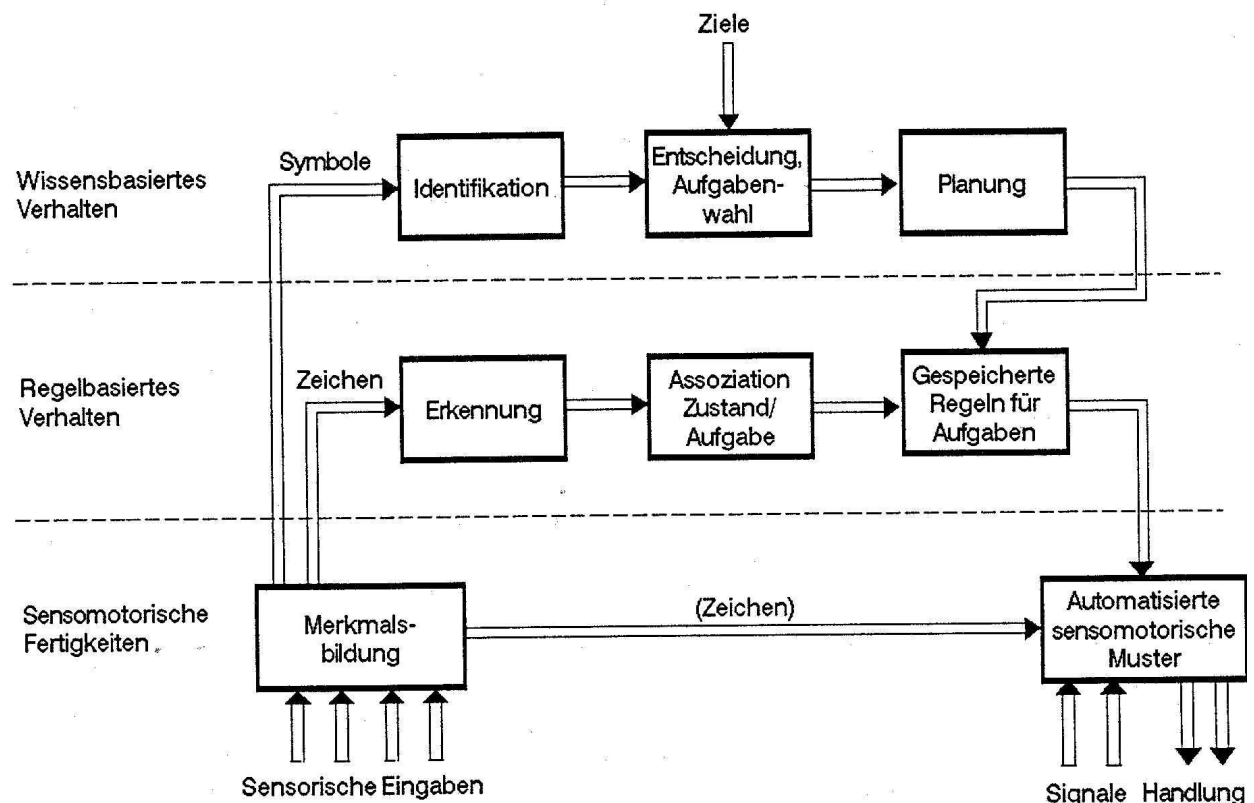


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung der kognitiven Ebenen menschlichen Verhaltens nach RASMUSSEN [nach JOHANNSEN, 1993]

Er unterscheidet dabei drei kognitive Verhaltens- oder Fertigkeitsebenen, nämlich

- sensomotorische Fertigkeiten,
- regelbasiertes Verhalten und
- wissensbasiertes Verhalten [JOHANNSEN, 1993].

In Abbildung 1.2 sind diese drei Ebenen schematisch veranschaulicht.

Die meisten wichtigen Informationen für die Fahrzeugführung werden aus der Sicht nach außen abgeleitet [JOHANNSEN, 1993], d. h. für die Aufgabe ist eine große visuelle Aufmerksamkeit erforderlich. Von Bedeutung ist aber auch die Wahrnehmung über andere Sinneskanäle wie etwa der akustischen und der kinästhetischen Wahrnehmung.

Der Kraftfahrer erfüllt die Aufgaben der Fahrzeugführung manuell durch die kontinuierliche Steuerung des Lenkrads und die intermittierende Betätigung des Gaspedals, der Bremse und z. T. der Kupplung. Neben der Fahrzeugführung sind vom Benutzer aber noch weitere Tätigkeiten im Fahrzeug auszuführen. Dazu zählen die Überwachung und Bedienung von Fahrzeugsystemen. Welche Aufgaben aus der Bedienung dieser und weiterer Systeme resultieren, wird im nächsten Unterkapitel erläutert.

1.1.3 Systembedienung

Es gibt mittlerweile eine Vielzahl technischer Systeme im Fahrzeug, die den Kraftfahrer bei der Fahrzeugführung unterstützen, ihn informieren, unterhalten und für thermischen Komfort sorgen sollen (ein Überblick über den Fahrer Arbeitsplatz in heutigen Fahrzeugen liefert Kapitel 1.2.2). Hierfür stehen dem Kraftfahrer eine Vielzahl von Anzeige- und Bedienelementen zur Verfügung. Abbildung 1.3 verdeutlicht die Möglichkeiten des Informationsaustauschs zwischen diesen Systemen und dem Fahrer:

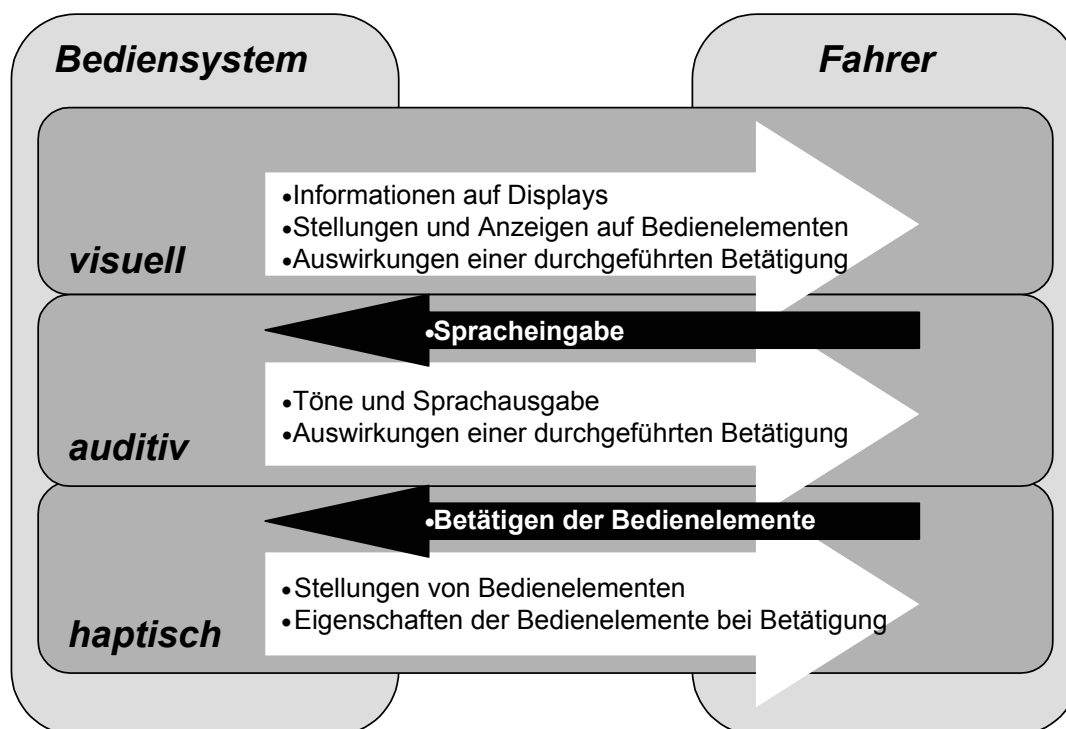


Abbildung 1.3: Informationsaustausch zwischen Bediensystem und Fahrer

Die Bedienung dieser technischen Systeme ist theoretisch ein zeitlich frei wählbarer und beliebig unterbrechbarer Vorgang. Der Kraftfahrer ist dabei mit intermittierenden Anforderungen konfrontiert, die nur indirekt einen Bezug zur momentanen Aufgabe der

Fahrzeugführung haben. Zur Interaktion mit den technischen Systemen des Fahrzeugs stehen dem Kraftfahrer die Sprachbedienung und die manuelle Bedienung zur Verfügung. Generell ist für komplexere Informationseingabe die Spracheingabe besser geeignet. So hat sie für die Navigation in der Menüstruktur eines Fahrerinformationssystems den großen Vorteil, dass sie Direktsprünge zu einem speziellen Menüunterpunkt ermöglicht. Manuelle Bedienung ist dagegen für kurze, einfache und schnelle Aktionen vorzuziehen. Des Weiteren sind die Sprachbedienung und die manuelle Eingabe im Sinne einer multimodalen Mensch-Maschine-Kommunikation als eine oftmals redundante Interaktionsmöglichkeit zu sehen.

Was passiert nun, wenn die beiden Aufgaben Fahrzeugführung und Systembedienung kombiniert ausgeführt werden? Welche Auswirkungen hat dies auf die Leistung in den Teilaufgaben? Unterschiedliche Autoren haben sich mit der Beobachtung von Probanden beschäftigt, die während der Fahrt in einem Kraftfahrzeug eine zweite fahrzeuginterne Aufgabe bearbeiteten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kombination der Fahrzeugführung mit der Bedienung technischer Systeme im Fahrzeug in Abhängigkeit der Komplexität der beiden Teilaufgaben im Wesentlichen zu einer Leistungsminderung in der Fahrzeugführung, der Systembedienung oder bei beiden Aufgaben führt [SCHATTENBERG, 2002]. In der Arbeit von SCHATTENBERG (2002) werden dazu Untersuchungen von NIEMINEN & SUMMALA (1994), RUMAR (1988), BROOKHUIS ET AL. (1991) und VERWEY & VELTMAN (1996) beschrieben.

Wie in Abschnitt 4 noch ausführlich dargelegt wird, ist der Ansatz dieser Arbeit, den beim Autofahrer überlasteten visuellen Sinneskanal durch die stärkere Ausnutzung des haptischen Kanals zu entlasten. Die Funktionsweise menschlicher Informationsverarbeitung legt dies nahe. Im Sinne eines „multimodalen Dialogs“ [GEISER, 1990, S. 144] gilt es, „die anzuzeigenden Informationen auf optische, akustische und auch haptische Anzeigen“ zu verteilen, um von den verschiedenen Ressourcen Gebrauch zu machen. Die einzugebenden Informationen können auf manuelle und sprachliche Systeme aufgeteilt werden.

1.2 Bedienelemente in Kraftfahrzeugen

Nach theoretischen Vorüberlegungen zur Gesamtsituation des Fahrers wollen wir nachfolgend den Informationsaustausch zwischen Fahrer und Bediensystemen näher betrachten und dabei im Speziellen die haptische Informationseingabe durch den Fahrer fokussieren. Diese geschieht durch das manuelle Betätigen von Bedienelementen. Das folgende Unterkapitel liefert eine Einführung in die Thematik der Bedienelemente im Kraftfahrzeug. Es wird zunächst erläutert, wie der Begriff wissenschaftlich definiert ist, wie er verwendet wurde und heutzutage wird. Kapitel 1.2.2 gibt einen Überblick über Bedienelemente in heutigen Kraftfahrzeugen, im dritten Unterkapitel werden diese funktional und bezüglich Greif- und Bewegungsmerkmalen analysiert und abschließend in Form einer Bezeichnungssystematik strukturiert.

1.2.1 Begriffsdefinitionen

Der Begriff *Bedienelement* als Medium der manuellen Informationseingabe hat sich in der einschlägigen Literatur durchgesetzt. Statt dessen könnten auch, wie in der EN 894-1 (1997) vorgeschlagen, die Bezeichnung *Stellteil*, oder die Begriffe *Bedienteil*, *Betätigungsteil*, *Steuerarmatur* verwendet werden. NEUDÖRFER (1981) zählt zahlreiche weitere Bezeichnungen auf.

Nach der EN 894-3 ist ein *Stellteil* „der Teil eines Stellteil-Systems, der vom Operator, z. B. durch Druck, direkt betätigt wird (EN 894-1)“ [EN 894-3, 2000, S. 4]. Des Weiteren wird ein *handbetätigtes Stellteil* definiert als „ein Stellteil, das von Hand gestellt oder beeinflusst wird, um eine Veränderung an einem System zu bewirken, z. B. ein Druckknopf, Drehknopf oder Steuerrad“ [EN 894-3, 2000, S. 4]. Nach RÜHMANN soll „unter *Bedienelementen (Steuerarmaturen, Stellteilen)* alle technischen Einrichtungen an der Eingangsseite der Maschine verstanden werden, die durch physikalischen Kontakt mit der Körperoberfläche aktiviert werden (...). Über diese Elemente wirkt der Operateur kontinuierlich oder diskontinuierlich (steuernd oder regelnd) auf die Maschine.“ [RÜHMANN, 1993a, S. 431]. Ähnlich dazu definiert SCHMIDTKE den Begriff *Steuerarmatur* als eine Art Überbegriff: „Als Steuerarmatur werden in diesem Zusammenhang alle Bedien- und Stellteile verstanden, mit denen der Mensch haltend, verstellend, steuernd oder regelnd auf das Arbeitssystem einwirkt.“ [SCHMIDTKE, 1989a, C – 9.1.1, S. 1].

Im Sinne der klassischen Konstruktionssystematik [vgl. z. B. BEITZ, 1997] wurde in früheren Definitionen noch der Informations-, Energie- und Stofffluss auch für die Definition von Bedienelementen herangezogen. So definiert NEUDÖRFER den Begriff *Bedienteile* ausführlich als „Kontaktstellen der Arbeitsperson mit dem jeweiligen Subsystem des Arbeitsmittels. Sie sind bewusst gestaltete Maschinenelemente mit geführten Bewegungen und bestehen aus einem Kontaktteil und einem konstruktiven Teil. Sie ermöglichen der Arbeitsperson, durch bewusstes Berühren und mit Kraftwirkungen verbundenen Bewegungen ihrer Extremitäten in die Subsysteme mechanische Energie und/oder Informationen einzuleiten, um einen Arbeitsablauf im vorgegebenen Sinne zu beeinflussen, indem sie Funktionen des Arbeitsmittels oder Prozessabläufe auslöst, fortführt oder abschließt.“ [NEUDÖRFER, 1981, S. 71]. Bei neueren Definitionen, wie etwa von SCHMIDTKE und RÜHMANN, steht die Art, wie der Mensch über *Bedienelemente* auf die Maschine bzw. das Arbeitssystem einwirkt, im Vordergrund.

Im Hinblick auf Bedienelemente in heutigen Kraftfahrzeugen hat sich deren Funktion auf die Informationsein- und -ausgabe reduziert. Sinngemäß definiert BERNOTAT *Bedienelemente im Kraftfahrzeug* als „alle technischen Geräte, die der Fahrer benötigt, um die in Erfüllung dieser Aufgabe notwendigen Informationen an Fahrzeug und Umwelt zu geben. Dies sind Lenkrad, Pedale, Schalter, Drehknöpfe, können in Zukunft aber auch Spracheingabelemente sein.“ [BERNOTAT, 1984, in FÄRBER & FÄRBER, 1987, S. 164]. Das nächste Unterkapitel liefert einen Überblick über Bedienelemente in heutigen Kraftfahrzeugen.

1.2.2 Überblick über Bedienelemente in Kraftfahrzeugen

Neben den klassischen Bedienelementen im Kraftfahrzeug, dem Lenkrad, dem Schalthebel und den Pedalen für Gas, Bremse und Kupplung gibt es in heutigen Fahrzeugen zahlreiche weitere manuell betätigte Bedienelemente. Abbildung 1.4 zeigt beispielhaft am Cockpit der aktuellen C-Klasse von Mercedes-Benz, an welchen Positionen sich in heutigen Kraftfahrzeugen Bedien- und Anzeigeelemente befinden können. Bei den Bezeichnungen handelt es sich dabei um die Begriffe, wie sie im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden.

Die in Kraftfahrzeugen zum Einsatz kommenden Bedienelemente werden sowohl in der Praxis als auch in der Literatur zum Teil unterschiedlich bzw. widersprüchlich bezeichnet. So haben die Begriffe Taster, Schalter und Steller zum einen eine funktionale Bedeutung, sind zum anderen aber auch Bezeichnungen für die Form des Bedienelements. Weitere, im Kraftfahrzeug verwendete Begriffe sind Pedal, Griff, Hebel, Knebel, Knopf und Rad. „Es ist eine große Zahl von Bezeichnungen in Form von zusammengesetzten Hauptwörtern geläufig, bei denen das Bestimmungswort entweder auf die abs-

trahierende geometrische Form des Bedienteils einget (Rad, Knopf usw.) oder seine Funktion andeutet (Schalter)“ [NEUDÖRFER, 1981, S. 69]. Die Analyse der Bedienelemente in Kraftfahrzeugen erfolgt im nächsten Unterkapitel anhand der dabei verwendeten Begriffe, welche die Funktion des Bedienelements, sowie deren Greif- und Bewegungsmerkmale betreffen.

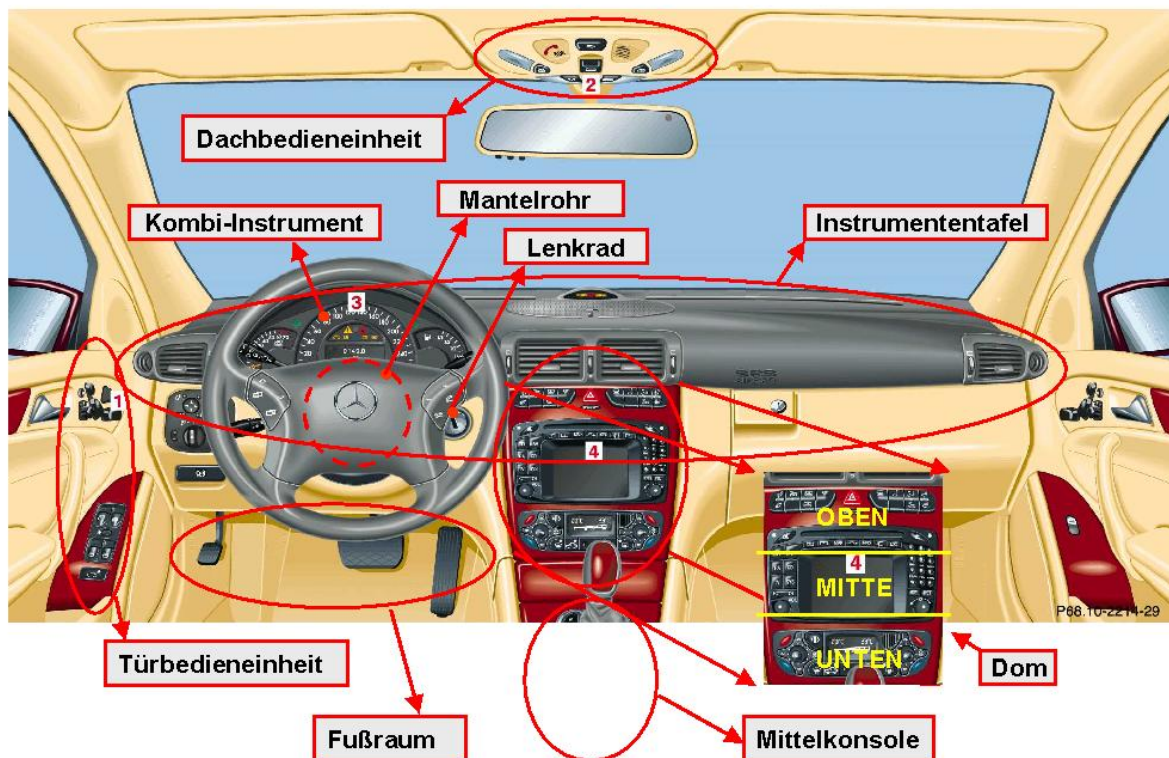


Abbildung 1.4: Cockpit der C-Klasse von Mercedes-Benz mit Positionsbezeichnungen

1.2.3 Analyse der Bedienelemente in Kraftfahrzeugen

Funktion

Funktional lassen sich Bedienelemente u. a. in Taster, Schalter und Steller einordnen:

- **Taster:** Ein Taster ist ein Bedienelement, das bei Betätigung nicht in einer Position einrastet, sondern nach einer translatorischen Verschiebung bis an einen Anschlag in seine Ausgangsposition zurückgeht. Der Schaltkontakt bleibt dabei nur für die Dauer der Betätigung geschlossen [SCHMIDTKE, 1989b].
- **Schalter:** In Form eines Druckschalters ist ein Schalter ein Bedienelement mit zwei - theoretisch auch mehreren - einrastenden Stellungen (Schaltkreis geschlossen/ unterbrochen bzw. Funktion ein-/ausgeschaltet) [SCHMIDTKE, 1989b], in Form eines Schiebe- oder Drehschalters besitzt ein Schalter oft mehrere diskrete Stellungen. Die Größe des Einstellbereichs beträgt bei Kipp- und Wippschaltern zwei bis drei Stellungen, bei Dreh- und Schiebeschaltern bis zu 24 Stellungen [RÜHMANN, 1993c]. Der wesentliche Vorteil eines Schalters ist darin zu sehen, dass der Benutzer erkennen und erfühlen kann, in welcher Position der Schalter steht [FÄRBER & FÄRBER, 1987].
- **Steller:** Unter einem Steller wird ein Bedienelement verstanden, mit dem eine kontinuierliche Einstellung möglich ist, also keine diskreten Stellungen vorhanden sind. In der Praxis ist es überwiegend so, dass Steller aufgrund von Rasterungen zur besseren Differenzierung der Stellung durchaus über eine endliche Anzahl von diskreten Stellungen verfügen.

Greif- und Bewegungsmerkmale

Greifmerkmale beziehen sich auf die Wechselwirkung der Hand und dem Bedienelement. Zur Betätigung von Bedienelementen im Kraftfahrzeug werden am häufigsten

- der **Kontaktgriff** mit einem Finger (bevorzugt Zeigefinger) sowie
- der **Zufassungsgriff** mit zwei oder drei Finger verwendet.

Eine vollständige Darstellung der Systematik der Greifarten ist z. B. in BULLINGER (1994) zu finden.

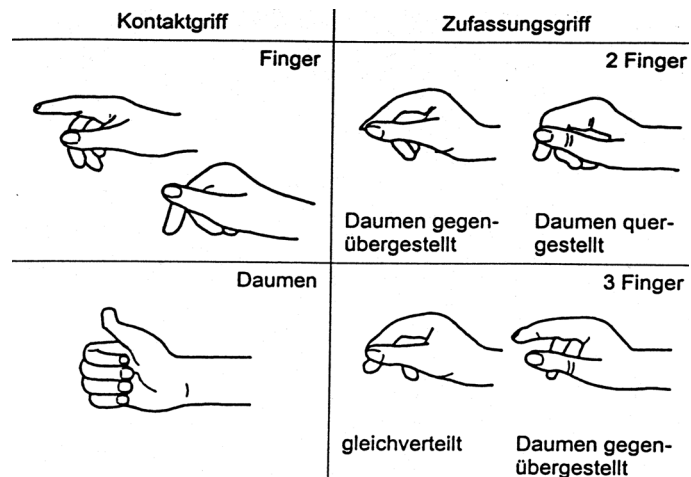


Abbildung 1.5: Relevante Greifarten

Bedienelemente können in Bezug auf den Benutzer in verschiedenen Positionen angebracht sein und sich bewegen. Grundsätzlich werden bezüglich der Bewegungsart des Bedienelements zwei Kategorien unterschieden:

- **Translatorisch betätigte Bedienelemente:** Ohne weitere Bezeichnung der Form werden hierbei die Begriffe Taster, Schalter und Steller verwendet. Auch Pedale und Griffe werden translatorisch betätigt. Bezüglich der Bewegung werden folgende Betätigungen unterschieden, wobei es sich beim Wippen und Kippen um angenähert translatorische Betätigungsbewegungen handelt:

- **Drücken:** senkrecht Aufbringen einer Kraft in Form eines Kontaktgriffs mittels eines Fingers (bevorzugt Zeigefinger) oder eines Fußes auf das Bedienelement
- **Schieben:** geführtes Bewegen des Bedienelements durch einen Zufassungsgriff mit zwei oder drei Fingern
- **Wippen:** Betätigungsbewegung entspricht dem Drücken; die Flächen des Bedienelements, welche die Druckkraft aufnehmen, sind drehbar gelagert.
- **Kippen:** Betätigungsbewegung entspricht dem Schieben; das ortsfeste Bedienelement besitzt dabei eine hervorstehende Form. Die Betätigungsrichtung ist nicht senkrecht, sondern parallel zu der Fläche, auf der sich das Bedienelement befindet.

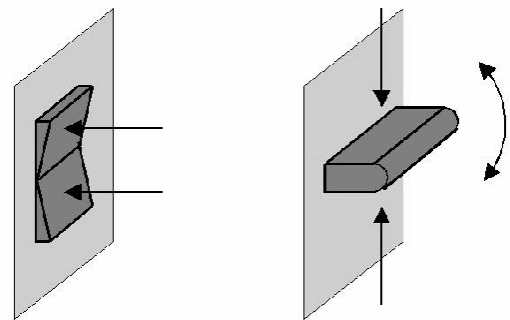


Abbildung 1.6: Wippen und Kippen

- **Rotatorisch betätigte Bedienelemente:** Wesentlicher Bestandteil der Bedienelementbezeichnungen ist das **Drehen** als deren Betätigungsbewegung. Dies erfolgt überwiegend mittels eines Zufassungsgriffs mit zwei oder drei Fingern. Zur Bezeichnung der Form werden gelegentlich zusätzlich die Begriffe Knebel (Positionscodierung möglich, mögliche Umdrehung <1) und Knopf (keine Positionscodierung, mögliche Umdrehung >1) verwendet.

Aus der Kombination der oben definierten Begriffe für die Funktion eines Bedienelements und dessen Bewegungsart ergeben sich folgende Bezeichnungen (s. Tabelle 1.1).

Bew.art \ Funktion	Funktion	Taster	Schalter	Steller
Transl.- Bew.	Drücken	Drucktaster, Pedal	Druckschalter	-
	Schieben	Schiebetaster	Schiebeschalter	Schiebesteller
	Ziehen	Zuggriff	Zug-/Druckgriff	-
angen.- Transl.- Bew.	Wippen	Wipptaster	Wippschalter	-
	Kippen	Kipptaster	Kippschalter	-
	Stellen	Stellhebel	Stellhebel	Stellhebel
Rotat.- Bew.	Drehen	Drehknebeltaster)*	Drehknebelschalter)*	Drehknebelsteller)*
		Drehknopftaster)*	Drehknopfschalter)*	Drehknopfsteller)* Drehrad

)*: Im alltäglichen Sprachgebrauch werden die Bezeichnungen Knebel und Knopf oft weggelassen.

Tabelle 1.1: Bezeichnungssystematik für Bedienelemente in Kraftfahrzeugen

Darüber hinaus existieren eine Reihe spezieller Bedienelemente, die sich häufig aus der Verbindung einzelner Bedienelemente ergeben:

- *Kreuzwippe*: entspricht einer Kombination aus zwei orthogonal angeordneten Kipptastern, über vier Tasten können vier Richtungen für eine Cursorbewegung codiert werden
- *Dreh-Druckknopfsteller* (entspricht der Bezeichnung „Dreh-Drücksteller“): Drehknopfsteller, der zusätzlich gedrückt werden kann
- *Einstellrad* (entspricht den Bezeichnungen „Rändelrad“ und „Reibrad“): Kontinuierliche Einstellung durch tangentiellen Zugriff
- *Lenkstockhebel*: Multifunktionaler Stellhebel am Mantelrohr

1.3 Fahrerinformationssysteme in Kraftfahrzeugen

Im Folgenden wird zunächst der Begriff des Fahrerinformationssystems für die weitere Arbeit definiert. Das zweite Unterkapitel gibt einen Überblick über heutige Lösungen. Abschließend wird aufgezeigt, unter welchen Randbedingungen zukünftige Entwicklungen zu gestalten sind. Die prinzipielle Problematik multifunktionaler Systeme führt zu einem ersten Hinweis auf den Lösungsansatz dieser Arbeit.

1.3.1 Begriffsdefinitionen

Der Begriff *Fahrerinformationssystem* (engl. *Driver Information System*) ist seit Jahren in der Literatur wie auch in der Praxis geläufig. PANIK ET AL. (1984, S. 93) verstehen darunter „ein leistungsfähiges Terminal eines fahrerunterstützenden Rechnersystems“. Für sie stehen sicherheitsrelevante Informationen im Vordergrund. HEINTZ ET AL. (1985) verwenden dagegen den Begriff *Central Information System (CIS)* als eine Kombination der Systeme Radio, Kassettenrecorder, Bordcomputer und Telefon. Funktionsneutral definieren FÄRBER & FÄRBER (1988, S. 180) ein *Dialogsystem* als „ein zentrales Bedienelement und ein damit interagierendes zentrales Anzeigeelement“. Das Anzeigenfeld dient dabei zur Rückmeldung des momentanen Dialogzustands und zur Meldung der

abgefragten Information. Diese Definition betont den interaktiven Charakter dieser Systeme. Auch der Begriff Multifunktionsanzeige- und Bediensystem (MFABS) existiert [KUHN, 1999].

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Fahrerinformationssystem folgendermaßen definiert:

*Unter einem **Fahrerinformationssystem** wird im Folgenden ein hoch integriertes System verstanden, bei dem Fahrerinformationen in einem zentralen Display mit einer gemeinsamen Bedieneinheit funktional zusammengefasst sind. Integriert sind dabei das Audiosystem, das Autotelefon, die Navigation, der Bordcomputer sowie eine unterschiedliche Anzahl weiterer Systeme. Die integrierte Funktionalität lässt sich auch unter dem Begriff **Sekundärfunktionen** zusammenfassen.*

Die Sekundärfunktionalität beinhaltet also keine Funktionen, die den Fahrer auf der Ebene der Fahrzeugstabilisierung und der Ebene der Bahnführung unterstützen sollen (vgl. Kapitel 1.1.2). Systeme dieser Art werden im Folgenden als *Fahrerassistenzsysteme* bezeichnet. Dieser ebenfalls geläufige Begriff unterstreicht die Aufgabe des betreffenden Systems, dem Fahrer bei der Fahraufgabe zu helfen. Hierunter werden u. a. Systeme wie Adaptive Cruise Control [z. B. WEINBERGER ET AL., 2001] oder Spurwechselassistenten [z. B. FASTENMEIER ET AL., 2001] verstanden. Systeme dieser Art sollen im Folgenden nicht betrachtet werden.

Der in der Praxis häufig verwendete Begriff *Bedien- und Anzeigekonzept* bzw. nur *Bedienkonzept* ist weit gefasst, mit der Zielrichtung, alle Einzelsysteme und –funktionen im Fahrzeug zu einem ganzheitlichen Interaktionskonzept zusammenzufassen [vgl. hierzu z. B. FÄRBER & MÜLLER, 2000]. Hierunter wird in der Fahrzeugentwicklung die gesamte Fahrer-Fahrzeug-Interaktion mit allen Schnittstellen verstanden. *Bedienen* bezieht sich hier generell auf den Vorgang der Informationseingabe, *Anzeigen* auf den Vorgang der Informationsausgabe.

1.3.2 Heutige Fahrerinformationssysteme

Heutige Fahrerinformationssysteme lassen sich im Wesentlichen in zwei Gruppen einteilen:

- **Integrierte Fahrerinformationssysteme:** Diese Systeme werden von Fahrzeugherstellern als Ausstattungsfeature angeboten und zeichnen sich dadurch aus, dass die verwendeten Anzeige- und Bedienelemente in der Instrumententafel bzw. Mitteldom des Fahrzeugs integriert sind. Sie verfügen über ein Farbdisplay. Die Bedienelemente können räumlich integriert sein (z. B. Mercedes-Benz S-Klasse, s. Abbildung 1.7) oder räumlich getrennt, wie dies beim BMW 7er (Abbildung 1.8) oder beim Audi A8 (Abbildung 1.9) gegeben ist. Die Bedienung erfolgt über einen Dreh-Druckknopfsteller oder eine Kreuzwippe als Multifunktionsbedienelement und einer oftmals großen Anzahl von peripher angebrachten Drucktasten. Im Fall des Touchscreens, wie wir es z. B. im Lexus vorfinden, sind Anzeige und Bedienung sogar physikalisch integriert (Abbildung 1.10).

Funktional integriert sind ein Navigationssystem mit dynamischer Routenführung, ein Audio-System und ein Mobiltelefon. Für die Komfort- und Klimafunktionen übernimmt oftmals das zentrale Display die Anzeigefunktion, die Temperatur-Vorwahl erfolgt aber nach wie vor direkt. Noch werden solche integrierten Fahrerinformationssysteme hauptsächlich in Fahrzeugen der oberen Mittelklasse und Luxusklasse

angeboten. Es ist aber eine eindeutige Entwicklung zur Verbreitung auch in günstigeren Fahrzeugsegmenten festzustellen.



Abbildung 1.7: Mercedes-Benz S-Klasse



Abbildung 1.8: BMW 7er



Abbildung 1.9: AUDI A8



Abbildung 1.10: Lexus SC430

▪ **Nicht-integrierte Fahrerinformationssysteme:**

Unter solchen Systemen werden Nachrüstlösungen des Zubehörmarkts verstanden. Es werden eine unüberschaubare Anzahl unterschiedlicher Geräte angeboten, die in ihrem Umfang hier nicht besprochen werden können. Als Anzeigemodul dient meistens ein nachträglich auf der Instrumententafel befestigtes Display. Bei Geräten mit DIN-Gehäuse kann das Display auch dort integriert sein bzw. es klappt sich auf. Als Anzeigefläche kann aber z. B. auch ein seitlich vom Dom angebrachter PDA dienen (s. Abbildungen 1.11 und 1.12). Die Funktionalitäts- und Gerätegrenzen verschwimmen endgültig, wenn ein Laptop in Verbindung mit einem Mobiltelefon im Fahrzeug zum Einsatz kommt.



Abbildung 1.11 und 1.12: Delphi/Palm-System

1.3.3 Zukünftige Entwicklungen

Die zukünftige Entwicklung von Fahrerinformationssystemen ist auf funktionaler Ebene geprägt durch eine **steigende Anzahl an Sekundärfunktionen**. In zukünftigen Fahrerinformationssystemen werden eine Reihe zusätzlicher Funktionen zur Anwendung kommen:

- **Unterhaltung:** Für das klassische Autoradio besteht die Entwicklung hin zum digitalen Rundfunk. Bei den Speichermedien werden neben neuen Audio-Datenträgern wie MP3 und Minidisk auch Datenträger mit zusätzlichem Video-Gehalt wie DVDs Verwendung finden. Soundeinstellungen werden noch ausgefeilter, Spiele und TV-Funktionalität werden hinzukommen.
- **Kommunikation/Information:** Kommunikationsfunktionen werden in Zukunft stark zunehmen, so dass man teilweise bereits von „Fahrerinformations- und Kommunikationssystemen“ spricht. Neben einem Mobiltelefon mit SMS-Funktionalität werden Büro-/Office-Funktionen verfügbar sein, die das Versenden und Empfangen von E-Mails, eine Adress- und Terminverwaltung und weitere PC-Anwendungen möglich machen. Über sog. Multi Channel Portale soll der ans Auto angepasste Zugang ins Internet möglich sein. Das Auto wird zur Kommunikationszentrale.
- **Navigation/Reisehilfen/Fahrhilfen:** Die dynamische Routenführung nützt aktuelle Verkehrsinformationen zur optimalen Zielführung. Weitere Navigationsfunktionen kommen hinzu wie etwa ein Online-Reiseführer, momentane Fahrzeuginformationen werden mitberücksichtigt. Neue Telematikdienste machen automatische Buchungen/Reservierungen möglich. Bis zu einem gewissen Maß wird eine individuelle Fahrzeugkonfiguration möglich sein.
- **Sicherheit:** Über GPS und Mobilfunk wird bei einem Unfall oder einer Panne automatisch Hilfe benachrichtigt, eine automatische Telediagnostik wird möglich.

Die Entwicklung geht letztendlich hin zu einem „intelligenten Fahrzeug“, das ganzheitlich in die weltweiten Netzstrukturen integriert ist.

1.3.4 Forderungen des Designs und der Ergonomie

Der steigenden Anzahl von Bedienfunktionen stehen Forderungen aus dem Design und der Ergonomie entgegen:

- **Fahrzeugdesign und Marketing** fordert eine Reduzierung sichtbarer Bedienelemente. Sei es, weil sich Kunden durch die hohe Anzahl und Komplexität der Anzeige- und Bedienelemente zum Teil überfordert fühlen. Zum anderen erschwert eine hohe Anzahl an Bedienelementen die Gestaltung eines „aufgeräumten“ Cockpits mit hoher Wertanmutung. Nach den Wünschen des Fahrzeugdesigns soll der Innenraum nicht Technik im Überfluss ausstrahlen, sondern diese verbergen, sie im Hintergrund agieren lassen.
- Ziel der **Ergonomie** bei der Gestaltung zukünftiger Mensch-Maschine-Schnittstellen im Fahrzeug ist die Minimierung der visuellen Ablenkung und der kognitiven Beanspruchung des Autofahrers. Große Bedeutung kommt hierbei der optimierten Positionierung von Anzeige und Bedieneinheit zu. Das Informationsdisplay sollte in einer mittleren Position möglichst weit in Richtung Scheibenwurzel untergebracht sein, integriert in die Instrumententafel. Wie Untersuchungen von SCHATTENBERG (2002) u. a. gezeigt haben, ist die Blickzuwendung auf das Display während der Bedienung bei dieser Displayposition geringer und somit die Fahraufgabe am wenigsten beeinträchtigt. Die Bedieneinheit sollte in optimaler Greifposition, also etwa an der Stelle des heutigen Gangwahlhebels positioniert sein.

Diese Forderungen können nur durch die Entwicklung multifunktionaler Systeme erfüllt werden, die eine Trennung von Bedienung und Anzeige vorsehen. Gleichzeitig wird die Anzeige auf einem zentralen Informationsdisplay konzentriert. Zur Interaktion mit diesen Fahrerinformationssystemen kommen Multifunktionsbedienelemente zum Einsatz. Vereinzelt sind solche Systeme bereits in Serienfahrzeugen umgesetzt (s. Abbildungen

1.8, 1.9 und 1.13). So werden mit dem „iDrive“ von BMW bis zu 700 Funktionen [McCANN, 2002] bedient.

Die räumliche Trennung von Bedienung und Anzeige bringt jedoch auch Nachteile mit sich. Die Kehrseite dieser neuen Systeme ist, dass durch die Darstellung sämtlicher Funktionen auf einem Display eine hierarchische Gliederung der Funktionalität notwendig wird. Funktionen, die ehemals direkt über einen fest zugeordneten Schalter bedient wurden, müssen nun z. T. umständlich in Untermenüs gesucht werden, was wiederum die kognitive Belastung des Fahrers erhöht. Die direkte Zuordnung einer Funktion zu einem Bedienelement geht verloren. Der visuelle Sinneskanal, den der Fahrer permanent für die Fahraufgabe benötigt, wird zusätzlich für die Aufnahme der auf dem Display dargestellten Information gebraucht.

Die Zusammenfassung der Bedienung in einem Multifunktionsbedienelement an einer ergonomisch günstigen Position hat zwar zur Folge, dass dieses komfortabel und ohne Blickabwendung auf das Element – also quasi „blind“ – bedient werden kann, dass jedoch dadurch auch die Ortskodierung der ehemals einzelnen Taster und Schalter verloren geht. Des Weiteren konnte der Fahrer anhand der Form und Ausprägung der Bedienelemente oftmals „erspüren“, um welches Stellteil es sich dabei handelte. FÄRBER & FÄRBER (1988) weisen bereits auf diesen Nachteil von Multifunktionsbedienelementen hin. Durch die nicht mehr vorhandene direkte Zuordnung zu einer Funktion, kann die Form keinen Hinweis mehr auf die Funktion geben. Der aktuelle Systemzustand ist an der Stellung des Bedienelements ebenfalls nicht zu erkennen. Diese Informationen kommen bei der Verwendung eines Multifunktionsbedienelements abhanden, da dieses sich immer gleich anfühlt, unabhängig davon, in welchem Kontext damit bedient wird.

Diese Problematik macht den Handlungsbedarf auf diesem Gebiet und auch den Lösungsansatz dieser Arbeit deutlich. Der visuelle Sinneskanal des Fahrers ist überlastet, die haptischen Wahrnehmungsfähigkeiten des Menschen zur Informationsaufnahme bleiben weitgehend ungenutzt. Wie bereits eingangs erwähnt, soll im Rahmen dieser Arbeit versucht werden, durch die Verwendung eines programmierbaren aktiven haptischen Bedienelements den haptischen Sinneskanal zur Informationsübertragung zwischen Fahrzeug und Fahrer stärker zu nutzen. Der visuelle Sinneskanal soll dadurch entlastet werden. Das nächste Kapitel befasst sich deshalb mit den wissenschaftlichen Grundlagen der haptischen Informationsübertragung.



Abbildung 1.13: BMW 5er

2 Betätigungshaptik

Die vorliegende Arbeit handelt von der Optimierung der haptischen Mensch-Maschine-Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrerinformationssystem. In Kapitel 2.1 wird zunächst die Seite des Menschen betrachtet. Der Ansatz dieser Arbeit ist es, den Kraftfahrer dahingehend zu entlasten, dass der haptische Sinneskanal verstärkt für die Bedienung eines Fahrerinformationssystems genutzt wird. Dafür ist es notwendig, die sensorischen und motorischen Fähigkeiten des Menschen in Bezug auf den haptischen Wahrnehmungskanal genauer zu betrachten. Die relevanten Grundlagen werden hierfür beschrieben.

Kapitel 2.2 beleuchtet die maschinelle Seite der Schnittstelle. Es werden die haptischen Eigenschaften von Bedienelementen definiert sowie relevante haptische Gestaltungsrichtlinien behandelt, die – soweit dies möglich ist – mit Untersuchungen belegt werden.

2.1 Physiologische Aspekte

Wir betrachten nun zunächst die relevanten Eigenschaften der Seite Mensch der definierten Schnittstelle, der haptischen Wahrnehmung sowie der motorischen Fähigkeiten des Menschen. „Bedienelemente im Kraftfahrzeug werden bislang primär über den haptischen Kanal in Gang gesetzt. Teile des Bewegungsapparates werden aktiv, um letztlich mit einem oder mehreren Fingern (...) die gewünschte Wirkung zu erzielen“ [FÄRBER & FÄRBER, 1987, S. 166]. Berührungsempfindungen (*tactual perceptions*) sind dabei Voraussetzung für nahezu alle motorischen Aktivitäten [LOOMIS & LEDERMAN, 1986, in ZWISLER, 1998]. Die sensorischen und motorischen Fähigkeiten des Menschen unter Berücksichtigung der Besonderheiten der menschlichen Wahrnehmung [HEINEKEN, 1990] müssen also Grundlage für die Entwicklung ergonomischer Bedienelemente bzw. Bedienkonzepte sein. Dies gilt für alle Modalitäten und soll speziell für den haptischen Sinneskanal in diesem Kapitel dargelegt werden.

Ausgehend von psychophysischen Grundlagen soll beginnend auf die haptische Wahrnehmung des Menschen eingegangen werden. Es folgt eine Beschreibung der motorischen Fähigkeiten und des in Bezug auf die Haptik sehr engen Zusammenspiels von Sensorik und Motorik. Das Kapitel endet mit einer Zusammenfassung der über den haptischen Sinneskanal übertragbaren Informationen.

2.1.1 Psychophysische Grundlagen

In diesem Unterkapitel sollen zunächst knapp die Beziehungen erläutert werden, die zwischen Erregungen von Sinnessystemen und Empfindungen bestehen. Des Weiteren wird kurz auf die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten eingegangen, die der Funktion von Sinnessystemen zugrunde liegen.

Reize erzeugen an den Zellmembranen von Sensoren lokale Potenzialänderungen, die zur Erregung afferenter sensorischer Nervenfasern führen. Die Erregungen gelangen in sensorische Gehirnzentren, werden dort verarbeitet und induzieren subjektive Sinnesindrücke oder Empfindungen. Durch Deutung wird aus einer Empfindung eine Wahrnehmung. Sie sind keine passiven Bilder der Umwelt, sondern kommen durch aktive Leistungen des Gehirns zustande [SCHMIDT & THEWS, 1995].

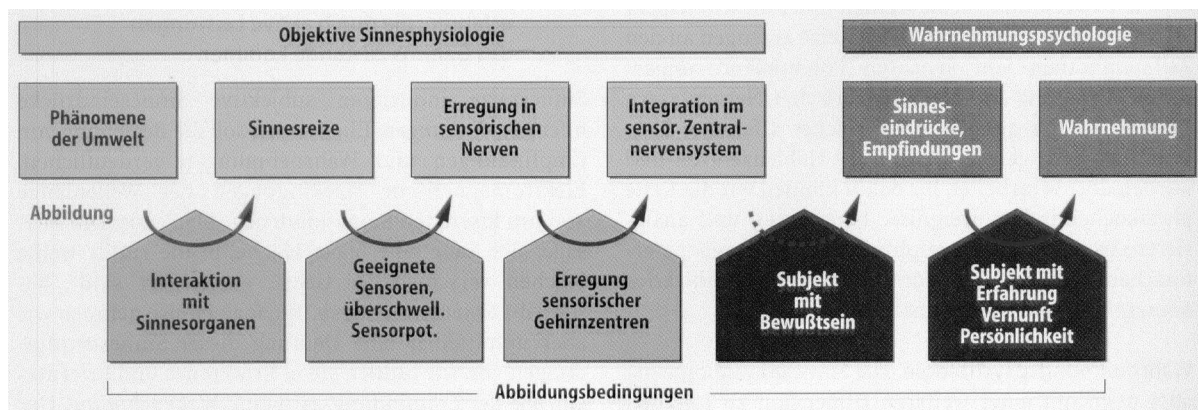


Abbildung 2.1: Schema der Abbildungsverhältnisse in der Sinnesphysiologie [nach SCHMIDT & THEWS, 1995]

Sinnesorgane haben eine besondere Empfindlichkeit für spezifische Reize; diese nennt man adäquate Reize [SCHMIDT & THEWS, 1995].

Die Psychophysik beschäftigt sich mit der Zuordnung von Empfindungsintensitäten zu physikalischen Reizparametern. Ein klassisches Konzept der Psychophysik ist das der sensorischen (Intensitäts-)Schwelle [SCHMIDT & THEWS, 1995]:

- **Reizschwelle** oder **Absolutschwelle**: kleinste Reizintensität, die gerade noch eine Empfindung hervorruft
- **Unterschiedsschwelle** oder **JND (Just Notable Difference)**: Betrag, um den ein Reiz größer sein muss als ein Vergleichsreiz, damit er gerade eben merklich als stärker empfunden wird

Unter psychophysischen Beziehungen versteht man Theorien, die kontinuierliche Beziehungen zwischen Reiz- und Wahrnehmungsintensitäten herstellen [SCHMIDT & THEWS, 1995]. Ein psychophysisches Gesetz ist eine mathematische Formulierung des Zusammenhangs zwischen Reizgröße (S) und Empfindungs- bzw. Wahrnehmungsstärke (R): $R = f(S)$ [KEBECK, 1994]. Die drei wichtigsten Gesetze sind:

- Das **WEBERSche Gesetz** besagt, dass das Verhältnis von Reizzuwachs ΔS zu Anfangsreiz S , die relative Unterschiedsschwelle konstant ist [SCHÜTZ, 1971]: $\frac{\Delta S}{S} = k$.

- „Das Ziel des **FECHNERSchen Gesetzes** ist es, einen mathematischen Zusammenhang zwischen objektiven Reizstärken (S) und subjektiven Empfindungsstärken (N) zu formulieren.“ [KEBECK, 1994, S. 255]. Das Gesetz lautet $N = c \cdot \log S_n + C$. S_n ist dabei ein gegebener Reizwert, die multiplikative Konstante $c = 1/\log(1+k)$ und die additive Konstante $C = -c \cdot \log S_0$ hängen von der WEBERSchen Konstanten k und der Absolutschwelle S_0 ab.

- Das **STEVENSsche Gesetz** beschreibt den Zusammenhang zwischen Wahrnehmungsstärke R und Reizgröße S mit Hilfe eines Potenzgesetzes: $R = c \cdot S^n$,

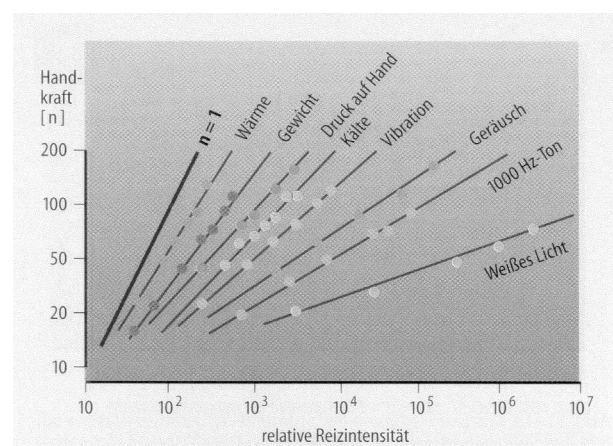


Abbildung 2.2: Einschätzung der Empfindungsintensität auf einer STEVENSschen Skala in Abhängigkeit von der Reizstärke [nach SCHMIDT & THEWS, 1995]

wobei R ein Skalenwert auf einer subjektiven Verhältnisskala ist [KEBECK, 1994]. Der Koeffizient n ist dabei ein Maß für die Empfindungsintensität verschiedener Sinnesmodalitäten, wie Abbildung 2.2 zeigt.

2.1.2 Haptische Wahrnehmung

2.1.2.1 Begriffsbestimmung

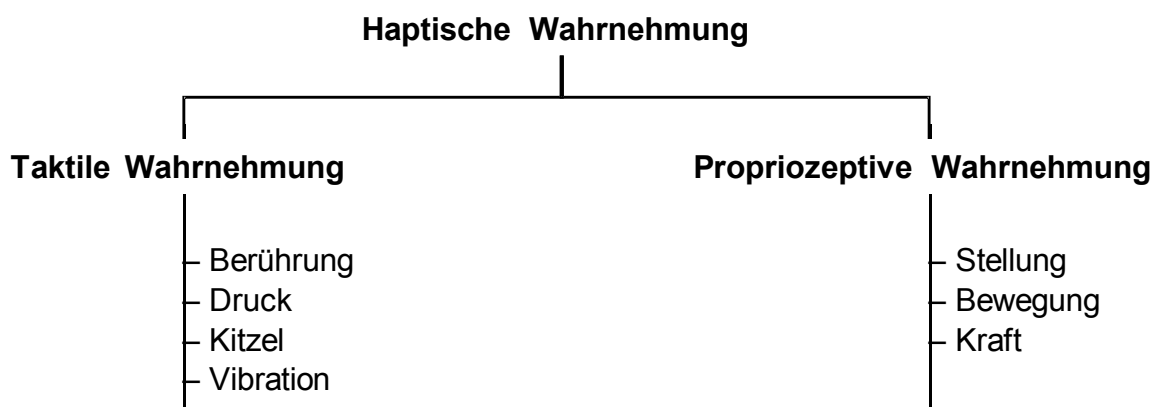
Der Begriff **Haptik** stammt etymologisch vom griechischen *haptain* und bedeutet ursprünglich etwas, das mit der Wahrnehmung durch Berühren zu tun hat. Unter **Haptik** wird heutzutage „die Gesamtheit aller Tastwahrnehmungen; zum Tastsinn gehörig“ verstanden [DORSCH, 1994], wobei wiederum der Begriff *Tastempfindung* als eine „durch die Haut (Fingerspitzen) vermittelte Empfindung für Oberflächen von Körpern, räumliche Entfernungen, in Verbindung mit Gelenkempfindungen“ definiert wird [DORSCH, 1994].

Parallel dazu wird der Begriff **taktill** häufig synonym verwendet und in den gebräuchlichen Wörterbüchern synonym definiert. Er bezieht sich jedoch hauptsächlich auf Empfindungen, die durch passive Berührung hervorgerufen werden [GIBSON, 1966].

Unter **propriozeptiver** Wahrnehmung wird in der Wahrnehmungspsychologie und in der Medizin eine aus dem eigenen Körper vermittelte Wahrnehmung (z.B. aus Muskeln, Sehnen, Gelenken) verstanden, wo hingegen die **kinästhetische** Wahrnehmung nur auf Muskelempfindungen bezogen wird (rein bewegungsempfindliche Wahrnehmung) [GOLDSTEIN, 1997].

Im Rahmen dieser Arbeit wird haptische Wahrnehmung folgendermaßen definiert:

*Unter **haptischer Wahrnehmung** wird die **taktill-propriozeptive Wahrnehmung** verstanden, welche sowohl die Hautsinne (**taktile Wahrnehmung**) als auch die Haltungssinne (**propriozeptive Wahrnehmung**) und die damit verbundenen Wahrnehmungen umfasst. Der Begriff der Hautsinne ist gleichbedeutend mit dem Begriff der Oberflächensensibilität. Der Begriff der Tiefensensibilität/kinästhetische Sensibilität wird synonym mit dem Begriff der Haltungssinne verwendet.*



Aus physiologischer Sicht gehört zu den Hautsinnen (Somatosensorisches System) neben der taktilen Wahrnehmung auch die **Temperatur-, Chemo- und Schmerz-wahrnehmung**. Bei erstem informieren Thermorezeptoren über Temperaturveränderungen. Die anatomischen Substrate sind freie Nervenendigungen [KEIDEL, 1985]. Dabei erre-

gen auch chemische Substanzen wie z. B. Menthol die Rezeptoren. Schmerz und Jucken werden über Nocirezeptoren wahrgenommen. Auch sie entsprechen anatomisch freien Nervenendigungen und sprechen auf Reizung durch starken Druck, extreme Temperaturen oder ätzende Stoffe an, die die Haut schädigen können [GOLDSTEIN, 1997; KEIDEL, 1985; SCHÜTZ, 1972]. Auf diese Wahrnehmungsprozesse wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

2.1.2.2 Taktile Wahrnehmung

Die taktile Wahrnehmung des Menschen ist das Ergebnis einer Kette von Ereignissen. In der menschlichen Haut wurden insgesamt vier Typen von Mechanosensoren gefunden, die als Rezeptoren Reize wahrnehmen. Es handelt sich dabei um die *SA-I*, *SA-II*, *RA*- und *PC*-Sensoren [SCHMIDT & THEWS, 1995]. Ihr wesentlicher Unterschied liegt in der zeitlichen Veränderung ihres Antwortverhaltens auf einen Standardreiz. Man nennt diese Eigenschaft die *sensorische Adaption*:

- **SA-I- und SA-II-Sensoren** adaptieren nur langsam („*slowly adapting*“) und liefern daher auch während einer konstanten Reizdarbietung Signale. SA-Sensoren liefern Informationen für Empfindungen wie Druck und Vibration, wobei SA-I-Sensoren auf Reize senkrecht zur Hautoberfläche und SA-II-Sensoren auf Dehnung der Haut ansprechen. In der unbehaarten Haut heißen die *SA-I-Sensoren* *Merkel-Zellen* und die *SA-II-Sensoren* *Ruffini-Körperchen* (s. Abbildung 2.3).
- **RA-Sensoren** sind schnell adaptierende Mechanosensoren („*rapidly adapting*“). Sie sprechen auf Geschwindigkeit an und können so am besten Bewegungen über die Haut wahrnehmen. In der Haut nennt man die RA-Sensoren *Meissner-Körperchen* (s. Abbildung 2.3).
- **PC-Sensoren** („*Pacini Corpuscle*“) sind sehr schnell adaptierende Mechanosensoren und reagieren daher nur auf Geschwindigkeitsveränderungen der Hautdeformation, nehmen also Beschleunigungen und Vibrationen wahr. Wie der Name schon sagt, werden die PC-Sensoren als *Pacini-Körperchen* bezeichnet (s. Abbildung 2.3).

Wie Abbildung 2.3 zeigt, liegen die Sensoren unterhalb der äußersten Schicht der Epidermis oder Oberhaut (verhornte, abgestorbene Zellen der Hautoberfläche), und in der Schicht unmittelbar darunter, der Dermis oder Lederhaut. [GOLDSTEIN, 1997]:

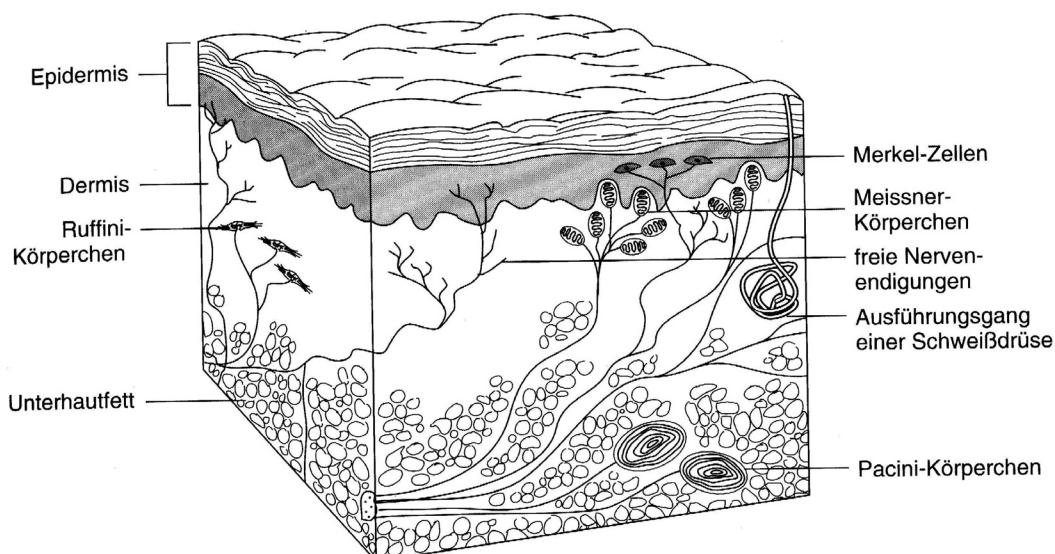


Abbildung 2.3: Querschnitt durch unbehaarte Haut [nach GOLDSTEIN, 1997]

Ist der empfundene Reiz größer als die jeweilige Reizschwelle, wird ein entsprechendes Signal an die afferenten Nervenzellen gesendet. Bei komplexen Reizen, wie sie z.B. beim Tastvorgang mit bewegten Fingern entstehen, werden alle vier Arten von Mechanosensoren erregt. Nervenzellen 2. Klasse übertragen das Signal in die Thalamus-Regionen des Gehirns, wo Nervenzellen 3. Klasse die Information zum somatosensorischen Projektionsfeld (S1) des Kortex übertragen, wo korrespondierende Empfindungen wie Druck, Temperatur oder Schmerz registriert sind. Die Wahrnehmung von Tastereignissen beruht auf der ständigen schnellen Auswertung aller Entladungen durch das Zentralnervensystem [SCHMIDT & THEWS, 1995].

Die taktile Wahrnehmung des Menschen besitzt eine Reihe spezieller psychophysischer Eigenschaften, die im Rahmen dieser Arbeit interessant erscheinen:

- **Räumliches Auflösungsvermögen (Innervationsdichte):** Die taktile Wahrnehmung des Menschen variiert stark zwischen einzelnen Körperstellen. Auf Hand, Fußsohle, Lippen und Sexualorganen ist die Wahrnehmungsfähigkeit am größten, wo hingegen sie am Rücken und Gesäß relativ gering ist. Am empfindlichsten ist die taktile Wahrnehmung in den Fingerspitzen. Die Sensitivität der Finger drückt sich auch darin aus, dass den Handrezeptoren fast ein Viertel der Oberfläche des Kortex zugeordnet ist [SCHMIDT & THEWS, 1995, S. 231]. Für das räumliche Auflösungsvermögen der taktilen Wahrnehmung ist die Innervationsdichte, d.h. die Zahl der afferenten Fasern pro cm^2 der Hautfläche verantwortlich. Diese reicht von $0,1 \text{ mm}^{-1}$ an der Innenhandfläche bis zu $0,6 \text{ mm}^{-1}$ an den Fingerspitzen [SCHMIDT & THEWS, 1995]. Die Unterschiedsschwelle für zwei Punkte ist kleiner, wenn die Reize nacheinander dargeboten werden, als wenn sie gleichzeitig appliziert werden. Wärmere Umgebungstemperatur verbessert das räumliche Auflösungsvermögen, mit steigendem Alter lässt es nach [BURDEA, 1996]. Maximales räumliches Auflösungsvermögen ist mit einer hohen kognitiven Belastung verbunden. Des Weiteren kann es durch Training verbessert und durch Ermüdung verschlechtert werden [ZWISLER, 1998].
- **Absolute Wahrnehmungsschwelle:** SHERRICK UND CRAIG (1982, in BURDEA, 1996) ermittelten eine minimale Berührungsenergie, die taktil wahrgenommen wird. Sie beträgt $150 \text{ mg} = 1,4715 \text{ mN}$ für die Handfläche und $80 \text{ mg} = 0,7848 \text{ mN}$ für die Fingerspitzen.
- **Vibrationsschwellen:** Periodische Wechseldrücke im Frequenzbereich von 10 bis 1000 Hz (*vibrotaktile Reize*) werden frequenzabhängig wahrgenommen. Im optimalen Frequenzbereich liegt der Schwellenwert bei einer Schwingungsamplitude der Haut von etwa 200 Hz [KEIDEL, 1985].
- **Eben-merklicher Unterschied (WEBER-Quotient):** Dieser eben-merkliche Unterschied (vgl. Abschnitt 2.1.1) beträgt für Druckstimulationen 0,15 (SPRENG, 1989; TAN ET AL., 1994, in BURDEA, 1996). Er ist abhängig von der Größe der Kontaktfläche sowie der Körperregion.
- **Zeitliches Auflösungsvermögen:** Die minimale Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Reizen, die gerade noch als zwei separate Reize wahrgenommen werden, beträgt ungefähr 5 msec. Dieser Wert ist wesentlich geringer als der entsprechende Wert für das Auge (25 msec) [BURDEA, 1996].
- **Bandbreite:** Unter der Bandbreite der taktilen Wahrnehmung wird die Frequenz verstanden, mit der adäquate Reize wahrgenommen werden. Die taktile Wahrnehmung hat eine Bandbreite von 0 bis 400 Hz. Sehr feine Wahrnehmungen, wie etwa die Textur einer Oberfläche, erfordern eine sehr viel höhere Bandbreite (bis zu 5000 bis 10000 Hz) [BURDEA, 1996].

2.1.2.3 Propriozeptive Wahrnehmung

Unter propriozeptiver Wahrnehmung (Tiefensensibilität, kinästhetische Sensibilität) wird die Wahrnehmung der Stellung und Bewegung des Körpers verstanden. Sie besitzt drei Qualitäten: den Stellungs-, den Bewegungs- und den Kraftsinn [SCHMIDT & THEWS, 1995]. Eine Vielfalt und Vielzahl von Mechanosensoren befinden sich in Muskelspindeln, Gelenkkapseln und Sehnen, aber auch in der Haut und im viszeralem System (Eingeweide). Ihre Meldungen werden im zentralen Nervensystem zu den komplexen Wahrnehmungen der Körperstellung und –bewegung integriert. Die Sensorsysteme für Muskellänge, Sehnendehnung, Gelenkstellung und anderer Parameter der Lage und Bewegung unseres Körpers induzieren dabei keine bewussten Empfindungen, sie wirken vielmehr an der Regelung physiologischer Prozesse mit.

Für die drei Qualitäten der propriozeptiven Wahrnehmung erscheinen folgende Aussagen über deren psychophysische Eigenschaften relevant:

- Das **Auflösungsvermögen der Gelenkstellungen (Stellungssinn)** bestimmt die Genauigkeit, wie wir unsere Körperposition kontrollieren. TAN ET AL. (1994, in BURDEA, 1996) ermittelten folgende eben-merkliche Unterschiede in der Wahrnehmung (Position JNDs) von Gelenkstellungen:

Gelenk	Finger	Hand	Ellenbogen	Schulter
Position JNDs	2,5°	2,0°	2,0°	0,8°

Erwartungsgemäß nimmt die Genauigkeit mit der Größe des Gelenks zu. Die sensorische Auflösung des Handgelenks ist besser als die der Fingergelenke.

- Die **Wahrnehmungsschwelle für Bewegungen (Bewegungssinn)** des Schultergelenks beträgt 0,2 – 0,4 Grad (bei 0,3 Grad/s), während die Schwelle für eine Bewegung eines Fingergelenks 1,0 – 1,3 Grad (bei 12,5 Grad/s) ist [SCHMIDT & THEWS, 1995, S. 224]. Auch hier steigt die sensorische Genauigkeit mit der Größe des Gelenks.
- Mit dem **Kraftsinn** kann die Schwere von Gewichten abgeschätzt werden, wenn wir diese mit der Hand hochhalten. Es lassen sich so Gewichtsunterschiede zwischen 3% und 10% feststellen. Wenn jedoch die Hand, mit der ein Gewicht geschätzt werden soll, auf einer Unterlage ruht, wird diese Schätzung deutlich ungenauer [SCHMIDT & THEWS, 1995].
- Die **Bandbreite** der propriozeptiven Wahrnehmung beträgt 20 bis 30 Hz [BURDEA, 1996].

Zusammenfassend ist zu diesen Untersuchungen zu ergänzen, dass die ermittelten Schwellenwerte wichtige Informationen über die menschliche Wahrnehmung liefern, in der technischen Anwendung aber weit größere Werte Anwendung finden. Hier soll die haptische Information nicht nur eben merklich, sondern möglichst deutlich wahrnehmbar sein.

2.1.3 Motorische Fähigkeiten

Das mechanische System des Menschen besteht aus dem Skelett- und dem Muskelsystem. Die Knochen sind durch Gelenke verbunden. Gelenke können bis zu drei Freiheitsgrade besitzen. Fingergelenke haben einen, das Handwurzelgelenk hat zwei Freiheitsgrade [BULLINGER, 1994].

Das menschliche Motoriksystem generiert physikalische Kräfte als ein Produkt muskulärer Aktivität. Dabei wird zwischen statischer und dynamischer Muskelarbeit unterschieden. Für eine ausführliche Erklärung der biomechanischen und funktionellen Gesichtspunkte des menschlichen Skelett- und Muskelsystems s. z. B. ROHMERT und JENIK, 1993.

Im Weiteren werden für diese Arbeit relevante Aspekte der motorischen Fähigkeiten des Menschen besprochen:

Greifraum: Als Wirkraum des Hand-Arm-Systems (= Greifraum) wird jener Bereich bezeichnet, in dem Gegenstände mit der Hand berührt, gegriffen und bewegt werden können [BULLINGER, 1994]. Dabei wird zwischen dem anatomisch und dem physiologisch maximalen Greifraum sowie dem kleinen Greifraum unterschieden, welcher mit unbewegtem Oberkörper und bequem herabhängenden Oberarmen von den Unterarmen umfahren werden kann [BULLINGER, 1994]. Im Folgenden ist der kleine Greifraum gemeint.

Bewegungsumfang: Dieser wird durch die maximal möglichen Gelenkausschläge festgelegt, wie Abbildung 2.4 für Hand und Finger zeigt. Für Bedienvorgänge ist die Normalstellung des Gelenks anzustreben, Zwangshaltungen mit maximalen Gelenkausschlägen sollten vermieden werden.

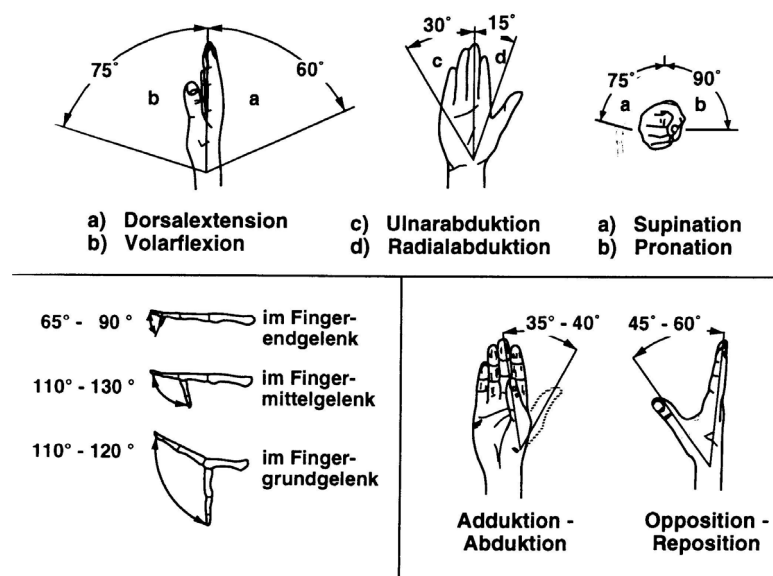


Abbildung 2.4: Bewegungsbereiche von Hand und Finger [nach BULLINGER, 1994]

Greifart: Wie bereits in Kapitel 1.2.3 besprochen, erfolgt die Bedienung von Multifunktionsbedienelementen vorwiegend durch einen Zufassungsgriff mit zwei oder drei Fingern, die Betätigung eines Drucktasters mittels eines Kontaktgriffs. HAJIAN & HOWE [1996, in ZWISLER, 1998] betrachteten den genauen Ablauf der Interaktion zwischen den Fingern und einem Objekt. Sie unterscheiden dabei vier Phasen: die Kontaktphase, das Ergreifen, das Manipulieren und den mechanischen Widerstand. Wichtig hierbei ist, dass bei vielen Aufgaben die Komplementarität von Armen und Händen genutzt wird.

Kraftausübung: „Als Maximalkraft wird eine (...) unter Isometriebedingungen ermittelte maximal mögliche Aktionskraft verstanden.“ [ROHMERT, 1993, S. 477]. Die Ergebnisse der Maximalkraftmessungen sind in Normen, sog. Kräfteatlanten und Kräftetabellen dokumentiert [z. B. in DIN 33411; SCHMIDTKE, RÜHMANN, 1989]. Dabei ist zu beachten, dass der Mensch nur für kurze Zeitabschnitte diese Maximalkräfte aufbringen kann (**Kraftnachgiebigkeit**). Maximale Körperkräfte haben für die Gestaltung der Mensch-

Maschine-Schnittstelle in vorliegendem Kontext keine Bedeutung. Sie stellen jedoch eine natürliche Obergrenze für die empfohlenen Betätigungskräfte für Bedienelemente dar, auf welche in Kapitel 2.2.2 eingegangen wird.

Richtungsabhängigkeit: Aufgrund von Eigenheiten in der Anatomie des Hand-Arm-Systems sind die ausgeübten Kräfte richtungsabhängig. So ist bekannt, dass Bewegungen zum Körper hin (Volarflexion) leichter auszuführen sind als Bewegungen vom Körper weg. „Für die über das Handgelenk übertragenen Kräfte gilt die Gesetzmäßigkeit, dass in Richtung der Handlängsachse größere Kräfte als in Richtung der Handnormalachse und hier wieder größere Kräfte als in Richtung der Handquerachse übertragen werden können.“ [BULLINGER, 1994, S.320]. Dabei hängen haptische Wahrnehmung und Kraftausübung eng miteinander zusammen. So führte KEYSON (1996) Experimente zur Unterscheidungsfähigkeit von Kräften durch, die von einem in zwei Freiheitsgraden beweglichen Trackball produziert werden und über eine Markierung mit dem Zeigefinger der rechten Hand wahrgenommen werden. Er kommt – wie eine Reihe anderer Personen vor ihm – zu dem Ergebnis, dass sich die haptische Wahrnehmung des Menschen in Abhängigkeit der Richtungen stark unterscheidet. Er führt auf, dass bereits APPELLE (1972) und LEHELDT (1988, beide nach KEYSON, 1996) Unterschiede in der Wahrnehmung horizontaler, vertikaler und diagonaler Richtungen nachgewiesen haben. KRUEGER (1982, nach KEYSON, 1996) konnte nachweisen, dass die menschlichen Finger unterschiedliche Gegenkräfte bei einem Stoß nach links wie bei einem Stoß nach rechts produzieren.

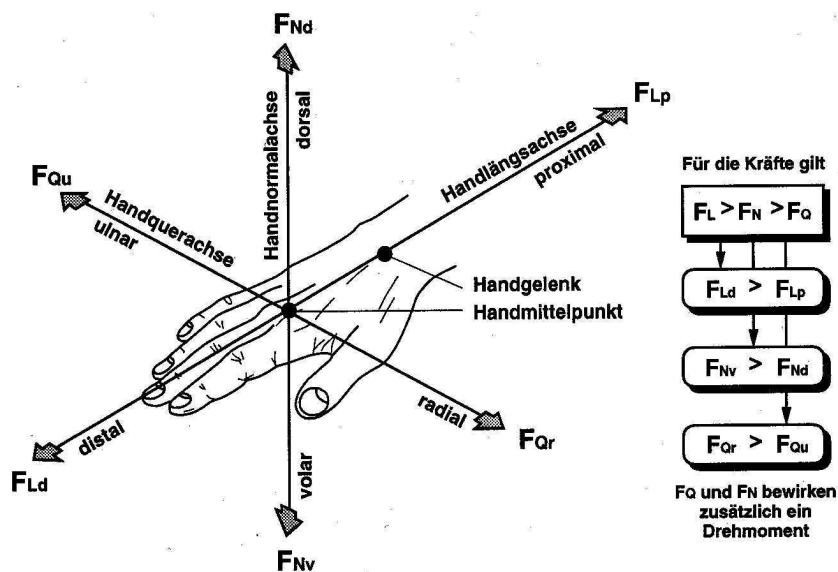


Abbildung 2.5: Gesetzmäßigkeiten der über das Handgelenk übertragenen Kräfte (gestreckter Arm) [nach BULLINGER, 1994]. In Richtung der Handlängsachse (F_L) können größere Kräfte als in Richtung der Handnormalachse (F_N) und hier wieder größere Kräfte als in Richtung der Handquerachse (F_Q) übertragen werden.

Auch bei den Fingerkräften gibt es große Richtungsunterschiede. So sind die Zugkräfte mehr als doppelt so groß wie die Druckkräfte [SCHMIDTKE, RÜHMANN, 1989]. Des Weiteren kann der Daumen wesentlich größere Kräfte aufbringen als andere Finger.

Genauigkeit der Kraftausübung: SRINIVASAN und CHEN (1993, in BURDEA, 1996) untersuchten, wie genau Versuchspersonen mit den Fingerspitzen Kräfte ausüben können. Sie variierten „Ziel-Kräfte“ von 0,25 N bis 1,5 N in zehn Schritten. Die momentan ausgeübte Kraft wurde visuell angezeigt. Die absolute Fehlerrate betrug relativ konstant über den ganzen Bereich unter 5 %. Dies zeigt, dass der Mensch sehr differenziert Kräfte ausüben kann. JANDURA und SRINIVASAN (1994, in BURDEA, 1996) untersuchten die Genauigkeit der Ausübung von Drehmomenten. Dabei wurde eine Art Schraubenzieher mit dem Daumen und dem Zeigefinger gegriffen. Hier waren erwar-

tungsgemäß die Auflösungsfehler größer. Jedoch kann auch die Drehung des Handgelenks sehr präzise durchgeführt werden, wie Messungen der Koordinationsleistungen des Menschen zeigen [SCHMIDTKE, 1994].

Wie wichtig in diesem Zusammenhang das Vorhandensein einer Auflage für den Arm ist, verdeutlicht die Tatsache, dass das natürliche Gewicht der beiden menschlichen Arme mit etwa 50 – 100 N (5. Perzentil Frau – 95. Perzentil Mann) den Schultergürtel direkt belastet [DIEBSCHLAG ET AL., 1995]. Inwieweit hohe Betätigungskräfte oder weite Betätigungswege wiederum Rückwirkungen auf die Sitzhaltung haben, wird gegenwärtig im Rahmen von Forschungsprojekten zur Analyse haltungsbeeinflussender Faktoren untersucht.

2.1.4 Zusammenspiel von Sensorik und Motorik

Haptische Wahrnehmung und motorische Kontrolle sind eng miteinander verknüpft. So ist die propriozeptive Wahrnehmung stark an bewussten und unbewussten Aufgaben der Motorik beteiligt. Die Motorik wird aufgrund von Rückmeldungen aus der Somatosensorik, dem Gleichgewichtsorgan und dem visuellen System kontinuierlich und automatisch so abgestimmt, dass die Zielvorgabe erreicht wird [SCHMIDT & THEWS, 1995]. Der Mensch nützt also eine Kombination aus räumlicher und kinästhetischer Wahrnehmung für die motorische Kontrolle.

GIBSON vertritt in seiner Wahrnehmungstheorie die Auffassung, dass die Wahrnehmung selbst ein grundsätzlich aktiver Prozess zur Bestimmung von Invarianzen in den wahrgenommenen Reaktionen der Umwelt auf unsere Aktionen sei [ZWISLER, 1998]. „Zunächst einmal verhält sich ein Organismus nur selten völlig passiv, und andererseits erzeugt er gerade durch die eigene Aktivität einen Großteil der Reizung für sich selbst. Weiters können Reize nicht weniger deutlich als von außen auch im Inneren eines Organismus entstehen und sich aufdrängen.“ [GIBSON, 1973, S.53]. Er unterscheidet folglich zwischen „selbst vermittelter Reizung (obtained stimulation)“ und „aufgedrängter Reizung (imposed stimulation)“. Die aktive Anwendung des Tastsinns lässt sich somit nicht als rein sensorischer Prozess betrachten, sondern besteht primär in der vergleichenden Verarbeitung und Integration zeitlich aufeinander folgender Informationen, bei der das Gedächtnis stark beteiligt ist [KEBECK, 1994].

Abschließend soll noch einmal zusammengefasst werden, welche Informationen nun konkret über den haptischen Sinneskanal wahrgenommen werden können, wenn wir ein Objekt ergreifen. Wie beschrieben, informieren uns die Mechanorezeptoren der Haut über Form, Größe, Gewicht, Oberflächenbeschaffenheit und Konsistenz bzw. materielle Substanz [GIBSON, 1973]. Thermorezeptoren lösen Wärme- oder Kälteempfindungen aus. Bezogen auf die Oberflächentextur lassen sich zahlreiche qualitative Kriterien erfüllen:

- Oberflächeneigenschaften (warm/kalt – hart/weich – rau/glatt – haftend/...)
- Oberflächentopologie (konvex/flach/konkav – kantig ...)
- Oberflächenstrukturen (geriffelt usw., haptische Codierung)

2.2 Die Haptik von Bedienelementen

Im nun folgenden Kapitel wird die Seite der Maschine der definierten Mensch-Maschine-Schnittstelle näher betrachtet. Es handelt sich dabei um die Bedienelemente

in Kraftfahrzeugen. Die haptischen Eigenschaften und dazugehörige Gestaltungsrichtlinien werden erörtert. Das Kapitel schließt mit einem Überblick über Untersuchungen zum Einfluss der haptischen Eigenschaften von Bedienelementen.

2.2.1 Haptische Eigenschaften

Zunächst werden die in Abschnitt 2.1.4 beschriebenen Informationen, welche über den haptischen Sinneskanal wahrgenommen werden können, auf die Eigenschaften von Bedienelementen übertragen. Demnach lässt sich die Haptik eines Bedienelements anhand folgender Dimensionen beschreiben:

- **die äußere Form des Bedienelements:** Hierzu zählt die Größe (Quantität) sowie die Form und die Oberflächeneigenschaften (Qualität). Diese Informationen dienen der Erkennung der Art des Bedienelements. Daneben spielt die Lage bzw. Position von Bedienelementen eine zusätzliche wichtige Rolle bei deren Erkennung.
- **das Verhalten des Bedienelements bei Betätigung:** Wird das Bedienelement betätigt, treten die Dimensionen Betätigungskraft/-moment und Betätigungsweg/-winkel in den Vordergrund. ROHMERT (1989, A - 4.2.1, S. 2) definiert den Begriff *Betätigungskraft* als „eine dynamische Aktionskraft, die gegen Kontaktflächen von Stellteilen (...) bei geführten Bewegungen aufgebracht wird.“ Es handelt sich also um die Gegenkraft, die zum Überwinden des Betätigungswiderstands nötig ist. Die Betätigungskraft hat dabei einen bestimmten Verlauf in Abhängigkeit des Betätigungswegs, wodurch spezielle Charakteristiken entstehen. Diese unterliegen oftmals noch zeitlichen Veränderungen, d. h. sind abhängig von der Betätigungsgeschwindigkeit.

Des Weiteren werden geeignete Möglichkeiten der Codierung von Informationsinhalten aufgezeigt. Generell dient die Codierung von Bedienelementen dem Ziel, „durch Verbesserung der visuellen und/oder taktilen Unterscheidbarkeit die Bedienungssicherheit zu erhöhen, die Betätigungszeit zu mindern und die Ausbildung zu beschleunigen“. [SCHMIDTKE, 1989a, C – 9.1.1, S. 3]. Codieren ist dabei gleichbedeutend mit Zuordnen. Information einer bestimmten Bedeutung oder Bedeutungskategorie wird einer bestimmten wahrnehmbaren Erscheinung zugewiesen [CHARWAT, 1989].

In diesem Zusammenhang ist von Bedeutung, dass Betätigungshaptik (mit Einschränkungen) nur unbewusst wahrgenommen wird. Für die Decodierung aus Betätigungshaptik resultierender Informationen im Fahrzeug wird daher geringe kognitive Leistung benötigt.

2.2.2 Haptische Gestaltungsrichtlinien

Bei der ergonomischen Auslegung von Bedienelementen ist die Berücksichtigung anthropometrischer Randbedingungen der erste Schritt. Hierzu gibt es ausführliche Zusammenstellungen, z.B. in RÜHMANN (1993c) oder GRANDJEAN (1991). FÄRBER & FÄRBER (1988) geben einen Überblick über Gestaltungsgrundsätze zu Größe, Form, Funktion und Auslenkungsbereich von in Kraftfahrzeugen verwendeten Bedienelementen. Weitere allgemein gehaltene Abhandlungen finden sich bei WOODSON & CONOVER (1954), CHAPANIS & KINKADE (1972), GRANDJEAN (1991) und BULLINGER (1994).

In der Literatur finden sich Angaben zu Abmessungen, Stellbereichen und Betätigungswiderständen zu einer Vielzahl von Bedienelementen. Es fällt auf, dass die Angaben sehr unspezifisch sind. RÜHMANN (1993c, S. 557) bemerkt dazu: „Empfehlungen für Betätigungswiderstände können jedoch nur sehr allgemein gehalten werden (vgl.

z.B. DIN 33401), da der jeweilige Verwendungszweck des Bedienelementes, dessen Einbaulage relativ zum Operateur und die Stellhäufigkeit in einem bestimmten Betätigungszeitraum im wesentlichen den Optimalwert des Stellteilwiderstandes bestimmen“. Im Folgenden werden nun Gestaltungsrichtlinien zu den im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen haptischen Eigenschaften besprochen.

Ausschlaggebend für die **Abmessungen** sind in erster Linie anthropometrische Daten der Hand und der Finger [s. dazu z. B. JÜRGENS, 1993].

Die wesentliche Einflussgröße für die **Formgestaltung** von Bedienelementen ist die Greifart. Dabei dürfen die Randbedingungen von Handhaltung und Arbeitsaufgabe nicht außer Acht gelassen werden [BULLINGER, 1994]. Werden nun Bedienelemente ohne visuelle Kontrolle betätigt, so ist durch eine Formcodierung deren taktile Erkennbarkeit sicherzustellen [SCHMIDTKE, 1989a]. Dabei unterstützt eine Formcodierung nicht nur die taktile, sondern auch die visuelle Identifikation. Die Form eines Bedienelements soll dem Benutzer Hinweise auf dessen Betätigung geben. Verschiedene Formen legen unterschiedliche Bewegungsrichtungen zum Betätigen nahe. So wirkt ein Taster z.B. durch eine Verjüngung am unteren Ende eher wie ein Element, das durch ziehen, und nicht durch drücken zu betätigen ist [FÄRBER & FÄRBER, 1987, S. 222]. SCHMIDTKE und RÜHMANN (1993, S. 548) geben ein weiteres Beispiel. Wie später noch zu sehen ist, kann ein Bedienaufsatz eines Joysticks durch seine vier- bzw. achteckige Grundform vier bzw. acht Auslenkrichtungen nahe legen:

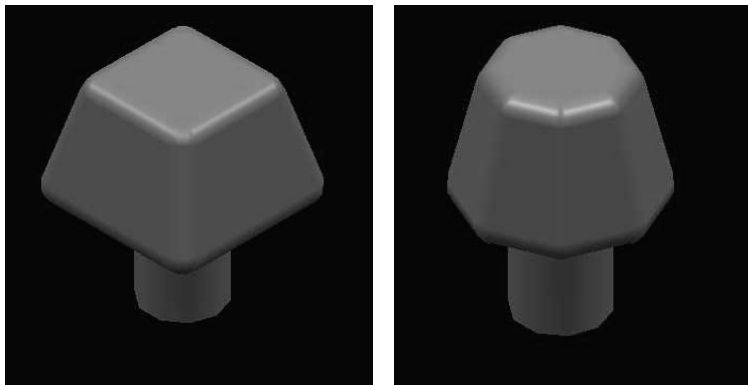


Abbildung 2.6 und 2.7: 4- und 8-Richtungs-Bedienaufsatz

Des Weiteren können die Proportionen von Bedienelementen, Vertiefungen/Erhöhungen, Ausprägungen wie eckig, abgerundet, geneigt usw. deren Erkennbarkeit unterstützen. Über Oberflächenmaterialien können Bedienelemente ebenfalls gut differenziert werden.

Wie bereits in Abschnitt 2.1.3 beschrieben stellen die maximalen Körperkräfte eine natürliche Obergrenze für **Betätigungskräfte** dar. Auf Basis dieser Daten wurden unter standardisierten Versuchsbedingungen isometrische Betätigungskräfte für zahlreiche Kraftaufbringungsfälle ermittelt [RÜHMANN, 1993b]. So existieren für Fingerdruckkräfte an Drucktastern in der Horizontal- und Vertikalebene und Fingerzug- und Fingerdruckkräfte an Fingerschiebern detaillierte Angaben zur maximalen Stellungskraft [SCHMIDTKE, RÜHMANN, 1989; weitere Untersuchungen findet man u. a. in GRANDJEAN, 1991 und RÜHMANN, 1993b].

Was für die Dimensionierung der Betätigungskraft gilt, ist auch für die Dimensionierung der **Betätigungswege** gültig: „Die Größe des zu wählenden Auslenk- und Stellwinkereiches von Bedienelementen hängt von den Bewegungsmöglichkeiten des Hand-Arm-Systems (...) ab“ [RÜHMANN, 1993c, S. 557]. Das bedeutet, dass die Betätigungs-

wege des Bedienelements den Bewegungsmöglichkeiten der Finger bzw. der Hand entsprechen müssen.

Bei der Verwendung aktiver haptischer Bedienelemente ist die Frequenz, mit der die erzeugten Kräfte ausgegeben werden, ein wichtiger Aspekt für die Qualität haptischer Rückmeldungen. Ab einer Wiederholungsrate von ca. 300 Hz werden Krafrückmeldungen vom Menschen als stetig wahrgenommen, d. h. es ist kein Ruckeln o. ä. mehr festzustellen [IMMERSION, 2000]. Höhere Frequenzen (insbesondere Sinusschwingungen) erleichtern dabei die Wahrnehmung der Stetigkeit.

SRINIVASAN und CHEN (1993, nach BURDEA, 1996) empfehlen (vgl. Abschnitt 2.1.3.) eine Kraftauflösung für haptische Mensch-Maschine-Schnittstellen von 0,01 N, um den menschlichen Fähigkeiten gerecht zu werden.

Die Ausführungen zur Richtungsabhängigkeit der Kraftausübung in Kapitel 2.1.3 lassen vermuten, dass optimale Betätigungskräfte und –wege richtungsabhängig sind und dieser Sachverhalt in den folgenden Untersuchungen mit eingeschlossen werden sollte.

Nicht zuletzt kann die erfolgte Betätigung auch haptisch codiert werden. RÜHMANN (1993c, S. 558) empfiehlt: „Beim Schalten von wegbehafteten digitalen Stellteilen (...) soll der erfolgte Schaltvorgang durch ein hörbares und taktiles „Klick“ wahrnehmbar sein.“ Die Überwindung des Druckpunktes soll also deutlich spürbar sein. Er empfiehlt eine progressive Stellteilcharakteristik, bei der die Kennlinie für die Stellkraft langsam ansteigt und am Druckpunkt steil abfällt (s. Abbildung 2.8). Eine Ergänzung der Wegrückmeldung durch eine zusätzliche Krafrückmeldung verbessert die Stellteilgenauigkeit durch Ausgleich von Diskontinuitäten im Bewegungsablauf.

CHAPANIS ET AL. (1963) empfehlen ebenfalls die Verwendung einer Widerstandskraft, welche schwach anfängt, dann schnell ansteigt und plötzlich wieder stark abfällt, um anzuzeigen, dass das Bedienelement aktiviert worden ist. Beim Erreichen des Endanschlags wird die Widerstandskraft schließlich sehr groß (s. Abbildung 2.9).

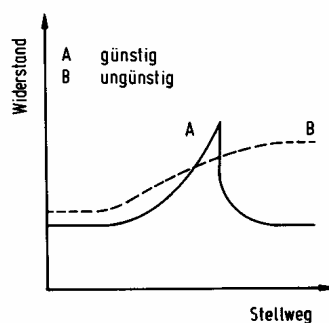


Abbildung 2.8: Günstige und ungünstige Bedienelementcharakteristika von diskreten Bedienelementen [nach RÜHMANN, 1993c]

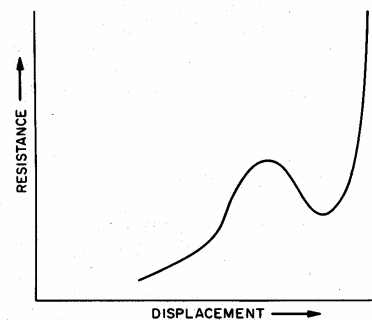


Abbildung 2.9: Günstiges Bedienelementcharakteristikum [nach CHAPANIS ET AL., 1963]

2.2.3 Untersuchungen zum Einfluss der haptischen Eigenschaften von Bedienelementen

Viele Untersuchungen zu dieser Thematik beziehen sich auf kontinuierliche Regelungsaufgaben. So beschäftigt sich RÜHMANN (1993a) eingehend mit der „Analyse der Stellteildynamik“ sowie den „linearen mechanischen Übertragungseigenschaften“, macht dazu qualitative Aussagen, definiert die Begriffe „Weg- und Krafrückmeldung“ und beschäftigt sich auch mit einem „aktiven Stellteil“. Die Untersuchungsergebnisse sind jedoch nicht direkt auf den vorliegenden Anwendungsfall übertragbar, da ein Fah-

rerinformationssystem nicht kontinuierlich bedient wird und nur teilweise Regelungsaufgaben auszuführen sind.

Ein weiteres großes Untersuchungsgebiet ist die menschliche Leistung bei Zielbewegungen mit unterschiedlichen Bedienelementen. Diese Thematik ist interessant, da im vorliegenden Fall die Auswahl eines Items in einem Fahrerinformationssystem einer Zielbewegung entspricht. Dabei sollte das Bediensystem die Zielbewegung unterstützen. FITTS [nach GEISER, 1990] schlug schon 1954 einen Schwierigkeitsindex zur Beschreibung eindimensionaler Zielbewegungen vor. Daraus folgt, dass große Bewegungsamplituden und kleine Zielgebiete bei der Gestaltung von manuellen Eingabesystemen zu vermeiden sind.

PHILLIPS ET AL. (2001) untersuchten ausführlich den Verlauf von Cursorbahnen bei der Zielbewegung mit einer herkömmlichen Computermaus. Sie stellten fest, dass die Cursorbahnen sehr uneinheitlich und nicht effektiv sind. Viele Vpn schossen über das auszuwählende Ziel hinaus. Die genaue Betrachtung der Bedienzeiten zeigt, dass 70% für die abschließende Zielsuche benötigt werden. Dies kann als eine direkte Aufforderung gesehen werden, an dieser Stelle mit Verbesserungen anzusetzen und die Zielbewegung durch haptische Rückmeldung zu unterstützen. Sie stellten des Weiteren fest, dass die Zielrichtung einen signifikanten Einfluss auf die Positionierzeiten hat. So benötigten die Vpn für Zielbewegungen in Diagonalrichtung tendenziell länger. Insgesamt war die Zielbewegung nach links am schnellsten. Die Forschergruppe führt dies zum einen auf physiologische Beschaffenheiten zurück (vgl. Abschnitt 2.1.3). Zum anderen kann dies an der Art und Weise liegen, wie der Mensch den Bildschirm nach der Zielposition abscannt. Die Vpn neigten dazu, den Bildschirm von links nach rechts und von unten nach oben abzusuchen [DIX ET AL., 1998, nach PHILIPS ET AL., 2001].

DOUGLAS ET AL., 1997 (nach PHILIPS ET AL., 2001) verglichen eine Computermaus mit einem isometrischen Joystick, d. h. einem Joystick ohne Betätigungsweg, der nur eine Kraftaufnahme besitzt. Die Untersuchung des Bedienablaufs bei der Cursorpositionierung ergab kürzere Bedienzeiten mit einer Maus. Das kann als Indikator dafür angesehen werden, dass ein gewisses Maß an Bedienweg eine schnelle Itemauswahl unterstützt.

Leistungssteigerung durch haptische Rückmeldung

Aktive haptische Rückmeldung wurde als Erstes auf den Gebieten der Telerobotik und der virtuellen Realität eingesetzt. In diesen Bereichen wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, die den Nutzen aktiver haptischer Rückmeldung unterstreichen. BURDEA (1996) gibt hierzu einen umfassenden Überblick.

Auf dem Gebiet grafischer Benutzerschnittstellen (Graphical User Interface = GUI) verglichen AKAMATSU ET AL. (1995) taktile, akustische und visuelle Rückmeldung bei der Zieleingabe mit einer Computermaus. Sie verwendeten eine modifizierte Maus, bei der über einen kleinen Pin eine taktile Rückmeldung an den Zeigefinger gegeben wurde, sobald der Cursor in das Zielgebiet bewegt wurde. Die Vpn mussten in möglichst kurzer Zeit den Cursor von einer Startposition zu einer Zielposition bewegen und durch Drücken der Maustaste bestätigen. Insgesamt unterschieden sich die Modalitäten nicht signifikant. AKAMATSU ET AL. konnten aber nachweisen, dass die Zeiten zur abschließenden Zielauswahl (final positioning time) bei taktile Rückmeldung signifikant kürzer waren und führten dies auf die enge Reiz-Reaktions-Kompatibilität zurück. Der Reiz erfolgte am Zeigefinger, die Antwort erfolgt durch den Zeigefinger (Drücken der linken Maustaste).

PAYETTE ET AL. (1996) führten eine Untersuchung zu haptischer Rückmeldung mit und ohne Schwerkraft durch. Mit einem speziellen Flugzeug der NASA wurde bei Sturzflü-

gen der Zustand der Schwerelosigkeit erzeugt. Verglichen wurde eine Computermaus mit haptischer Rückmeldung mit einem herkömmlichen Trackball. Die Vpn hatten dabei typische GUI-Bedienaufgaben zu bearbeiten. Die Ergebnisse zeigen, dass speziell in der Schwerelosigkeit mit dem haptischen Bedienelement weniger Bedienfehler und kürzere Bedienzeiten erzielt wurden. Übertragen auf den Fahrzeugbetrieb könnte dies bedeuten, dass mit haptischer Unterstützung auch eine Bedienung beim Kurvenfahren ohne ein Abstützen der Hand möglich ist. Generell zeigt dieses Experiment, dass eine haptische Unterstützung immer dann positiv wirken kann, wenn die sonst gewohnten Bedien- und Rückmeldemodalitäten gestört bzw. verschlechtert sind.

SCHUMANN (1994) ging der Frage nach, inwieweit das Lenkrad durch die Integration diskreter haptischer Warnsignale als aktives Bedienelement genutzt werden könnte. Probandenexperimente zeigten, dass haptische Warnsignale geeignete Informationen in speziellen Fahrsituationen darstellen (z. B. zum Abbruch eines eingeleiteten Überholmanövers).

MILLMAN (1995) untersuchte mit einer speziellen horizontalen Handkurbel haptische Eigenschaften der Kraftrückmeldung wie Steifigkeit, Dämpfung und Trägheit und deren Einfluss auf freie Positionieraufgaben. Dabei stellte er fest, dass bei fehlender visueller Rückmeldung die Ergebnisse von Positionieraufgaben sehr stark mit der absoluten Differenz zwischen der Dämpfung des Zielbereichs und der Dämpfung der Umgebung korrelierten. Des Weiteren fand er heraus, dass die Größe des Kraftunterschieds zwischen Zielbereich und Umgebung mit der Zielerreichungsgeschwindigkeit korrelierte. War das allgemeine Kraftniveau sehr hoch, so war es die Steifigkeit des Zielbereichs, die für eine kurze Zielerreichungszeit ausschlaggebend war. Er schließt daraus, dass ein Kompromiss aus Dämpfung und Steifigkeit durch hohe Kräftegradienten entscheidend für eine gute Unterscheidbarkeit zwischen Vordergrund und Hintergrund sind. Außerdem empfiehlt er für haptische Displays eine geringe innere, system-immanente Trägheit.

3 Technische Ausführungen

Im Folgenden werden zunächst passive mechanische Bedienelemente zur Bedienung eines Fahrerinformationssystems behandelt. Kapitel 3.1 gibt dazu einen Überblick sowie eine knappe Bewertung, inwieweit sich heutige Realisierungen für typische Bedienungsaufgaben eignen. Anschließend liefert Kapitel 3.2 eine Erklärung der generellen Funktionsweise aktiver haptischer Bedienelemente sowie einen Überblick in Abhängigkeit ihrer Anwendungsgebiete.

3.1 Passive Bedienelemente

3.1.1 Bedienelemente heutiger Fahrerinformationssysteme

Als manuelle MMI-Eingabemedien für die Bedienung eines Fahrerinformationssystems werden bislang folgende Bedienelemente verwendet:

- Dreh-Druckknopfsteller
- Drucktasten / Kreuzwippe
- Touchscreen
- Fingerjoystick / Richtungstaster

Im Folgenden werden die aufgeführten Eingabemedien kurz erläutert und deren Eignung für die Bedienung typischer Interaktionsaufgaben besprochen:

▪ **Dreh-Druckknopfsteller:**

Der Dreh-Druckknopfsteller ist ein häufig verwendetes Bedienelement zur Interaktion mit Fahrerinformationssystemen. Die Auswahl des gewünschten Items erfolgt durch Drehen des Druckknopfstellers, die anschließende Auswahl durch Drücken des Bedienelements. Kontinuierliche Einstellungen wie etwa die Feinjustierung spezieller Klangeigenschaften erfolgen auf gleiche Weise. Bei diesen sog. eindimensionalen Interaktionsaufgaben muss der Benutzer durch Drehen des Bedienelements den Cursor auf die gewünschte Skalenstufe verfahren und durch Drücken die Einstellung bestätigen. Der Vorteil des Dreh-Druckknopfstellers liegt darin, dass aufgrund der Greifart sehr schnell und präzise die gewünschte Einstellung über mehrere Skalenstufen hinweg angewählt und durch Drücken ausgewählt werden kann. Bei der Zuordnung der Drehbewegung des Bedienelements zu einer meist linearen Cursorbewegung (z. B. bei einer Listenauswahl) können jedoch Kompatibilitätsprobleme entstehen. Aufgrund dieses Sachverhalts sind Bedienungsaufgaben, bei denen der Cursor in zwei Richtungen verfahren werden kann (zweidimensionale Interaktionsaufgaben), wie etwa das Verfahren eines Cursors auf einer Karte zur Eingabe eines Navigationsziels, nur schlecht



Abbildung 3.1: Mercedes-Benz SL-Klasse COMAND mit Dreh-Druckknopfsteller

möglich, denn dazu müssen zwei Bewegungsrichtungen des Cursors mit einem Freiheitsgrad des Bedienelements verknüpft werden. Im vorliegenden Beispiel erfolgt dies daher über die zwölf Telefunktasten. Alphanumerische Eingaben (z. B. die Eingabe des Navigations-Zielorts) erfolgen ebenfalls durch Anwahl des gewünschten Buchstabens durch Drehen und anschließender Auswahl durch Drücken des Bedienelements. Hierfür ist der Dreh-Druckknopfsteller ebenfalls eher schlecht geeignet, da alle Zeichen linear angeordnet sein müssen und somit lange Bedienzeiten für die Anwahl des gewünschten Buchstabens entstehen.

- **Drucktasten / Kreuzwippe:**

Die Bedienung eines Fahrerinformationssystems über Drucktasten / Kreuzwippe erfolgt zunächst durch Betätigen von Hardkeys (in ihrer Bedeutung fest zugeordnete Drucktasten) für die Systemauswahl. Dies hat den Vorteil, dass die Auswahl des gewünschten Menüs oder Funktion einfach und direkt durch Drücken der entsprechenden Taste erfolgen kann. Allerdings nimmt mit zunehmender Anzahl von Drucktasten die Übersichtlichkeit des Fahrerinformationssystems ab. Für weitere Interaktionen stehen Softkeys (in ihrer Bedeutung wechselnde Drucktasten) zur Verfügung. Oftmals sind zwei Drucktasten logisch als Wippe (-/+) ausgeführt. Da es sich bei Drucktasten um diskrete Bedienelemente handelt, sind diese für kontinuierliche Einstellaufgaben aber eher schlecht geeignet. Durch die Verknüpfung von vier Drucktastern entsteht eine Kreuzwippe. Dabei fungieren die Tasten als Richtungstasten. Durch mehrmaliges Drücken kann so ein Cursor zweidimensional bewegt und mit einer weiteren Drucktaste die Auswahl bestätigt werden. Zweidimensionale Interaktionsaufgaben sowie Alphanumerische Eingaben lassen sich auf diese Weise bewerkstelligen.



Abbildung 3.2: Mercedes-Benz E-Klasse COMAND mit Softkeys und Kreuzwippe

- **Touchscreen:**

Bei Fahrerinformationssystemen mit Touchscreen ist die Bedieneinheit mit der Anzeige räumlich direkt verknüpft. Aufgrund der physikalischen Einheit von Bedienung und Anzeige ist die Bedienung sehr intuitiv. Die kognitive Beanspruchung ist gering, denn zur Auswahl eines Items muss der Benutzer lediglich auf das gewünschte Anzeigefeld auf dem Touchscreen tippen. Es ist nicht nötig, Bedienelement und Informationsanzeige in Zusammenhang zu setzen. Bei eindimensionalen Interaktionsaufgaben ist ebenfalls nur die Position auf der Skala zu berühren, die ausgewählt werden soll. So ist z. B. bei einer Klangeinstellung nur die gewünschte Skalenstufe anzutippen. Auch für zweidimensionale Interaktionsaufgaben wie z. B. der Zieleingabe über Karte ist nur



Abbildung 3.3: Lexus LS430 mit Touchscreen

auf die gewünschte Position zu drücken. Entsprechend funktioniert eine Alphanumerische Eingabe durch Antippen des gewünschten Buchstabens. Nachteilig bei der Bedienung mittels Touchscreen schlägt die fehlende haptische Rückmeldung bei Ertasten der Bedienfläche und nach erfolgter Betätigung zu Buche. Des Weiteren kann die Bedienung zu einer Verschmutzung führen, was sich vor allem für den Touchscreen als Anzeigemedium negativ auswirkt.

- **Fingerjoystick / Richtungstaster:**

In wenigen Fällen wird bislang zur Bedienung eines Fahrerinformationssystems ein kleiner Fingerjoystick als Multifunktionsbedienelement eingesetzt. Im vorliegenden Fall kann das Bedienelement in der Funktion eines Tasters in vier bzw. acht Richtungen auslenkt werden. Auf diese Weise erfolgen Menüauswahlen und eindimensionale Bedienungsaufgaben. Ist der Joystick als wegbehaftetes Stellteil ausgeführt, sind damit kontinuierliche Einstellungen gut möglich. Ebenfalls durch Auslenken in die gewünschte Richtung kann ein Fingerjoystick bei zweidimensionalen Bedienungsaufgaben wie etwa dem Navigieren auf einer Karte für eine Cursorpositionierung eingesetzt werden. Die Buchstabenauswahl für eine Alphanumerische Eingabe erfolgt entsprechend durch Auswahl des gewünschten Buchstabens und anschließender Auswahl durch Drücken des integrierten Bestätigungstasters. Da es sich bei einem Fingerjoystick / Richtungstaster um ein Bedienelement mit zwei Freiheitsgraden handelt, kann mit ihm ein Cursor schnell und intuitiv auf das gewünschte Item auf der Anzeigefläche positioniert werden. Die Auswahl des Items kann durch Auslösen der integrierten Druckfunktion ebenfalls schnell erfolgen. Vorteilhaft erscheint dabei zusätzlich die Tatsache, dass der Kontakt zum Bedienelement - im Gegensatz zu Drucktasten und Touchscreen - bei mehreren, aufeinander folgenden Interaktionsschritten bestehen bleiben kann. Generell bietet ein Joystick viel Spielraum für die Gestaltung von Interaktionen eines Fahrerinformationssystems.



Abbildung 3.4: Nissan Almera mit Fingerjoystick

Abschließend soll an dieser Stelle noch knapp auf ein weiteres Bedienelement aus dem Kraftfahrzeugbereich eingegangen werden. In seiner Ausgestaltung erscheint er für diese Arbeit deswegen interessant, da es sich hierbei um einen Fingerjoystick / 4-Wege-Taster handelt, der mit einem 2-/3-Finger-Zufassungsgriff bedient wird und sich - günstig im Greifraum des Fahrers - hinter dem Schalthebel befindet. Jedoch dient das Bedienelement nicht zur Interaktion mit einem Fahrerinformationssystem, sondern zur Einstellung der Außenspiegel. Die Position ist daher in diesem Fall kognitiv ungünstig, da das Bedienelement sich nicht am Wirkort befindet. Außerdem sind die Bewegungsrichtungen des Bedienelements nicht optimal kompatibel zur Bewegungsrichtung der gewünschten Wirkung.

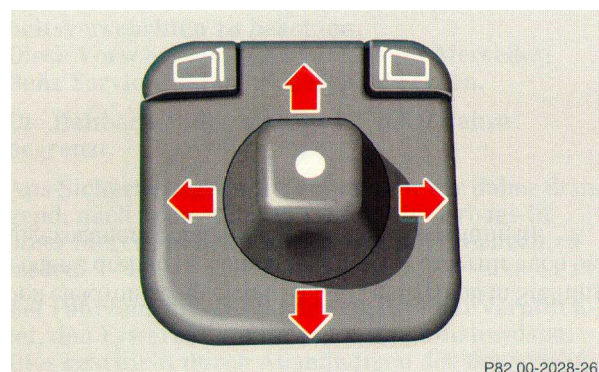


Abbildung 3.5: Spiegelversteller Mercedes-Benz Baureihe 210

3.1.2 Bedienelemente zur Interaktion mit Computern

Bei Fahrerinformationssystemen handelt es sich um softwaregesteuerte interaktive Geräte, bei deren Menügestaltung oft versucht wird, Analogien zu weit verbreiteter Computersoftware herzustellen. Dies legt es nahe, Fahrerinformationssysteme mit Elementen zu bedienen, die wir von der Interaktion mit Computern kennen:

- **Alphanumerische Tastatur:** Dieses allgemein bekannte Eingabemedium (zur Historie vgl. Kapitel 9.4.2.1) ermöglicht dem trainierten Benutzer eine sehr schnelle Alphanumerische Eingabe. Ein wesentlicher Grund, warum eine alphanumerische Tastatur nicht zur Bedienung eines Fahrerinformationssystems eingesetzt werden kann, liegt in der Notwendigkeit, diese mit beiden Händen zu bedienen. Dies ist in Verbindung mit der Fahraufgabe nicht möglich. Nichts desto trotz wäre z. B. für eine Zieleingabe im Stand eine Tastatur sicherlich ein praktisches Eingabemedium.
- **Computermaus:** Mit diesem ebenfalls weit verbreiteten Bedienelement wird bei der Interaktion mit Computern von freien Cursorpositionierungen bis hin zu komplexen Eingaben eine Vielzahl von Interaktionen durchgeführt. Die Computermaus ist deswegen für die Bedienung eines Fahrerinformationssystems wenig praktikabel, da es sich hierbei um ein nicht-ortsfestes Bedienelement handelt. Eine Anwendung in bewegten Systemen wie dem Kraftfahrzeug würde dazu führen, dass der Fahrer nach einer Bedienpause u. U. das Bedienelement suchen müsste, da es aufgrund von Fliehkräften zwischenzeitlich evtl. seine Position verändert hätte.

Daneben existieren noch weitere Bedienelemente wie Trackballs oder Touchpads zur Interaktion mit rechnergestützten Systemen, auf die an dieser Stelle aber nicht weiter eingegangen werden soll.

3.2 Aktive haptische Bedienelemente

3.2.1 Funktionsweise

Aktive haptische Bedienelemente sind weder rein elektronischer Natur noch reine mechanische Geräte. Sie sind beides. Sie übertragen digitale Information in physikalische Empfindungen. Abbildung 3.6 verdeutlicht die zwei Regelkreise, die bei einer aktiven haptischen Mensch-Maschine-Interaktion existieren.

Durch Änderung seiner Handposition bzw. der Position seiner Finger bewegt der Mensch ein aktives haptisches Bedienelement, in dessen Gelenken sich Sensoren befinden. Der Computer empfängt somit die Positions- und Geschwindigkeitsinformation des Bedienelements, berechnet daraus Befehle für die Elektromotoren, welche wiederum Kräfte erzeugen, die der Mensch am Bedienelement über Rezeptoren der haptischen Wahrnehmung registrieren kann. Die gewonnene taktile und kinästhetische Information verarbeitet das Gehirn zu motorischen Befehlen für die Muskeln, die die Finger bewegen.

Ein entscheidendes Kriterium für die mechanische Ausführung kraftrückgekoppelter Bedienelemente ist das Wirkprinzip der haptischen Rückkopplung. Man unterscheidet passive, d.h. rein bremsende, und aktive Systeme, die über einen selbstständigen Rückstellmechanismus verfügen. Physikalische Wirkprinzipien und Ausführungsformen möglicher Aktuatoren für einen aktiven Rückkopplungsmechanismus zeigt Tabelle 3.1 auf der nächsten Seite.

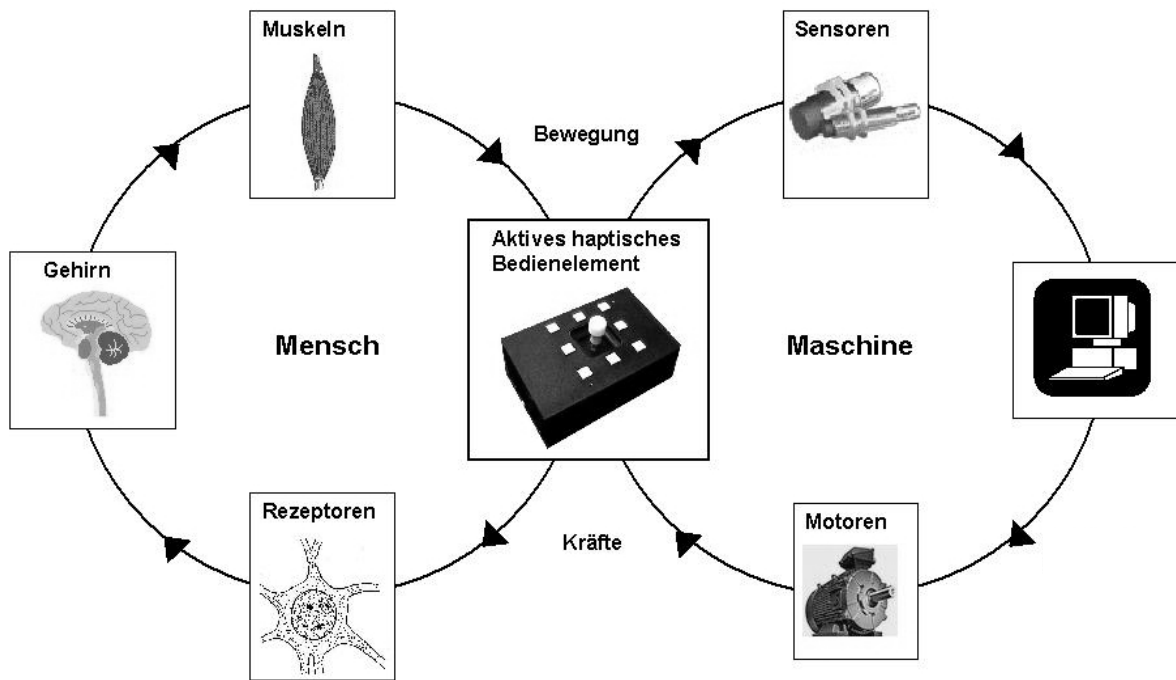


Abbildung 3.6: Aktive haptische Mensch-Maschine-Interaktion

Tabelle 3.1: Aktuatoren für kraftrückgekoppelte Bedienelemente [nach DAUDE, 2000]

Aktuator	Funktionsprinzip	Vorteile	Nachteile
Gleichstrom-/ (DC-)Motor	Stromdurchflossene Spulen in Magnetfeld	<ul style="list-style-type: none"> • Einfacher Aufbau • Ausgereifte Technologie • Einfache Regelung • Hohe Dynamik • Sauber, leise 	<ul style="list-style-type: none"> • schlecht für statische Kräfte • geringes Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen • geringe Lebensdauer bei Betrieb nahe Anhaltmoment • Erwärmung
Schrittmotor	ähnlich DC-Motor	<ul style="list-style-type: none"> • Hohes Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen • Hohes Anhaltmoment • Besseres Leistungs-Gewicht- und Leistungs-Baugrößen-Verhältnis als DC-Motor 	<ul style="list-style-type: none"> • keine kontinuierliche Drehbewegung • Rastmoment
Linearmotor	ähnlich DC-Motor	<ul style="list-style-type: none"> • für translatorische Bewegungen besser geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> • komplexere Ansteuerung, größerer Bauraum und höheres Gewicht als DC-Motor
Druckluftzylinder	Pneumatik	<ul style="list-style-type: none"> • gutes statisches Kraftverhalten • leichter als Hydraulik • kann durch Trennung von Aktor und Pumpe an verwinkelten Stellen eingesetzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Dynamik • Slip-Stick-Effekte im Zylinder → schwierige Regelung • hohe Totzeiten wegen Kompressibilität des Mediums
Hydraulikzylinder	Hydraulik	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Kräfte • hohe Steifheit • gute Dynamik • kann an verwinkelten Stellen eingesetzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • relativ hohe Masse • Gefahr von Leckagen • konstruktiv relativ aufwendig • hoher Preis

Aktuator	Funktionsprinzip	Vorteile	Nachteile
Piezo-elekt-rik	piezoelektrischer Effekt	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Kräfte • kleiner Bauraum • kein Verschleiß 	<ul style="list-style-type: none"> • sehr kleine Auslenkungen • hohe Spannung erforderlich (150...1000V)
Elektro-magnet	Elektro-magnetismus	<ul style="list-style-type: none"> • einfacher mech. Aufbau • hohe Lebensdauer 	<ul style="list-style-type: none"> • Erwärmung • Hysterese • hohe Totzeit (Anzugszeit) • hohes Gewicht • große Ströme
Tauchspule	Spule in zylindrischem Magnetfeld	<ul style="list-style-type: none"> • einfacher mech. Aufbau • sehr gute Dynamik • einfache Regelung 	<ul style="list-style-type: none"> • großer Bauraum • hohes Gewicht
Elektro-rheolog. Flüssigkeit	Viskositätsänderung durch elektrische Felder	<ul style="list-style-type: none"> • sehr gute Dynamik • hohe Kräfte 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Ansteuerspannung • noch im Entwicklungsstadium
Elektro-chemischer Aktuator	Gasbildung durch Molekülzerlegung	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Wirkungsgrad • geringe Leistungsaufnahme 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Geschwindigkeit (0,1...1 mm/s)

3.2.2 Anwendungen

Aktive haptische Bedienelemente lassen sich allgemein in drei Kategorien einteilen [nach KEYSON, 1996]:

- 1) Der erste Bereich umfasst stationäre Geräte und Plattformen, die fest auf dem Boden oder einer Arbeitsoberfläche fixiert sind. Dies beinhaltet mit der Hand bediente Geräte wie Trackballs, Joysticks oder Computermäuse. Nachfolgend werden vorrangig existierende kraftrückgekoppelte Bedienelemente aus diesem Bereich erläutert.
- 2) Im zweiten Bereich werden körperfeste Geräte zusammengefasst, die sich mit den Gliedmaßen oder Fingern des Benutzers bewegen (z. B. Datenhandschuhe). Derartige Eingabehilfen werden im Weiteren nicht betrachtet, da sie – zumindest mittelfristig – für die Bedienung eines Fahrerinformationssystems wenig aussichtsreich erscheinen.
- 3) Der dritte Bereich deckt die taktilen Displays ab, die visuelle und akustische Informationen fühlbar machen. Hierbei handelt es sich vorrangig um Geräte für Blinde, um ihnen beispielsweise die Arbeit mit Computern zu ermöglichen bzw. zu erleichtern. Auch diese Systeme werden nur anhand eines Beispiels betrachtet, da es sich bei taktilen Displays in erster Linie um Geräte der Informationsanzeige, und nicht der Informationseingabe handelt.

Bei den nachfolgend aufgeführten haptischen Bedienelementen handelt es sich zumeist um Prototypen von Forschungseinrichtungen, teilweise aber auch um auf dem Markt befindliche Lösungen. Eine umfassende Zusammenstellung aktiver haptischer Mensch-Maschine-Schnittstellen mit Abbildungen und Links findet sich u. a. unter <http://haptic.mech.northwestern.edu/intro/gallery/> .

3.2.2.1 Automotive

Die Fa. Alps/Alpine stellte 1998 zum ersten Mal die „CAR-Mouse“ [ALPS, 1998] im Human Engineering Cockpit Ia (HEC 1a) vor (s. Abbildung 3.7). Das mausähnliche Bedienelement verfügt über eine feste Führungskulisse. Die eingeschränkte dynamische Krafterückmeldung wird über Spulen angesteuert. Im Rahmen einer Studie stellt diese Anwendung einen ersten Ansatz zur Darstellung dynamischer Effekte zur verbesserten Bedienbarkeit und Systemintegration von Mensch-Maschine-Schnittstellen im Kraftfahrzeug dar.



Abbildung 3.7: „CAR-Mouse“ von ALPS/Alpine

Im Weiteren wurde die „CAR-Mouse“ auch mit kippender Auslenkung [ALPS, 1999] ausgeführt (s. Abbildung 3.8). Dieses multifunktionale Bedienelement verfügt über verbesserte haptische Effekte und wird über DC-Motoren und Getriebe angesteuert. Es stellt die Basis für die Weiterentwicklung des ALPS/Immersion-Konzepts dar, welches erstmals auf der „Convergence“ (Detroit) im Oktober 2000 vorgestellt wurde [ALPS, 2000]. Es erlangte durch den Serieneinsatz in der 7er-Baureihe von BMW große Bekanntheit (s. Abbildung 3.9). Das Bedienelement fungiert dort als Eingabeeinheit für das Bediensystem „iDrive“. Bei dem von den Firmen ALPS und Immersion (Lizenzgeber) entwickelten Bedienelement handelt es sich um einen Dreh-Druckknopfsteller mit dynamischen aktiv haptischen Rasterungen. Des Weiteren ist ein 8-Richtungstaster mit fester Kulisse integriert.



Abbildung 3.8: „Car-Mouse“ (kippende Ausführung) von ALPS/Alpine

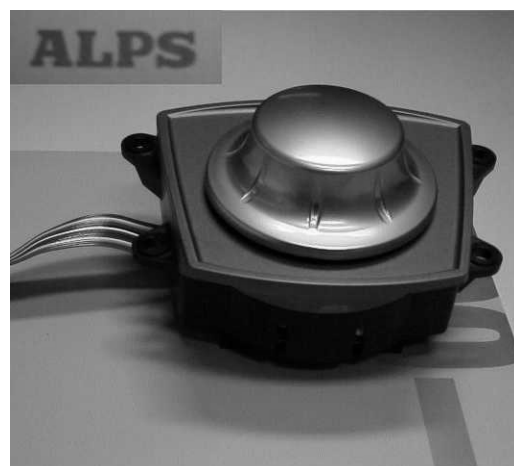


Abbildung 3.9: „iDrive“-Bedienelement von ALPS/Immersion

Die Fa. VDO [VDO, 2000] entwickelte ebenfalls einen Dreh-Druckknopfsteller mit dynamischen, d. h. veränderbaren aktiven haptischen Rasterungen (Abbildung 3.10).

Die Fa. ALPS/Alpine entwickelte auch einen Joystick [ALPS, 2000] als multifunktionales Bedienelement für den Automotive Bereich (s. Abbildung 3.11). Der Joystick besitzt zwei Freiheitsgrade, ein integriertes Rändelrad mit Druckfunktion und wird über Linearmotoren angesteuert. Eine dynamische Krafterückmeldung in Abhängigkeit einer beliebigen Position im Auslenkbereich ist realisierbar. Im Human Engineering Cockpit Ib (HEC 1b) 03/2000 wurde eine funktionsfähige Simulation vorgestellt.

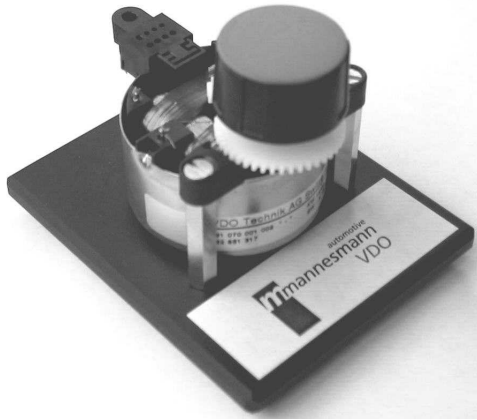


Abbildung 3.10: Druck-Drehsteller von VDO



Abbildung 3.11: „CAR-Joystick“ von ALPS/Alpine

Als Stellteil zur Fahrzeugsteuerung wurde bei DaimlerChrysler der Sidestick entwickelt [DAIMLERCHRYSLER, 2001]. Dabei handelt es sich um einen Joystick mit einem oder zwei Freiheitsgraden und einer Auslenkung von $\pm 20^\circ$. An der Handauflage können Kräfte bis zu 300 N aufgebracht werden. Das Stellteil mit einem Freiheitsgrad hat eine Baugröße von $30 \times 10 \times 14 \text{ cm}^3$, das Stellteil mit zwei Freiheitsgraden benötigt $20 \times 20 \times 40 \text{ cm}^3$. Es wurden Prototypen in verschiedenen Sidestick-Fahrzeugen eingebaut (Mercedes-Benz SL, Actros).



Abbildung 3.12 und 3.13: „Sidestick“ von DaimlerChrysler

3.2.2.2 Spiele / Entertainment

Auf dem Sektor der Computerspiele gibt es Joysticks und Lenkräder, die das Spielvergnügen durch eine Krafterückkopplung steigern sollen. Microsoft brachte 1997 den „Sidewinder Force Feedback Pro“ auf den Markt. Das aktuelle Modell „Sidewinder Force Feedback 2“ ist in Abbildung 3.14 dargestellt. Mit diesem Joystick ist es möglich, Vibrationen, Aufpralleffekte o. ä. zu simulieren. Dieser Joystick besitzt zwei Freiheitsgrade, d. h. zwei Achsen, die krafterückgekoppelt sind. Beide Achsen werden über DC-Motoren und Zahnradgetriebe bewegt und erreichen Gegenkräfte zwischen 5 und 10N [MICROSOFT, 2001].

Von Logitech wird der „Wingman Strike Force 3D“ (Abbildung 3.15) vertrieben [LOGITECH, 2001]. Im Gegensatz zum „Sidewinder“ geschieht die Kraftübertragung nicht durch Zahnräder, sondern durch Stahlseile, die durch DC-Motoren angetrieben werden. Der Vorteil dieser Methode ist die Steigerung der Lebensdauer. Außerdem können die

Stahlseile bei hoher Beanspruchung durchrutschen, bei Zahnrädern ist dies nicht möglich und würde zu einer Beschädigung der Zahnräder führen. Nachteilig ist der dafür benötigte Bauraum, der „Wingman“ ist deutlich größer als der Joystick von Microsoft. Die zu erzeugende Gegenkraft ist, wie beim Joystick von Microsoft, programmierbar. Sie reicht von 5N bis 10N an der Joystickspitze.

Ebenfalls von Logitech wird seit 1999 die „WingMan Force Feedback Mouse“ (Abbildung 3.16) vertrieben [LOGITECH, 2001]. Mit der erstmals integrierten „Immersion Active Desktop“-Technologie wird es möglich, bestimmte Elemente grafischer Benutzeroberflächen zu erfühlen. Die Ecke eines Windows ist z.B. erhöht, ein Hyperlink auf einer Internet-Seite vertieft. Die dafür benötigten Kräfte sind relativ gering. Diese werden von DC-Motoren erzeugt und über Plastikhebel auf die fest verbundene Maus übertragen. Die resultierende Baugröße ist relativ klein.



Abbildung 3.14: „Sidewinder Force Feedback 2“



Abbildung 3.15: „Wingman Strike Force 3D“



Abbildung 3.16: „Wingman Force Feedback Mouse“

3.2.2.3 Weitere Beispiele

Neben dem Automotive- und Entertainmentbereich gibt es technisch wesentlich aufwendigere und dementsprechend teurere Produkte und Anwendungen. Diese werden im Bereich der virtuellen Realität (VR), in der Telerobotik, der Medizintechnik, der Produktionstechnik sowie zu reinen Forschungszwecken eingesetzt. Im Folgenden werden einige interessante Beispiele vorgestellt.

Die Firma Immersion Corp. vertreibt den „Impulse Engine 2000“, einen Force-Feedback Joystick mit zwei Freiheitsgraden (Abbildung 3.17). Als Aktuatoren dienen Servomotoren, die eine maximale Gegenkraft von 8.9N bei einer Auflösung von 1100dpi erzeugen können. Der Arbeitsbereich dieses Joysticks bewegt sich, wie auch der herkömmlicher Joysticks, in einem Quadrat mit sphärischer Oberfläche von ca. 152x152 mm² [IMMERSION, 2001]. Als Nachfolger des „Impulse Engine 2000“ wurde der „Impulse Engine 3000“ entwickelt, der drei Freiheitsgrade der Beweglichkeit besitzt, dabei aber ähnlich aufgebaut ist und ähnlich funktioniert [YOUNGBLUT, 1996].



Abbildung 3.17: „Impulse Engine 2000“

Das "PHANToM" [BURDEA, 1997, SENSABLE, 2001] von SensAble Technologies ist das wohl bekannteste kraftrückgekoppelte Bedienelement (s. Abbildung 3.18). Dieses Gerät gibt es in drei verschiedenen Größen, mit Arbeitsräumen von 13 x 18 x 25 bis 41 x 58 x 84 cm³ und verschiedenen Kräfteeregionen; das PHANTHoM Premium 3.0 kann eine maximale Kraft von 22N aufbringen. Diese Kräfte werden mit drei DC-Motoren erzeugt, deren Positionen mit optischen Sensoren am Motor abgefragt werden. Das PHANTHoM ist ein Tischgerät, dessen Hauptkomponente ein gelenkig gelagerter Arm ist, an dessen Ende sich eine Fingerhut-ähnliche Aufnahme für die Fingerspitze befindet (alternativ dazu kann ein Stab eingesetzt werden). Abbildung 3.19 zeigt, wie der Bediener unter Verwendung zweier dieser Systeme ein virtuelles Objekt greifen und im gemeinsamen Arbeitsraum beider PHANTHoM bewegen kann. Soll nun eine Gegenkraft simuliert werden, werden die Motoren angesteuert, die die Auslenkung der Arme beeinflussen. Hierdurch können alle Bewegungen des Arms kontrolliert und so der virtuelle Raum beschrieben werden.



Abbildung 3.18: „PHANToM“

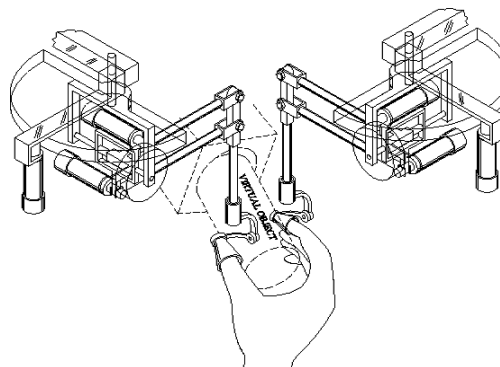


Abbildung 3.19: Funktionsprinzip des „PHANToM“

Als Beispiel für ein taktiles Display soll hier auf das DeKiFeD3 (Abbildung 3.20) eingegangen werden, das am Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik der TU München entwickelt wurde [HOOGEN, 1998]. Mit diesem Display kann sowohl taktiles als auch kinästhetisches Feedback erzeugt werden. Durch die implementierte virtuelle Umgebung ist es möglich, mit diesem Gerät Haft- und Gleitreibung, Oberflächenrauheit, Impedanz und die Temperatur zu simulieren. Das DeKiFeD3 kann eine maximale Kraft von 60 N mit DC-Motoren aufbringen und deckt einen Arbeitsraum von 25 x 30 x 80 cm³ ab [YOUNGBLUT, 1996; HOOGEN, 1998].

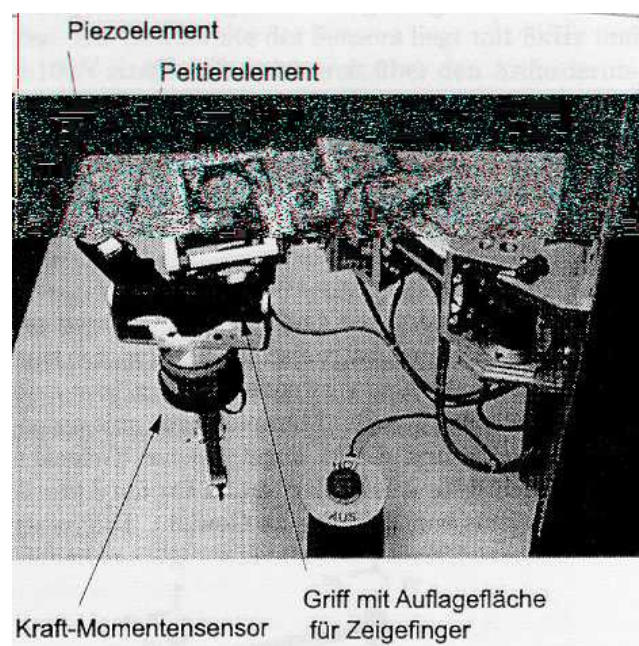


Abbildung 3.20: DeKiFeD3

MPB Technologies vertreibt den "Freedom 6S" (s. Abbildung 3.21), ein Gerät, das sechs Freiheitsgrade der Beweglichkeit besitzt [MPB, 2001]. Das Funktionsprinzip ist dem des PHANTOMs ähnlich. Dieses Gerät ist nur größer und nicht in verschiedenen Ausführungen erhältlich.

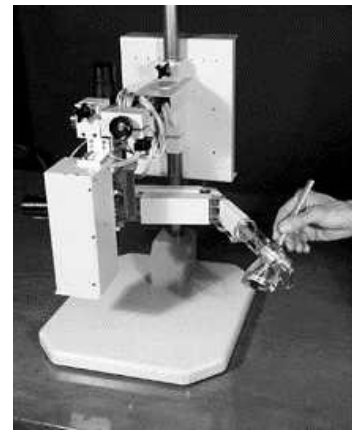


Abbildung 3.21: „Freedom 6S“

Im Iwata Lab an der Universität von Tsukuba, Japan wurde der "Haptic Master" entwickelt. Der Benutzer umfasst die Kugel (Abbildung 3.22) und bewegt sich damit, wie mit einem Joystick oder einem 3D-Trackball, durch die virtuelle Welt. Mit den sechs Freiheitsgraden, die das Gerät besitzt, können beliebige Operationen ausgeführt werden. Der "Haptic Master" basiert auf einer "Stewart Plattform". Vorteilhafte Eigenschaften dieser Konstruktion sind die kompakte Bauweise und die hohen Gegenkräfte, die damit aufgebracht werden können. Nachteilig sind der kleine Arbeitsraum und die komplizierte Kinematik der einzelnen Arme. Der "Haptic Master" ist deswegen mit neun, z. T. redundanten Aktuatoren ausgestattet, wodurch er selbstständig in eine bestimmte Lage zurückkehren kann. Mit ihm kann ein (kugelförmiger) Arbeitsraum mit einem Radius von 20 cm und eine maximale Gegenkraft von 69 N realisiert werden [HAPTIC MASTER GUIDE, 2001].

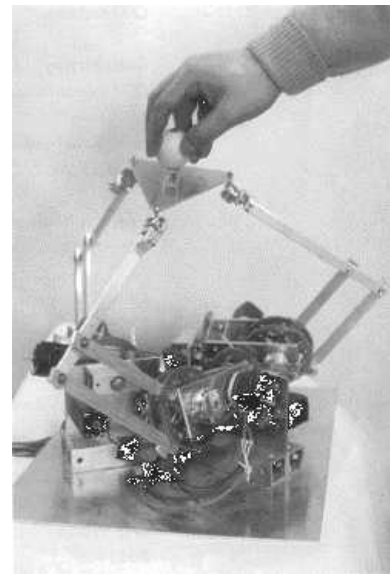


Abbildung 3.22: „Haptic Master“

Im BioRobotics Lab der Universität Washington wurde der "Excalibur" entwickelt (Abbildung 3.23 links, Mitte). Dieser ist ein Joystick mit drei Freiheitsgraden. Er verfügt über einen sehr großen Arbeitsraum von $300 \times 300 \times 200 \text{ mm}^3$ und kann darin sehr hohe Kräfte aufbauen, dauerhaft 100 N und kurzzeitig 200 N. Dieser Joystick funktioniert ähnlich wie ein Plotter, nur dass hier eine dritte Achse hinzugekommen ist. Ein anderes Gerät, der HBFD (High-Bandwidth Force Display) (Abbildung 3.23 rechts), der nur zwei Freiheitsgrade besitzt, ist im Prinzip so aufgebaut wie ältere Plotter, die noch einen ganzen Tisch benötigten und mit Stiften arbeiteten. Diese Apparatur hat einen



Abbildung 3.23: „Excalibur“ (links, Mitte) und „HBFD“ (rechts) [BIOROBOTICS LAB, 2001]

Arbeitsbereich von 300 x 400 mm² und kann dauerhaft ebenfalls 100 N und kurzzeitig 400 N aufbringen [BIOROBOTICS LAB, 2001].

Am Microdynamic Systems Laboratory der Southern Methodist University, Dallas, wurde eine magnetische Lösung entwickelt (Abbildung 3.24). Bei sechs Freiheitsgraden kann eine Krafrückkopplung von bis zu 55 N Gegenkraft und ein 6 Nm Gegenmoment aufgebracht werden. Das Funktionsprinzip ist relativ einfach: Eine Halbkugel, die zu einem Großteil aus Magneten besteht, wird durch andere Magnete, die an dieser Halbkugel angreifen können, geführt. Zusätzlich zu der Führung der Halbkugel haben die Magnete die Aufgabe, die erforderlichen Kräfte für die haptische Rückmeldung aufzubringen. Für die Steuerung des Geräts ist an der Halbkugel ein kleiner Joystick angebracht [MSL, 2001].

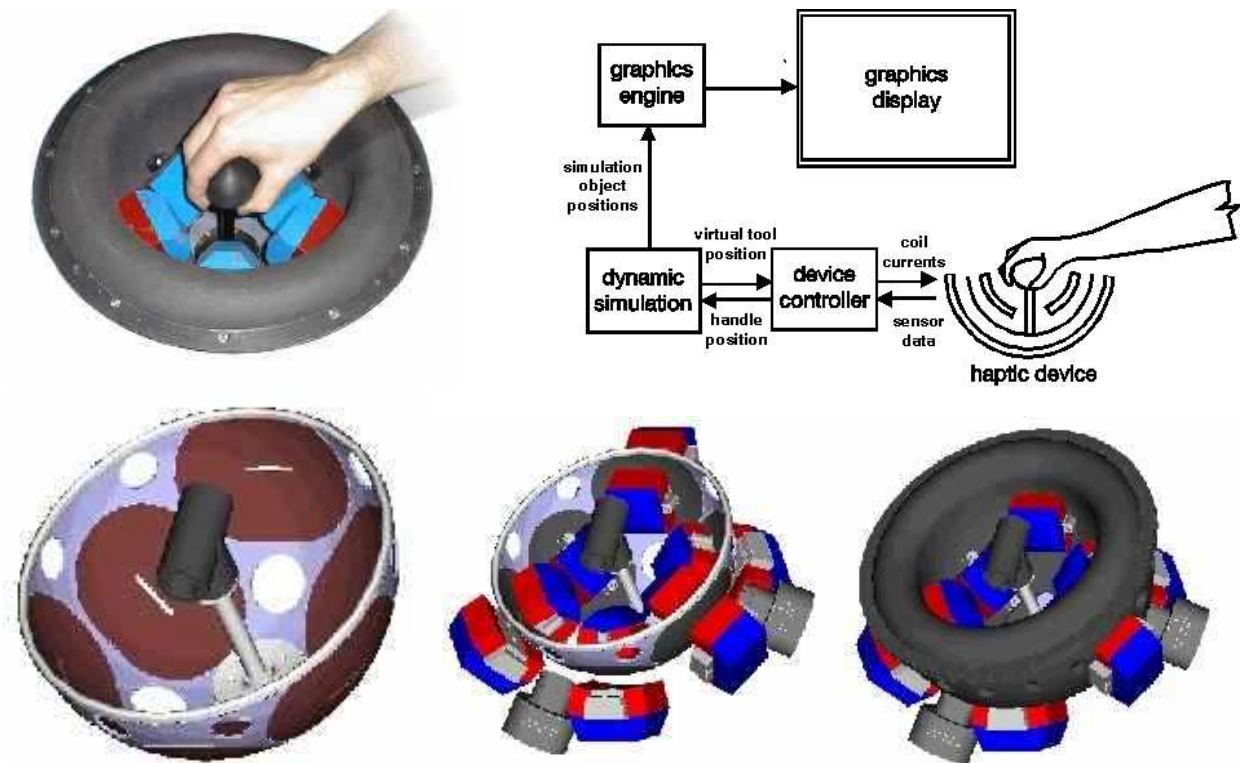


Abbildung 3.24: Krafrückgekoppelter Joystick mit magnetischen Aktoren [MSL, 2001]

Von ENGEL, HAAKMA und ITEGEM wurde schon 1990 ein Force Feedback Trackball mit zwei Freiheitsgraden zum Patent angemeldet (Abbildung 3.25). Dieser Trackball funktioniert nach folgendem Prinzip: Wie bei jedem anderen Trackball auch, wird der Ball in einer Halbkugel geführt. Senkrecht zueinander wirken zwei Motoren mit Gummirädern auf den Ball, so dass die Motoren eine Kraft auf diesen ausüben können (Abbildung 3.26). 1995 wurde von KEYSON ein ebenfalls krafrückgekoppelter Trackball entwickelt, der drei Freiheitsgrade besitzt (Abbildung 3.27). Dieser Trackball funktioniert nach dem gleichen Prinzip wie der Trackball mit zwei Freiheitsgraden, die gesamte Konstruktion

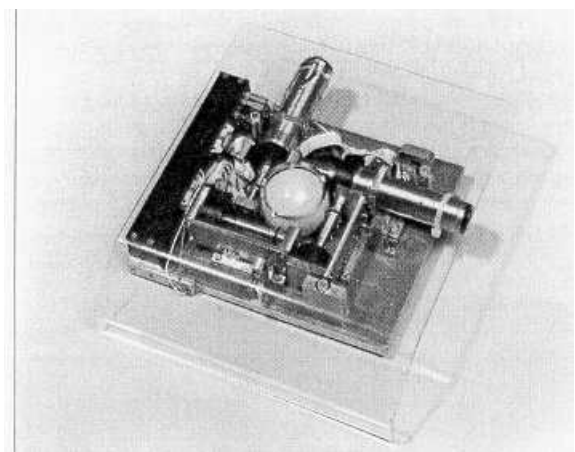


Abbildung 3.25: 2DOF Trackball [nach KEYSON, 1996]

wurde von dem vorhergehenden übernommen. Der dritte Freiheitsgrad kommt zustande, weil der Ball nach oben und unten gedrückt werden kann. Jede dieser Richtungen ist kraftrückgekoppelt. Um für jede Anwendung den richtigen Trackball zu haben, wurde das Gerät so entwickelt, dass jeder Ball, der einen Radius zwischen 56 und 120 mm hat, benutzt werden kann [KEYSON, 1996].

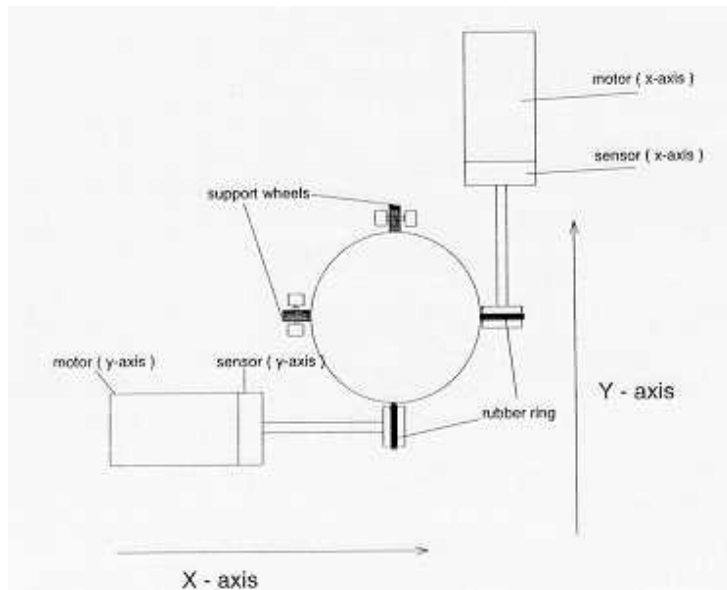


Abbildung 3.26: Funktionsprinzip des 2DOF Trackballs [nach KEYSON, 1996]

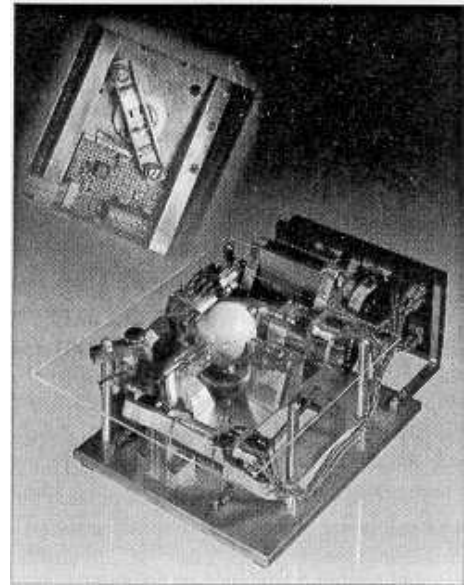


Abbildung 3.27: 3DOF Trackball [nach KEYSON, 1996]

4 Zielsetzung und Fragestellung

4.1 Zielsetzung der Arbeit

Der Nutzen eines Fahrerinformationssystems liegt zunächst in dem Zugewinn an Information und Komfort für den Benutzer durch die zahlreichen neuen Funktionen. Darüber hinaus kann z. B. eine dynamische Zielführungsfunktion auch zur Verkehrssicherheit beitragen, indem das Nachschauen des Weges im Straßenatlas entfällt. Die Interaktion mit Fahrerinformationssystemen kann aber auch negative Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit haben. So stellen FÄRBER & POPP (1990, S. 181) z. B. fest, „dass in alltäglichen Verkehrssituationen die Verbesserung der Orientierung durch elektronische Karten zu einer deutlichen Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit führt“.

Ausgehend von Untersuchungen zur Belastung und Beanspruchung von Kraftfahrern [KÜTING, 1976; HOYOS, 1986], bei denen u. a. Wechselwirkungen zwischen Verkehrssituationen und Persönlichkeitsmerkmalen nachgewiesen werden konnten, beschäftigt sich die Verkehrspsychologie auch mit der Beeinträchtigung des Fahrverhaltens durch „Zusatz Tätigkeiten“ [DEBUS ET AL., 1997]. Verschiedene Autoren konnten die ablenkende Wirkung von Fahrerinformationssystemen nachweisen. Beispielfhaft seien an dieser Stelle Untersuchungen von RENNER (1995) und BENGLER & ZIMMER (1997) genannt. Zusammenfassend kann die Interaktion mit heutigen Fahrerinformationssystemen über ein Multifunktionsbedienelement zu einer

- starken visuellen Ablenkung führen, da eine detaillierte visuelle Anzeige notwendig wird,

und zu einer

- starken kognitiven Beanspruchung durch die notwendige starke hierarchische Gliederung der einzelnen Funktionen führen.

Die Bedienung zusätzlicher Systeme im Fahrzeug bindet visuelle, mentale und motorische Kapazität [FÄRBER & MÜLLER, 2000]. Die motorische Beanspruchung kann bei Verwendung ergonomisch günstig positionierter Multifunktionsbedienelemente weitgehend reduziert werden. Somit ergeben sich als die zwei Hauptziele bei der Gestaltung zukünftiger Mensch-Maschine-Schnittstellen im Fahrzeug, dass der Fahrer die Vielzahl von Funktionen

- möglichst ohne Hinschauen bedienen kann (Reduzierung der visuellen Ablenkung) und

- ohne größere Zuwendung seiner Aufmerksamkeit bedienen kann (Reduzierung der kognitiven Beanspruchung).

Bei der Reduzierung der visuellen Ablenkung werden dabei zwei Ziele verfolgt. Erstens ist zu fordern, dass die Bedienung ohne Blickzuwendung auf das Multifunktionsbedienelement erfolgen kann. Zweitens ist aber auch die notwendige Blickzuwendung auf das Informationsdisplay zu minimieren. Generell sollte für die Informationsabgabe wie –aufnahme der visuelle Sinneskanal so wenig wie möglich beansprucht werden, so dass der Fahrer wieder mehr auf die Straße schauen kann.

Die Reduzierung der kognitiven Beanspruchung kann eventuell durch die Entwicklung neuer Lösungsmöglichkeiten zur manuellen Bedienung der Vielzahl von Funktionen erfolgen. Dabei ist darauf zu achten, welche Bedienung für welche Interaktionsart am intuitivsten ist, damit der Fahrer seine Aufmerksamkeit wieder mehr auf die Fahrzeugführung richten kann.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, durch die stärkere Berücksichtigung des haptischen Sinneskanals einen Beitrag zur Reduzierung der visuellen Ablenkung und kognitiven Belastung durch neue Fahrerinformationssysteme zu leisten. Wie wir in Abschnitt 2.1 gesehen haben, ist die haptische Wahrnehmung ein komplexes und hochleistungsfähiges System, welches in engem Zusammenspiel mit den motorischen Fähigkeiten ein weites Feld an Möglichkeiten der Informationsübertragung bietet. Es wird daher vermutet, dass sich der haptische Sinneskanal in weit stärkerem Maße für die Informationsübertragung zwischen Fahrzeug und Fahrer eignet, als er heutzutage dafür genutzt wird. Es soll versucht werden, zusätzliche Informationen über den haptischen Sinneskanal zu übertragen mit dem Ziel, zum einen den visuellen Sinneskanal zu entlasten und zum anderen die Bedienung des Systems generell zu vereinfachen und intuitiver zu gestalten.

In Abschnitt 1.1 wurde deutlich, dass die Verarbeitungskapazität des Benutzers bei Ausnutzung verschiedener Kanäle und Verarbeitungsstrukturen ansteigt. Durch die intensivere Nutzung des haptischen Sinneskanals soll diese theoretische Erkenntnis auf den vorliegenden Anwendungsfall angewandt werden. Ziel der vorliegenden Arbeit ist demnach die Optimierung der haptischen Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrerinformationssystem.

4.2 Lösungsansatz

Zur Untersuchung und Optimierung der haptischen Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Fahrer wird folgendes prinzipielles Bedien- und Anzeigekonzept definiert:

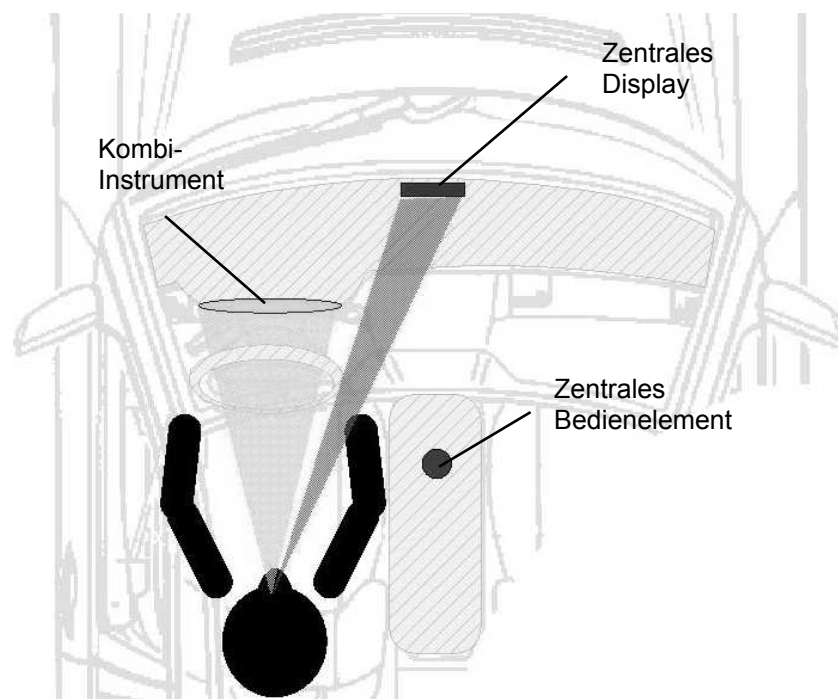


Abbildung 4.1: Prinzipielles Bedien- und Anzeigekonzept

Gegenstand der weiteren Betrachtungen ist das zentrale Bedienelement als Eingabemedium und das dazugehörige zentrale Display als Anzeigemedium. Über dieses Multifunktionsbedienelement sollen sämtliche Sekundärfunktionen bedient werden, die dazugehörigen Informationen werden auf dem zentralen Display dargestellt. Fahrrelevan-

te Funktionen werden auf dem Kombiinstrument angezeigt. Darauf soll im Weiteren nicht näher eingegangen werden.

Dieses Bedien- und Anzeige-Konzept für Sekundärfunktionen besitzt folgende Vorteile:

- Sämtliche Funktionen können über ein Bedienelement bedient werden. Dieses befindet sich in ergonomisch optimaler Position, so dass die durch die Bedienung hervorgerufene motorische Beanspruchung minimal ist.
- Das zentrale Display befindet sich ebenfalls in einer ergonomisch günstigen Position. In Abschnitt 1.3.4 wurde dieser Sachverhalt bereits erläutert.
- Die Verwendung eines zentralen Multifunktionsbedienelements und einem davon räumlich abgesetzten Informationsdisplay ergibt nebenbei auch Vorteile in gestalterischer Hinsicht, wie ebenfalls bereits in Abschnitt 1.3.4 beschrieben wurde.

Der konkrete Lösungsansatz, der in dieser Arbeit verfolgt wird, ist die Optimierung des Multifunktionsbedienelements als dem zentralen manuellen Eingabemedium. Hierbei werden im Wesentlichen zwei Ansätze verfolgt:

1. Verwendung eines Joysticks mit zwei Freiheitsgraden als zentrales Bedienelement
2. Verwendung eines aktiven frei programmierbaren Bedienelements

Warum diese zwei Ansätze als eine Möglichkeit zur Optimierung der haptischen Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrerinformationssystem angesehen werden, wird im Folgenden beschrieben.

4.2.1 Joystick als Multifunktionsbedienelement

Wie in Abschnitt 1.3.2 und 3.1.1 dargestellt, wird zur Bedienung heutiger Fahrerinformationssysteme in vielen Fällen ein Dreh-Druckknopfsteller verwendet. Dabei handelt es sich um ein Bedienelement mit einem rotatorischen und einem nur binären translatorischen Freiheitsgrad. Übliche Bedienkonzepte nutzen diesen zur Manipulation eines Cursors. Ist das gewünschte Item angewählt, kann es durch Drücken des Bedienelements ausgewählt werden.

In dieser Arbeit wurde ein Joystick mit zwei Freiheitsgraden ausgewählt. Die generellen Eigenschaften eines Joysticks im Vergleich zu anderen relevanten Bedienelementen wurden bereits in Abschnitt 3.1.1 behandelt. Für den vorliegenden Fall hat die Entscheidung für einen Joystick als zentrales Multifunktionsbedienelement folgende Gründe:

- Ein Joystick besitzt zwei Freiheitsgrade. Dadurch ergibt sich für die Gestaltung der Interaktionen wesentlich mehr Spielraum. Ein Joystick / Steuerhebel besitzt die ergonomisch vorteilhafte Eigenschaft, dass dabei „durch entsprechende Bewegungskombination z. B. eine Marke an jede beliebige Position eines Bildschirms geführt werden kann.“ [SCHMIDTKE, RÜHMANN, 1992, C-9.5.1 S. 1].
- Aufgrund der zwei Freiheitsgrade ist ein Joystick für zweidimensionale Interaktionsaufgaben sehr gut geeignet. Das Mapping, d. h. die Zuordnung der Bewegung des Bedienelements zu den damit ausgeführten Aktionen auf dem Bildschirm, ist besser als mit eindimensionalen Bedienelementen.
- Mit einem Joystick ist eine direkte Anwahl mehrerer Items möglich, d. h. das Interaktionsprinzip der Direktmanipulation lässt sich gut verwirklichen.

- Der Joystick ist eine Analogie zur Maus am Computer, einem inzwischen sehr ge-läufigen Bedienelement zur freien Cursorpositionierung.

Die Konstruktion, die Dimensionen und die genaue Form des Joysticks werden in Kapi-tel 5.1.1 beschrieben.

4.2.2 Frei programmierbares aktives Bedienelement

Wie in diesem Kapitel bereits dargelegt wurde, wird im Rahmen dieser Arbeit ein Be-dien- und Anzeigekonzept betrachtet, welches aus einem Multifunktionsbedienelement und einem Informationsdisplay besteht. In Abschnitt 1.3.4 wurde bereits auf den Nach-teil von Multifunktionsbedienelementen hingewiesen, dass bei deren Verwendung nicht mehr jeder Funktion ein Bedienelement zugeordnet werden kann. Weder eine Positi-onscodierung, noch eine anderweitige visuelle oder haptische Codierung sind möglich. Die Überlastung des visuellen Sinneskanals des Autofahrers durch die Darstellung zu-sätzlicher Informationen auf Multifunktionsdisplays wurde bereits besprochen. Die Ver-wendung eines in seiner Haptik frei programmierbaren Bedienelements stellt den Lö-sungsansatz zu dem weiter oben beschriebenen Zielkonflikt dar.

Für die Verwendung dieser Technologie für die Bedienung eines Fahrerinformationssystems in dem vorliegenden Zusammenhang sprechen folgende Gründe:

- Mit einem solchen Bedienelement lässt sich eine variable, situationsspezifische Haptik generieren. Man hat nicht mehr ein Stellteil, das sich immer gleich anfühlt, sondern ein Bedienelement, das für jede Interaktionsart die passende Haptik er-zeugt.
- Die Freiheit in der Programmierung der Betätigungskräfte ermöglicht für einzelne Interaktionsarten neue, optimierte Bedienmöglichkeiten, wie sie mit bisherigen Be-dienelementen nicht möglich waren. Generell soll so ein komfortableres, natürlicheres und intuitiveres „Bediengefühl“ entstehen.
- Es ist damit erstmals möglich, Betätigungskräfte und –wege ohne Umbaumaßnah-men systematisch zu variieren und zu vergleichen und somit für einzelne Bedien-aufgaben speziell zu optimieren.

Auf die prinzipielle Funktionsweise aktiver haptischer Bedienelemente und auf bereits existierende unterschiedliche Anwendungen wurde bereits in Abschnitt 3.2 eingegan-gen. Die Verbindung dieser Technologie mit der Entscheidung für einen Joystick als zentrales Bedienelement ermöglicht dem Benutzer eine direkte Positioneingabe (wie z.B. mit einer Computermouse), wobei er aber gleichzeitig durch programmierte Kräfte bzw. Kraftkulissen haptisch unterstützt wird. Dabei ist bei der Spezifikation der Soft-und Hardware auf die Eigenheiten und die Sensibilität der haptischen Wahrnehmung zu achten.

4.3 Hypothesen und Fragestellungen

Die wesentliche Hypothese dieser Arbeit lautet, dass die stärkere Verwendung des haptischen Sinneskanals bei der Bedienung eines Fahrerinformationssystems zur In-formationstransfer zwischen Fahrzeug und Fahrer

- zu einer Reduzierung der visuellen Ablenkung und
- zu einer Reduzierung der kognitiven Beanspruchung führt.

Diese Hypothese wird in der vorliegenden Arbeit anhand eines in seiner Haptik frei programmierbaren Joysticks als Multifunktionsbedienelement eines Fahrerinformationssystems überprüft. Es wird vermutet, dass dadurch die haptische Mensch-Maschine-Schnittstelle in dem Maße optimiert werden kann, dass sich obige Effekte einstellen. Anders formuliert heißt das, es wird angenommen, dass mit Hilfe des beschriebenen Lösungsansatzes das zentrale Bedienelement in haptischer Hinsicht entscheidend optimiert werden kann.

Es ist aber auch vorstellbar, dass die verstärkte Betrachtung des haptischen Sinneskanals bei der Gestaltung der Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrerinformationssystem zu einer verstärkten Aufmerksamkeitszuwendung des Benutzers auf das Bedienelement führt. Dies könnte insgesamt in einer stärkeren Ablenkungswirkung von der Fahraufgabe resultieren.

Die haptische Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine soll also im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Aus der Zusammenfassung des Untersuchungsbedarfs zur Optimierung dieser Schnittstelle ergeben sich folgende Fragestellungen, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden sollen:

Welches Potenzial hat ein aktives haptisches Bedienelement für die Bedienung eines Fahrerinformationssystems? – Im Speziellen soll dies anhand eines frei programmierbaren Joysticks untersucht werden. Dabei wird zunächst nur eine dynamische passive Haptik betrachtet. Der Aspekt der aktiven haptischen Rückmeldung bietet sicherlich weitere zahlreiche interessante Aspekte, soll aber zunächst außer Acht gelassen werden.

Die Systembedienung kann nicht losgelöst von der Fahraufgabe betrachtet werden. Vielmehr gilt es zu untersuchen, in welchem Maße die Bedienung eines Fahrerinformationssystems mit einem aktiven haptischen Bedienelement die parallel durchzuführende Fahraufgabe beeinflusst. Neben der Betrachtung der Ablenkungswirkung ist zu überlegen, wie die „haptischen Anzeigen“ für prinzipielle Interaktionsarten wie diskrete und kontinuierliche Einstellung, Listenauswahl oder Alphanumerische Eingabe bei der Verwendung eines aktiven haptischen Bedienelements aussehen sollten. Wie muss die Haptik gestaltet sein? Welche Kräfte sind für eine deutliche haptische Rückmeldung optimal?

Bedienperformance und Ablenkungswirkung können anhand objektiver Messgrößen wie etwa dem Blick- und dem Fahrverhalten beurteilt werden. Es stellt sich aber auch die Frage, inwieweit subjektive Aussagen den objektiven Daten entsprechen. Des Weiteren soll untersucht werden, ob es dabei interindividuelle Differenzen gibt.

Antworten auf obige Fragestellungen sollen Hinweise für die generelle Fragestellung liefern, die dieser Arbeit zugrunde liegt: Wie muss Haptik in Bezug auf die Informationsübertragung und –verarbeitung gestaltet sein, dass die Bedienung von Fahrerinformationssystemen dadurch verbessert wird? Welchen Einfluss hat die Haptik bzw. die haptische Gestaltung eines Multifunktionsbedienelements auf die Hauptaufgabe des Fahrers, nämlich das sichere Führen des Fahrzeugs im Straßenverkehr?

Dies soll dadurch untersucht werden, indem haptische Gestaltungsparameter des Multifunktionsbedienelements variiert, neue Interaktionsarten entwickelt und verglichen werden. Die experimentelle Evaluation soll mittels Probandenuntersuchungen geschehen.

5 Aufbau einer Entwicklungsumgebung für Bedienkonzepte mit aktiven haptischen Bedienelementen

Im Folgenden wird zunächst die Hard- und Software beschrieben, wie sie in den Experimenten dieser Arbeit verwendet wurde. Wie man sieht, handelt es sich dabei um Prototypen, die im Laufe der Versuche ebenfalls weiterentwickelt wurden.

Die insgesamt sechs Probandenbefragungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, fanden in zwei Versuchsumgebungen statt. Es sind dies der Fahrsimulator und das Versuchsfahrzeug. Sie werden in Kapitel 5.3 und 5.4 vorgestellt.

5.1 Hardware

5.1.1 Joystick

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein frei programmierbarer aktiver haptischer Joystick mit integriertem Drucktaster zur Interaktion mit einem Fahrerinformationssystem verwendet. Es wird zunächst ein Überblick über geläufige Gestaltungsrichtlinien für die dafür relevanten Bedienelemente Stellhebel/Joystick und Drucktaster gegeben (vgl. Kap. 2.2.2). Die empfohlenen Werte für Betätigungskräfte und -wege von Drucktastern/-schaltern sind jedoch sehr unspezifisch. Für den Betätigungsweg reichen die Angaben von 1,5 mm für Tastaturen [SCHMIDTKE, 1989b] bis hin zu 40 mm [KROEMER, 1967]. Der empfohlene Bereich der Betätigungskraft beträgt 1 N [z. B. EN 894-3] bis 8 N [RÜHMANN, 1993c]. Für das Bedienelement Stellhebel/Joystick existieren neben Angaben zum Betätigungsweg (s. Tabelle unten) auch Angaben zum Auslenkwinkel. SCHMIDTKE und RÜHMANN (1992) fordern 30 – 45°. Die von RÜHMANN (1993c) angegebenen Richtwerte erscheinen für den vorliegenden Anwendungsfall am ehesten zutreffend:



Stellteil	Betätigung	Maße [mm]	Stellweg s	Stellkraft
 Druckknopf Drucktaster	Finger Hand	$d \geq 10$ $d \geq 40$	min. 3 mm / max. 10 mm min. 6 mm / max. 15 mm	min. 1 N / max. 8 N min. 4 N / max. 16 N
 Stellhebel	Finger Hand	$d \geq 5, l \geq 15$ $d \geq 15, l \geq 90$	min. 20 mm / max. 100 mm min. 50 mm / max. 400 mm	min. 2 N / max. 10 N min. 10 N / max. 150 N

Tabelle 5.1: Gestaltungsrichtlinien für relevante Bedienelemente [nach RÜHMANN, 1993c]

Für diese Arbeit wurde von der Fa. Haptic Technologies/Immersion im Auftrag der DaimlerChrysler AG ein spezieller Joystick angefertigt. Er beinhaltet folgende Komponenten:

- **Mikrocontroller:** Der in dem Gerät von Immersion eingebaute spezielle Mikrocontroller kann bis zu 30 Effekte gleichzeitig „abspielen“ und jeden davon bis zu 1000 mal in der Sekunde angleichen [Immersion, 2000]. Das ist besonders wichtig, denn in Abschnitt 2.1.2.2 wurde beschrieben, dass die menschliche haptische Wahrnehmung ab einer Frequenz von ca. 300 Hz als stetig empfunden wird.

- **Aktuatoren:** Der Joystick beinhaltet zwei Elektromotoren, deren Widerstand (Drehmoment) sich erhöht, wenn der Mikrocontroller ihnen eine höhere Spannung gibt.
- **Übersetzung / Kinematik:** Über eine Übersetzung werden die Kräfte, die durch die Aktuatoren aufgebracht werden, an den Stick bzw. Bedienaufsatz übertragen. Im vorliegenden Fall erfolgt dies über einen 5-Gelenkstab-Mechanismus. Der Stick ist in zwei rotatorischen Freiheitsgraden beweglich.
- **Stick bzw. Bedienaufsatz:** Welche Form soll der Bedienaufsatz haben? Die anthropometrische Situation des Fahrers ist gegeben durch die Sitzposition im Fahrzeug, des Displays in optimierter Position und des im Greifraum angeordneten zentralen Bedienelements. Durch das Angebot einer Armauflage kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei den Bewegungen zur Betätigung des zentralen Bedienelements ausschließlich um Bewegungen der Finger bzw. der rechten Hand handelt. Bei der Bedienung des Joysticks handelt es sich somit um einen Zufassungsgriff durch zwei oder drei Finger. Der Bedienaufsatz wurde entsprechend den Spezifikationen hergestellt.

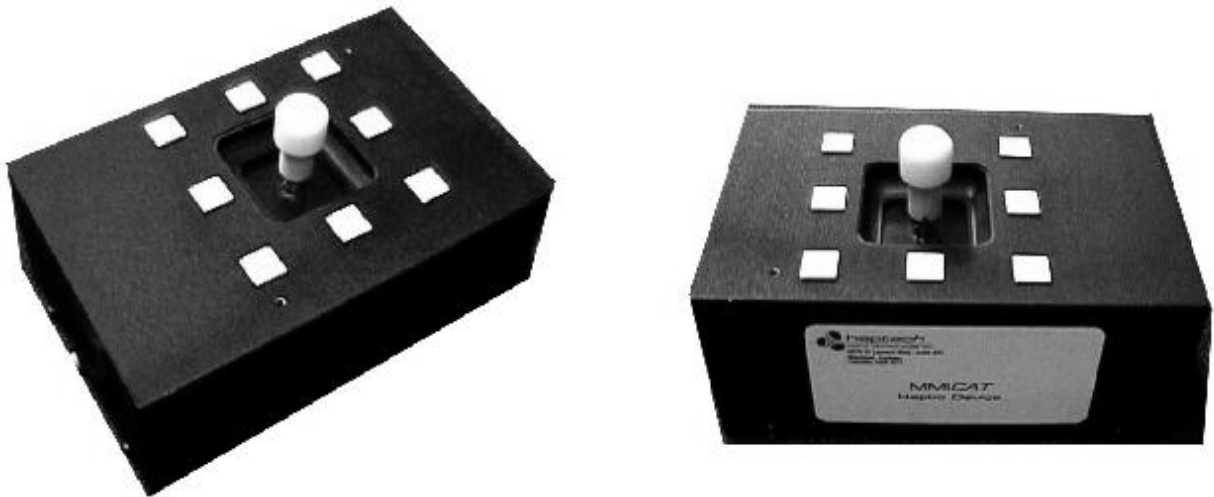


Abbildung 5.1: Aktiver haptischer Joystick

- **Sensoren:** Die Auslenkung des Sticks in beide der zwei Freiheitsgrade wird über die Gelenkstäbe durch zwei rotatorische Positionssensoren ermittelt.

Die maximale Gegenkraft bei Betätigung beträgt am Greifbereich des Sticks 2N. Der insgesamt zur Verfügung stehende Auslenkbereich des Sticks hat die Größe von 42 mm x 42 mm. Des Weiteren ist der Joystick mit 9 binären Drucktasten ausgestattet, welche beliebigen Funktionen zugeordnet werden können. 8 der Drucktasten sind in einem Rechteck um den Stick herum angeordnet, die neunte Drucktaste ist in den Stick integriert. Insgesamt ist die Einheit 17 cm lang x 11 cm breit x 7 cm hoch. Der Stick ragt dabei 28 mm aus der Einheit heraus.

5.1.2 Peripherie

Im Gehäuse des Joysticks befinden sich die Elektromotoren, die eine bestimmte Haptik erzeugen, die Positionssensoren, sowie die Mechanik zur Kraft- und Bewegungsübertragung auf den Joystick. Angesteuert werden die Elektromotoren über einen externen Mikrocontroller. Dieser ist mit dem Joystick über eine DB-25-Schnittstelle verbunden.

Um Störungseinflüsse zu minimieren, wurde die Kabellänge so gering wie möglich gehalten. Des Weiteren versorgt der Mikrocontroller den Joystick mit Strom.

Der Mikrocontroller kommuniziert mit dem Steuer-Rechner über eine USB-Schnittstelle (Universal Serial Bus). Die Stromversorgung erfolgt über einen 12V-Gleichstrom-Anschluss.

Der Mikrocontroller ermittelt die aktuelle Cursorposition des Joysticks und leitet sie an den Rechner weiter. Das Steuerprogramm auf dem Rechner nimmt die X- und Y-Position entgegen und entscheidet, welche Haptik spürbar sein soll. Diese Information wird an den Mikrocontroller geschickt, der dann die eigentlichen Steuerbefehle an die Motoren des Joysticks sendet, die dann entgegen der ursprünglichen Bewegungsrichtung der menschlichen Hand eine entsprechende Gegenkraft verursachen.

Dargestellt ist der gesamte Zusammenhang in Abbildung 5.2:

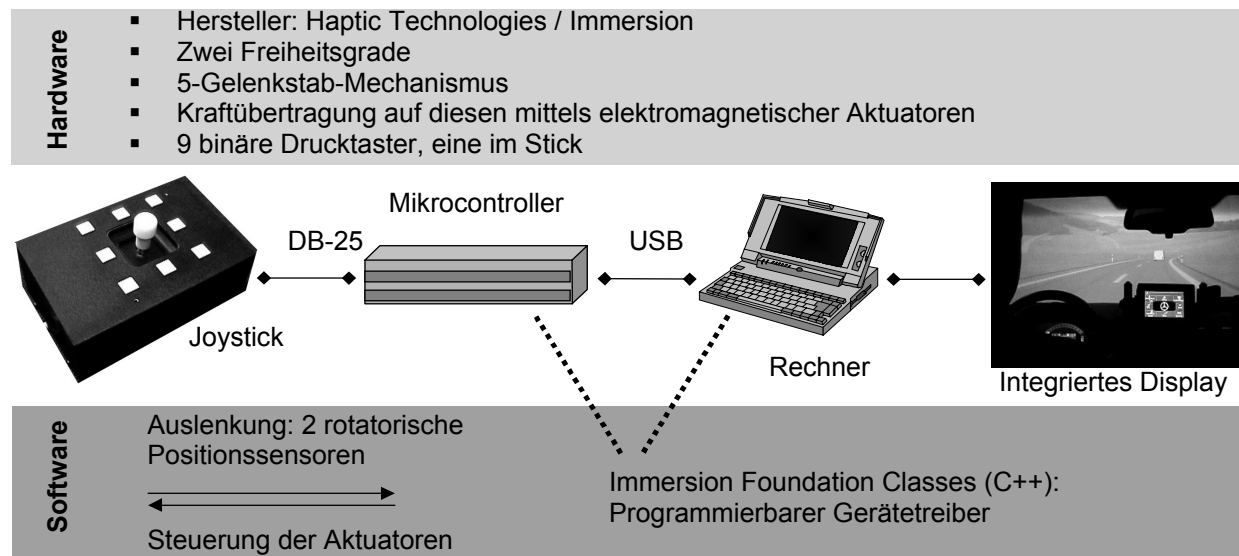


Abbildung 5.2: Hardware-/Software-Peripherie

5.2 Software

5.2.1 TouchSense for VAPS™

Der softwareseitige Aufbau der Entwicklungsumgebung erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurde für die Entwicklung der grafischen Benutzeroberflächen das Software-Tool VAPS™ und für die Definition der haptischen Effekte die Software „TouchSense for VAPS™“ verwendet.

VAPS™ ist ein Software-Tool zur Entwicklung und Simulation interaktiver grafischer Benutzerschnittstellen. Mit dem speziell entwickelten Software-Tool „TouchSense for VAPS™“ lassen sich Elemente oder Bereiche grafischer Benutzeroberflächen mit bestimmten Kräften für den Joystick belegen. Man kann Objekte zeichnen, Objekten Kräfteigenschaften zuordnen und ihr Ereignis-/Antwort-Verhalten spezifizieren. Auch die Einbindung von vorgefertigten Bitmaps ist durch VAPS™ auf einfache Weise möglich. Aber nicht nur Kräfte an sich, sondern auch bestimmte Effekte wie Texturen, Vibrationen, Reibung, Dämpfung und Steifigkeit können realisiert werden: Sie sind am Joystick spürbar, sobald man einen bestimmten Bereich ansteuert. Abbildung 5.3 zeigt die Benutzeroberfläche von „TouchSense for VAPS™“.

Das Software-Tool „TouchSense for VAPS™“ bietet die Möglichkeit, mit wenig Aufwand und kurzer Einarbeitungszeit einfache Haptiken zu definieren, was den Einsatz zu Experimentierzwecken erleichtert. Man stößt damit aber auch sehr schnell an Grenzen. Zwei wesentliche Nachteile von „TouchSense for VAPS™“ führten zu der Entscheidung, diese Software im Weiteren nicht mehr zu verwenden:

- Die Qualität der Haptik war nicht befriedigend. Vermutlich entstanden bei der Verwendung von VAPS™ minimale zeitliche Verzögerungen, was in Bezug auf die Haptik aber zu einem drastischen Qualitätsverlust führte. Wie in Abschnitt 2.1.2.2 besprochen wurde, müssen programmierte Kräfte mindestens 300-mal in der Sekunde ausgegeben werden, damit beim Benutzer ein realistischer Eindruck entsteht. Im vorliegenden Fall lag die Ausgabefrequenz niedriger und führte zu unkontrollierten Zitterbewegungen des Joysticks oder zu undefinierten Bereichen, in denen keine Kräfte zu spüren waren.
- Bei der Definition von hierarchischen Bedienkonzepten mit unterschiedlichen Benutzeroberflächen wurde „TouchSense for VAPS™“ sehr schnell unhandlich, da bei der Definition der Haptik die Anzahl der Effekte beschränkt ist und die Programmierung sehr schnell umständlich wurde.

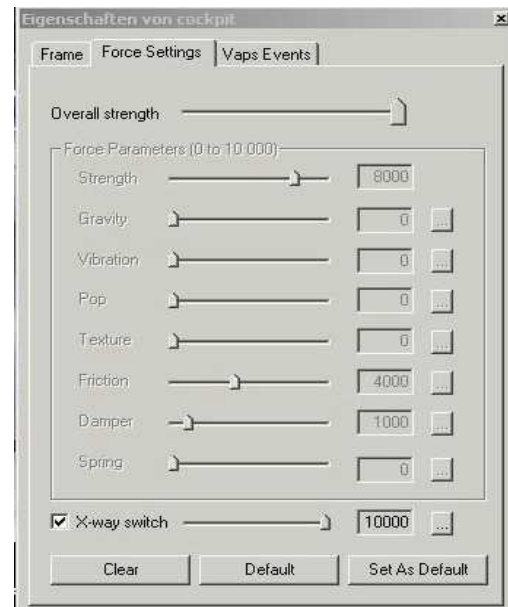


Abbildung 5.3: Bedienoberfläche von TouchSense for VAPS™

5.2.2 Programmierung mit C++ - das 3-Ebenen-Modell

Aufgrund der beschriebenen Nachteile wurden die später beschriebenen Anwendungen deshalb in C++ programmiert. Hierbei werden die Immersion Foundation Classes (IFC) zur Definition haptischer Effekte verwendet (s. <http://www.immersion.com>). Dabei handelt es sich um eine im Internet öffentlich zugängliche Sammlung von Bibliotheken und Beispielen haptischer Effekte. Die IFC erlauben dem Softwareentwickler, auf einfache und flexible Weise Anwendungen für aktive haptische Geräte zu programmieren.

Im Folgenden soll der Zusammenhang zwischen der grafischen Benutzeroberfläche und der dazugehörigen Haptik erklärt werden. Wie in Abbildung 5.4 zu sehen ist, kann man das Wirkprinzip am besten mit Hilfe eines 3-Ebenen-Modells erklären.

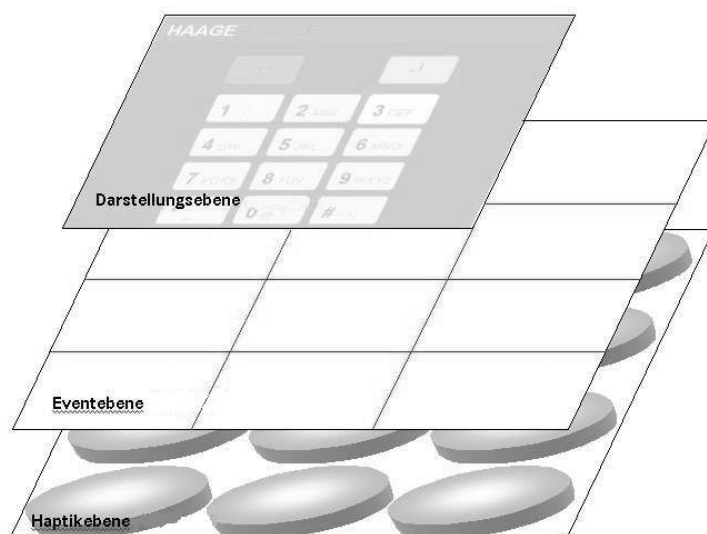


Abbildung 5.4: Das 3-Ebenen-Modell

Eventebene

In der Eventebene ist die Logik der Anwendung programmiert. Die Eventebene selbst verfügt weder über optische noch haptische Rückmeldung, steuert aber allein die beiden für die Rückmeldung zuständigen Ebenen. Den Befehlen, die sich aus der aktuellen Cursorsteuerung durch den Benutzer und den damit verbundenen Manipulationen ergeben, folgen Ausgaben sowohl an die Haptik- als auch an die Darstellungsebene. So ruft die Eventebene zum einen die dazugehörige Menüaktion auf und schickt zum anderen die für diese Position festgelegte haptische Eigenschaft über den Mikrocontroller zum Joystick. Dadurch, dass diese Ebenen nur über diese Befehle miteinander verknüpft sind, wird eine freie Gestaltung jeder einzelnen Ebene für sich ermöglicht. Auch die grafischen Auflösungen der Darstellungs- und der Haptikebene sind voneinander unabhängig.

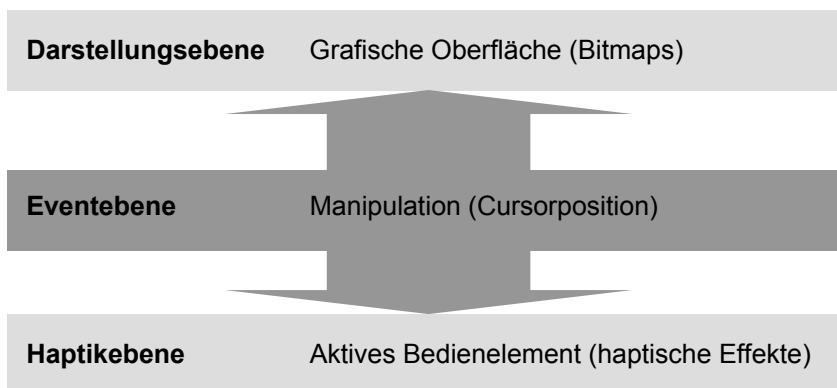


Abbildung 5.5: Interaktion zwischen den drei Systemebenen

Die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Ebenen müssen hierbei in der Art erfolgen, dass die vorgenommenen Interaktionen den Erwartungen des Benutzers entsprechen und sich die Aktionen am Stellteil immer analog in den Ausgabemodalitäten widerspiegeln (Mapping). Die Befehle leiten sich aus der Interaktion von Cursorposition und Drucktaster des Joysticks mit Feldern in der Eventebene ab, welche in dieser frei definiert werden können und lediglich in ihrer maximalen Anzahl durch die Software begrenzt sind.

Darstellungsebene

Die Darstellungsebene ist die visuelle Oberfläche der Anwendung. Sie zeigt dem Benutzer, in welchem Menü er sich gerade befindet und welche Interaktionsmöglichkeiten genutzt werden können. Die Elemente der Oberfläche werden, wie bereits beschrieben, durch die Eventebene gesteuert. Dabei handelt es sich um den Einsatz verschiedener Bitmaps, die je nach Aktion angezeigt werden. Wird zum Beispiel ein Schaltelement mit dem Joystick angesteuert, so ändert sich die Farbe, um dem Benutzer anzuzeigen, dass es sich im aktivierten Zustand befindet. Löst der Anwender dieses Schaltelement durch Klicken des Drucktasters aus, so ändert sich der Farbzustand von „aktiviert“ auf „gedrückt“. Jedes Schaltelement besitzt für jeden Zustand ein Bitmap.

Haptikebene

Die Haptikebene bestimmt die haptischen Eigenschaften des aktiven Bedienelements. Sie besteht aus der Definition verschiedener Effekte bezüglich der X- und Y-Position des Joystickcursors. Die verschiedenen Effekte werden von den Immersion Foundation Classes (IFC) als Funktionen zur Verfügung gestellt, die unter C++ eingebunden werden.

Auffallend ist die geometrische Ähnlichkeit zwischen Event- und Haptikebene. Da beide direkt mit der Stellung des Joysticks korrelieren, würde hier eine Abweichung der geometrischen Proportionen das Echtheitsgefühl (Immersion) schmälern. Außerdem ist eine direkte Verknüpfung zwischen Cursorposition und haptischer Rückmeldung erwünscht.

Haptische Effekte

Ein haptischer Effekt ist die Darstellung einer haptischen Empfindung im Computer, die der Benutzer am Bedienelement spürt. Dem Entwickler stehen folgende Effekte zur Verfügung:

- Vibrierende Effekte:
 - „**Periodic**“: Mit diesem Effekt können Vibrationen wie etwa das Brummen eines elektrischen Rasierers, das Surren eines Ventilators oder das Schütteln von Autorädern auf unebener Fahrbahn erzeugt werden.
- Positionsabhängige Effekte:
 - „**Texture**“: Dieser Effekt kann spezielle Oberflächenstrukturen simulieren wie etwa die von Schmirgelpapier, die eines Waschbretts oder der Bespannung eines Tennisschlägers.
 - „**Enclosure**“: Damit können rechteckige Begrenzungen definiert werden. Die Grenzlinien können sich dabei wie harte Wände verhalten oder aber auch magnetisch sein und den Cursor anziehen.
 - „**Ellipse**“: Damit können elliptische oder kreisförmige Begrenzungen definiert werden. Die Funktionsweise entspricht der des „Enclosure“-Effekts.
 - „**Spring**“: Dieser Effekt bewirkt eine Anziehung oder Abstoßung des Cursors. Er kann auseinander gezogen oder zusammengedrückt werden, er hat jedoch immer eine lineare Wirkungsweise.
 - „**Grid**“: Dieser Effekt ermöglicht es, dass der Cursor des Benutzers auf einer Linie oder einem Knotenpunkt einschnappt bzw. abgestoßen wird.
- Richtungsabhängige Effekte:
 - „**Constant**“: Hierbei handelt es sich um eine dauerhafte Kraft, die das Bedienelement in eine bestimmte Richtung drückt.
 - „**Ramp**“: Dieser Effekt ist eine Kraft, die in Abhängigkeit der Zeit steil ansteigt oder abfällt.
- Widerstandseffekte:
 - „**Damper**“: Der Effekt Dämpfung widersetzt sich Bewegungen des Bedienelements. Er verhält sich linear, d. h. je schneller das Bedienelement bewegt wird, desto größer ist die Gegenkraft.
 - „**Friction**“: Dieser Effekt simuliert Reibung. Er ist ebenfalls geschwindigkeitsabhängig.
 - „**Inertia**“: Dieser Trägheitseffekt widersetzt sich Änderungen der Bewegungsgeschwindigkeit (Beschleunigung/Abbremsung des Bedienelements).

Die in den IFC angebotenen haptischen Effekte können einzeln oder kombiniert verwendet werden, wobei beachtet werden muss, dass die Rückwirkungen zu starker Kräfte die Bedienung behindern können. Da die Kräfte der einzelnen Effekte sich additiv überlagern, kann es zu Interferenzen kommen; für den Fall entgegen gesetzter Kräfte auch dazu, dass sich die einzelnen Kräfte gegenseitig aufheben.

5.3 MMI-Fahrsimulator

Wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen war die parallel durchzuführende Fahraufgabe. Dadurch soll verhindert werden, dass die Probanden sich zu stark auf die Bedienung und die Bedienelemente konzentrieren können. Des Weiteren entspricht dies auch mehr der tatsächlichen Situation im Fahrzeug während der Fahrt.



Abbildung 5.6: Fahrsimulator

Aus diesem Grund fand ein Großteil der Untersuchungen im MMI-Fahrsimulator der DaimlerChrysler-Fahrzeufforschung in Untertürkheim statt. Der statische Fahrsimulator besteht im Wesentlichen aus einem Fahrzeug (Mercedes-Benz W210), Großbildprojektion und Geräuschsimulation. Gesteuert wird der Fahrsimulator von einer Workstation SilikonGraphics Octane (Fahrtdynamik, Darstellung der Fahrsituation) und einem PC für die Simulation der Fahrgeräusche. Ein weiterer PC erzeugt die Darstellung des Kombi-Instruments.

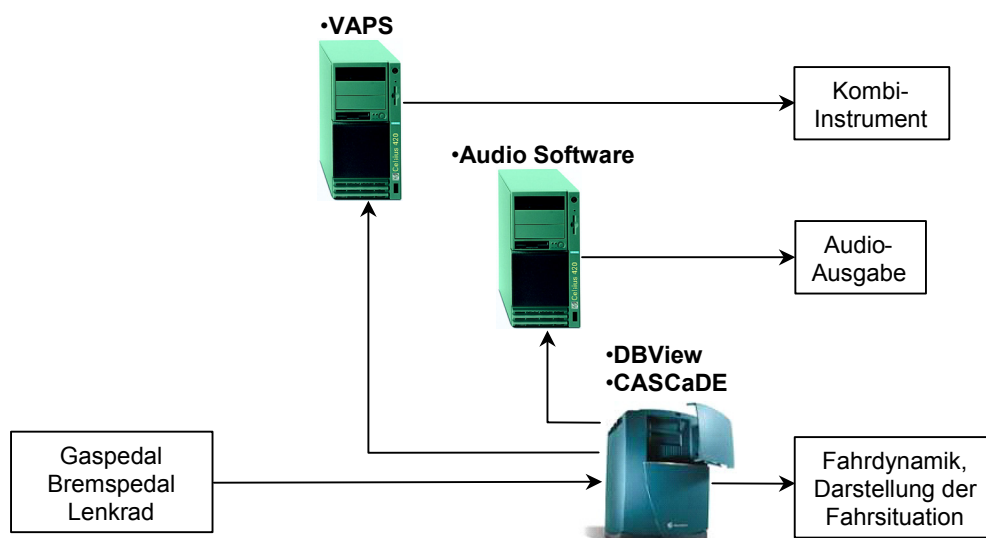


Abbildung 5.7: Rechner-Peripherie Fahrsimulator

5.4 Versuchsfahrzeug

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Mercedes-Benz S-Klasse als Versuchsfahrzeug verwendet. An dem Fahrzeug wurden folgende Umbauten vorgenommen:

- Wie in der Abbildung 5.8 zu sehen ist, wurde ein Informationsdisplay fest an einer dafür optimalen Position (vgl. Untersuchungen von SCHATTENBERG, 2002) in die Instrumententafel integriert. Bei dem Display handelte es sich um handelsübliches Farbdisplay mit einer Auflösung von 1024 x 768 Pixeln.



Abbildung 5.8: Integration Display

- Zur Unterbringung des Bedienelements zur Interaktion mit dem Fahrerinformationssystem wurde ein freitragender Auslegearm angefertigt, der an der Position des Ganghebels angebracht wurde. Der Ausleger besitzt eine Grundplatte, auf dem mit Hilfe von Permanentmagneten das Bedienelement fest positioniert werden kann. Der Ganghebel musste dafür um 30 mm nach rechts verlegt werden. Der Auslegearm ist in mehreren Dimensionen frei einstellbar, sodass jede Körpergrößengruppe sich eine optimale Position für das Bedienelement einstellen kann.
- Im Kofferraum des Fahrzeugs wurde ein Industrie-PC mit Stromversorgung über eine zweite Autobatterie installiert. Verbindungskabel zum Display und Bedienelement wurden unter dem Fahrzeugteppich verlegt.



Abbildung 5.9: Auslegearm



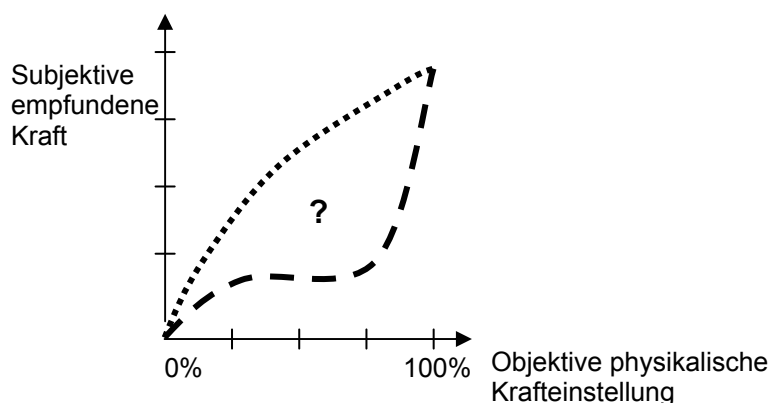
Abbildung 5.10: Kofferraum Versuchsfahrzeug

6 Untersuchung zur Differenzierbarkeit von Betätigungskräften und –wegen eines aktiven haptischen Joysticks

6.1 Einleitung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die haptische Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrerinformationssystem unter Verwendung eines in seiner Haptik frei programmierbaren aktiven Joysticks untersucht. Um die generelle Fragestellung beantworten zu können, wie diese haptische Schnittstelle optimalerweise gestaltet sein sollte, gilt es zunächst geeignete Kräfteinstellungen für den beschriebenen Joystick zu finden. Die Angaben in Kapitel 2.2.2 stellen dabei nur eine eingeschränkte Hilfe für die Spezifikation von Betätigungskräften und –wegen dar. Die Werte gelten für herkömmliche Bedienelemente und können somit lediglich als Richt- und Vergleichswerte dienen.

Im Anschluss an dieses Experiment soll eine Probandenuntersuchung durchgeführt werden, bei der verschiedene Einstellungen der haptischen Parameter Betätigungsweg und -kraft bewertet werden sollen. Zur Auswahl geeigneter Faktorstufen soll in der in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchung aber zunächst folgender Zusammenhang überprüft werden:



Wie wir im Abschnitt 2.1.1 gesehen haben, kann nicht automatisch von einer linearen Beziehung zwischen Reiz und Empfindung ausgegangen werden. Das vorliegende Experiment hat somit etwas den Charakter einer psychophysischen Grundlagenuntersuchung.

6.2 Zielsetzung und Fragestellung

Für die haptischen Parameter (= unabhängige Variablen)

- **Betätigungskraft** und
- **Betätigungsweg bis Druckpunkt**

soll es in der nachfolgenden Untersuchung zwei Faktorstufen geben. Zur Auswahl geeigneter Werte wird in diesem Experiment untersucht, inwieweit bestimmte Werte im Einstellbereich des Joysticks differenziert werden können, um sicher zu gehen, dass die zwei Faktorstufen deutlich unterschieden werden können.

6.3 Hypothesen

Wie in Kapitel 2.1.2 dargelegt wurde, ist der menschliche haptische Sinneskanal ein überaus leistungsfähiges Wahrnehmungssystem, so dass erwartet werden kann, dass im Betätigungskraft- und –wegbereich des Joysticks sich Einstellungen finden lassen, die von einer großen Mehrheit differenziert werden können.

6.4 Methode

6.4.1 Stichprobe

Insgesamt nahmen 20 Probanden an der Untersuchung teil. Die Stichprobe setzte sich wie folgt zusammen:

Vpn	Männlich	Weiblich	Jüngste Vp	Älteste Vp	Mittleres Alter
20	13	7	21	53	32

Aufgenommen wurden die Körpermaße Körpergröße, Handlänge und Handflächenlänge. In Bezug auf diese Maße entspricht die Stichprobe sehr gut der Gesamtbevölkerung (Bandbreite, Durchschnitt). Leider befand sich nur eine Linkshänderin unter den 20 Probanden, sodass keine Aussagen zur Händigkeit gemacht werden können.

Bedingt durch das berufliche Umfeld besaß etwas mehr als die Hälfte der Probanden eine ingenieurwissenschaftliche Ausbildung. Es nahmen aber auch Psychologen, Studenten und nicht-studierte Mitarbeiter aus der Werkstatt teil.

6.4.2 Hard- und Software

Als Hardware wurde der in Abschnitt 5.1 beschriebene aktive haptische Joystick verwendet. Der Versuchsaufbau ergab für die Vpn eine Körperhaltung bei Bedienung, die der Fahrerhaltung im Kraftfahrzeug sehr nahe kommt.

Softwareseitig wurde das in Abschnitt 5.2.1 beschriebene Tool VAPS™ und für die Definition der haptischen Effekte die Software TouchSense for VAPS™ verwendet. Darüber hinaus wurde eine spezielle Anwendung namens „x-way-switch–Effekt“ entwickelt. Mit diesem Effekt konnte Folgendes verwirklicht werden:

- Eine softwareseitige automatische Zuordnung der Auslenkungsrichtung zu einer definierbaren Anzahl an Betätigungsrichtungen
- Eine automatische Rückstellung des Sticks in die Mittelposition nach erfolgter Auslenkung
- Zahlreiche einstellbare haptische Parameter (vgl. Abschnitt 5.2.2.4)

6.4.3 Versuchsdesign

Zur Bestimmung einer möglichst exakten Beziehung zwischen Reiz und Empfindung über ein gesamtes Kontinuum möglicher Reizstärke bietet sich die Methode der direkten Skalierung mit Größenschätzung an. Sie geht auf S.S. STEVENS zurück. Der Vp

werden dabei abwechselnd ein bekannter konstanter Standardreiz und einzuschätzende Vergleichsreize dargeboten.

Als Standardreiz für die Variable „**Betätigungskraft**“ wurde folgende Einstellung gewählt (F entspricht dabei jeweils der Gegenkraft bei Auslenken des Joysticks, s ist der Betätigungsweg):

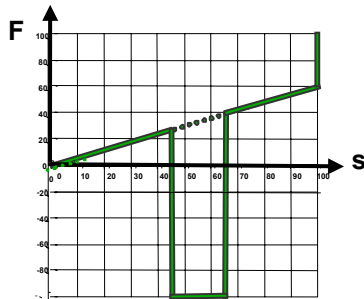


Abbildung 6.1: Standardreiz Betätigungskraft (max. Gegenkraft 52%)

Der Standardreiz wurde so groß wie möglich gewählt. Er stellt den maximal vertretbaren Wert dar, bei dem die programmierte Haptik mit einer Auslenkung in die vier Grundrichtungen und anschließender Rückstellung einwandfrei ohne irritierendes Rütteln funktioniert. Die Einstellungen der drei Vergleichsreize wurden so gewählt, dass die objektiven Unterschiede der vier Reize äquidistant und möglichst groß sind:

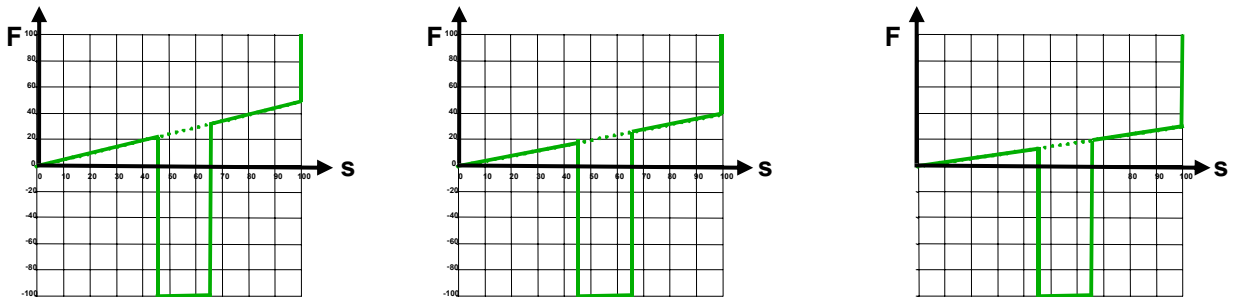


Abbildung 6.2: Vergleichsreize 1, 2 und 3 Betätigungskraft (max. Gegenkräfte 44%, 36%, und 28%)

Entsprechend wurden der Standardreiz und drei Vergleichsreize für die Variable „**Betätigungsweg bis Druckpunkt**“ bestimmt:

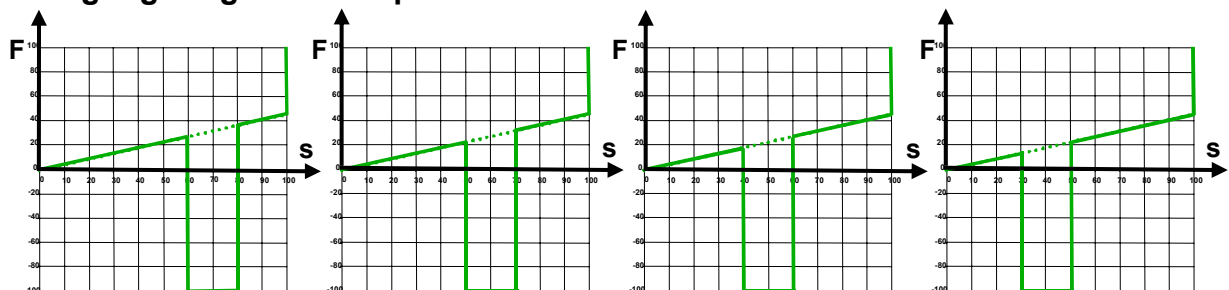


Abbildung 6.3: Standardreiz und Vergleichsreize 1, 2 und 3 Betätigungsweg bis Druckpunkt (60%/80%, 50%/70%, 40%/60% und 30%/50%)

6.5 Versuchsablauf

Nach der Begrüßung der Probanden wurden sie gebeten, zunächst den demographischen Fragebogen auszufüllen. Die anschließende Untersuchung bestand aus zwei Versuchsabschnitten, wobei die Reihenfolge der zwei Abschnitte abgewechselt wurde:

- **Untersuchung zu Betätigungskraft**
- **Untersuchung zu Betätigungsweg bis Druckpunkt**

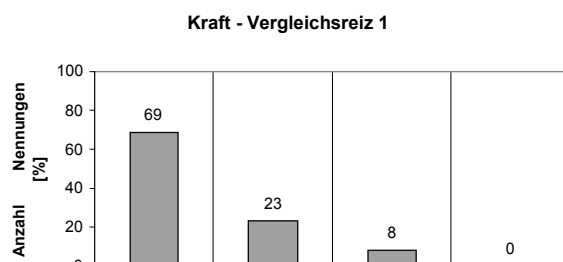
Den Vpn wurden nacheinander der Standardreiz und ein Vergleichsreiz dargeboten. Die Reihenfolge der Vergleichsreize war dabei zufällig. Anschließend wurde der Proband gebeten, den Vergleichsreiz einzuschätzen. Die Antwortmöglichkeiten waren dabei folgendermaßen vorgegeben:

„Die Vergleichs-Haptik ist **gleich groß** / **etwas kleiner** / **deutlich kleiner** / **sehr viel kleiner** als die Standard-Haptik“.

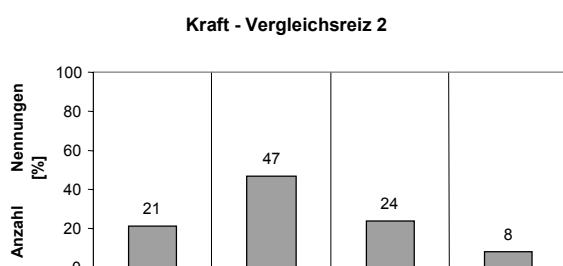
Zur Überprüfung von Schwankungen wurden fünf Messwiederholungen durchgeführt. Um Richtungseffekte auszuschließen, wurden die Vergleichsreize ausschließlich bei der Auslenkung nach links beurteilt.

6.6 Ergebnisse

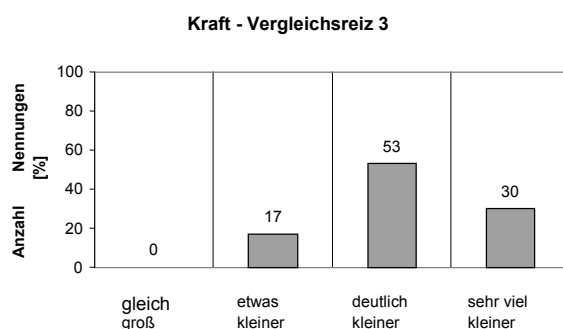
6.6.1 Betätigungskraft



Der Kraft-Vergleichsreiz 1 wird überwiegend als gleich groß wie der Standardreiz bewertet d. h. er kann praktisch nicht differenziert werden.

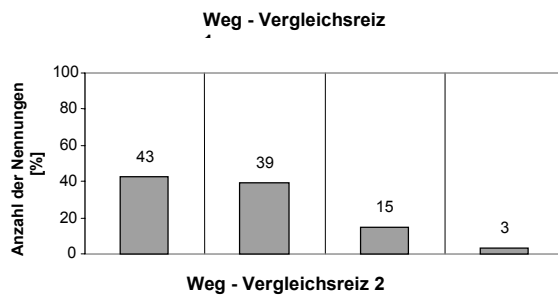


Kraft - Vergleichsreiz 2 kann ebenfalls nur schlecht differenziert werden. Er wird überwiegend als etwas kleiner als der Standardreiz bewertet.

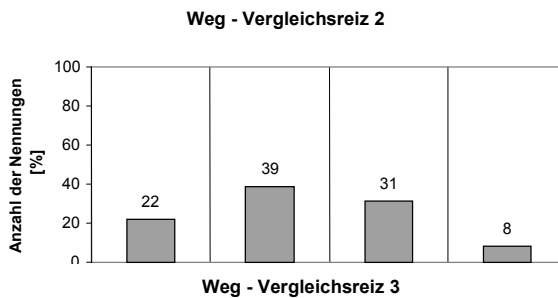


Demgegenüber wird Kraft - Vergleichsreiz 3 überwiegend als deutlich kleiner als der Standardreiz bewertet d. h. er kann gut differenziert werden.

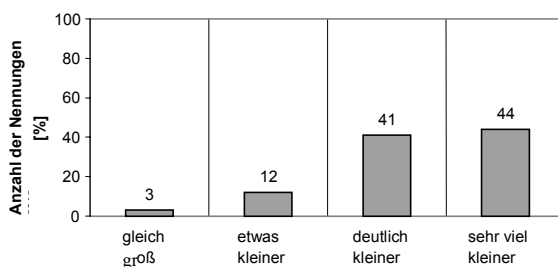
6.6.2 Betätigungsweg



Weg - Vergleichsreiz 1 wird überwiegend als gleich groß bzw. etwas kleiner als der Standardreiz bewertet d. h. kann fast nicht differenziert werden.



Weg - Vergleichsreiz 2 wird überwiegend als etwas kleiner bzw. deutlich kleiner als der Standardreiz bewertet, d. h. dieser Reiz kann bereits ausreichend differenziert werden.



Weg - Vergleichsreiz 3 wird überwiegend als sehr viel kleiner bzw. deutlich kleiner als der Standardreiz bewertet. Dieser Reiz kann somit sehr gut differenziert werden.

Es wurden auch Auswertungen nach demographischen Merkmalen durchgeführt. Signifikante Unterschiede konnten aber nicht nachgewiesen werden.

6.7 Diskussion

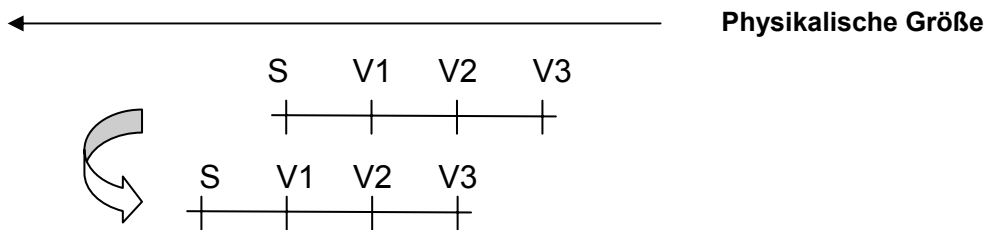
An der Anzahl der Nennungen ist gut die unterschiedliche Differenzierbarkeit der Vergleichsreize zu erkennen. Der Zusammenhang zwischen Reiz und Empfindung scheint im vorliegenden Fall relativ linear zu sein. Die Nennungen zum Betätigungsweg sind etwas breiter verteilt als zur Betätigungskraft.

An dieser Stelle soll noch kurz auf die Ergebnisse des Vergleichsreizes 1 eingegangen werden, welcher dem Standardreiz am ähnlichsten war und fast nicht differenziert werden konnte. Für diesen beobachteten Effekt kann es zwei Gründe geben:

1. Die verwendete Fragestellung mit den Bewertungskategorien „gleich groß“, „etwas kleiner“ usw. könnte das gefundene Ergebnis provoziert haben.
2. Die Standardreiz und Vergleichsreiz 1 zugrunde liegende Haptik kann wirklich nicht differenziert werden.

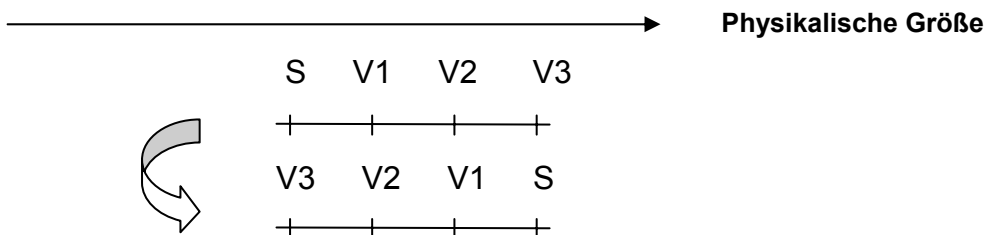
Um den tatsächlichen Grund des gefundenen Effekts ausfindig zu machen, gäbe es folgende Möglichkeiten:

- „Verschieben des Fensters“:



Man könnte so sehr schön sehen, ob zum einen zwischen Standardreiz und Vergleichsreiz 1 der Effekt wieder auftritt und zum anderen, ob zwischen Vergleichsreiz 1 und 2 deutliche Unterschiede in der Bewertung zu beobachten sind. Die Durchführung dieser Möglichkeit würde jedoch an technischen Restriktionen scheitern. Bei dem in der Untersuchung verwendeten Bereich zwischen Standardreiz als größtem und Vergleichsreiz 3 als kleinstem Wert handelt es sich um den maximal realisierbaren Einstellbereich des Joysticks. Werden größere Kräfte verwendet, kommt es zu unangenehmen Vibrationen, bei kleineren Werten funktioniert die Selbstzentrierung des Joysticks nach Auslenkung nicht mehr befriedigend. Ähnliches gilt für den Betätigungsweg bis zum Druckpunkt.

- „Spiegeln der Reize“:



Es werden die gleichen Reize in umgekehrter Reihenfolge verwendet, d. h. der Standardreiz ist der kleinste verwendete Reiz. Die Bewertungskategorien wären dann entsprechend „gleich groß“, „etwas größer“, „deutlich größer“ und „sehr viel größer“. Man könnte auf diese Weise auch gut überprüfen, ob zum einen zwischen Standardreiz und Vergleichsreiz 1 der Effekt wieder auftritt und zum anderen ob zwischen Vergleichsreiz 2 und 3 deutliche Unterschiede in der Bewertung zu beobachten sind. Der große Vorteil dieser Möglichkeit läge darin, dass hierbei die gleichen Reize wie in der durchgeführten Untersuchung verwendet werden. Die Durchführung ergäbe somit keine technischen Probleme.

Man entschied sich im Rahmen dieser Arbeit jedoch gegen eine Wiederholung des Experiments, da die Hauptaufgabe dieser Untersuchung erfüllt wurde, nämlich der Nachweis differenzierbarer Faktorstufen.

6.8 Schlussfolgerung

Die Untersuchung zeigt, dass es im Einstellbereich des Joysticks sowohl für die Variable „Betätigungskraft“ als auch die Variable „Betätigungsweg bis Druckpunkt“ Werte gibt, die sich sehr gut differenzieren lassen. Somit ist die wesentliche Aufgabe der Untersuchung für das darauf folgende Experiment, nämlich der Nachweis der Differenzierbarkeit zweier Faktorstufen, erfüllt.

7 Untersuchung zu den haptischen Eigenschaften eines aktiven haptischen Joysticks in einem Simulatorexperiment

7.1 Einleitung

In Kapitel 2.2.2. haben wir gesehen, dass über den haptischen Sinneskanal die Information einer erfolgten Betätigung codiert werden kann. Dies erscheint als ein wesentlicher Schritt zur Optimierung der beschriebenen haptischen Schnittstelle, da bei der noch zu entwickelnden Bedienoberfläche eines Fahrerinformationssystems (vgl. Kapitel 8, 10 und 11) das Auswählen eines Menüpunkts von zentraler Bedeutung ist. Dies soll durch Auslenken des Joysticks in Form einer Direktmanipulation erfolgen. Folglich gilt es zunächst systematisch zu untersuchen, wie die haptischen Gestaltungsparameter des Joysticks eingestellt sein müssen, damit diese Informationsübertragung über den haptischen Sinneskanal optimal funktioniert.

7.2 Zielsetzung und Fragestellung

Nach dem Nachweis differenzierbarer Einstellungen für die Parameter Betätigungskraft und –weg in der vorangegangenen Untersuchung ist die Zielsetzung dieses Experiments die systematische Untersuchung der Erkennbarkeit einer erfolgten Betätigung über den haptischen Sinneskanal. Die Betätigung erfolgt dabei durch Auslenken des Joysticks. Zusätzlich soll überprüft werden, welche Betätigungskräfte und -wege generell als komfortabel empfunden werden. Hierzu werden unterschiedliche haptische Gestaltungen in einem Probandentest anhand von Paarvergleichen bewertet. Es sollen Präferenzen für die wichtigsten Gestaltungsparameter herausgefunden werden.

Die Fragestellung der vorliegenden Untersuchung ist also, wie die haptischen Gestaltungsparameter des Joysticks

- **Betätigungskraft**
- **Betätigungsweg bis Druckpunkt**
- **Betätigungsweg bis mechanischen Widerstand**

in Abhängigkeit der **Betätigungsrichtung** eingestellt sein müssen, damit die Erkennbarkeit einer erfolgten Betätigung möglichst optimal ist. Des Weiteren soll überprüft werden, inwiefern sich diese Werte von den Einstellungen für eine möglichst komfortable Haptik unterscheiden. Schließlich gilt es generell die Frage zu beantworten, ob anhand subjektiver Bewertungen in Probandenuntersuchungen für spezielle Gestaltungsparameter ein bevorzugter Wert festgestellt werden kann.

7.3 Hypothesen

Die Hypothesen sollen gegliedert nach den haptischen Gestaltungsparametern (= unabhängige Variablen) formuliert werden:

Betätigungsrichtung:

Es wird angenommen, dass sich die Werte für „Auslenkung nach vorne“ von den Werten für „Auslenkung nach hinten“ unterscheiden. Ebenso unterscheiden sich voraussichtlich die Werte für „Auslenkung nach links“ von den Werten für „Auslenkung nach rechts“. Diesen Annahmen liegt die Erkenntnis zugrunde, dass die Zugkräfte der Finger mehr als doppelt so groß sind wie die Druckkräfte. Dies lässt vermuten, dass die optimalen Betätigungskräfte bei Auslenkung nach hinten deutlich stärker sind als bei Auslenkung nach vorn (vgl. Abschnitt 2.1.3).

PHILLIPS ET AL. (2001) konnten in einer Untersuchung der Cursorbahnen von Computermäusen nachweisen, dass die Richtung, in der das anzuwählende Ziel liegt, einen signifikanten Einfluss auf die Cursorpositionierungszeiten hat (vgl. Abschnitt 2.2.3). Dieser Hinweis auf die Richtungsabhängigkeit bei Cursorpositionierungen legt eine gesonderte Untersuchung in Abhängigkeit der vier Grundrichtungen nahe. Wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, haben das vorliegende Bedienelement und die damit auszuführenden Bedienungsaufgaben inhaltlichen Bezug zur Untersuchung von PHILLIPS ET AL.

Es bleibt jedoch abzuwarten, ob sich dies bei der erwarteten Greifart 2-/3-Finger-Zufassungsgriff feststellen lässt. So führt bei dieser Greifart auch der Daumen Betätigungsbewegungen aus, welcher durch seinen anatomischen Aufbau größere Kräfte aufbringen kann als die übrigen Finger.

Betätigungskraft:

Es wird erwartet, dass die Haptik-Varianten mit einer großen Betätigungskraft bei der Bewertung der Erkennbarkeit der Betätigung deutlich besser abschneiden als die Varianten mit kleiner Betätigungskraft. Vermutlich wird die kleine Betätigungskraft bei der Frage nach einer möglichst komfortablen Haptik deutlich besser bewertet.

Im Weiteren ist zu erwarten, dass im Laufe einer längeren Bediendauer aufgrund der Kraftnachgiebigkeit des Menschen geringere Betätigungskräfte bevorzugt werden als zu Beginn der Untersuchung (vgl. Abschnitt 2.1.3). Die Bedienhäufigkeit während des Versuchs ist sehr hoch. Das ist gewollt, denn genau für diesen Anwendungsfall sollen die Betätigungskräfte und –wege spezifiziert werden.

Betätigungsweg bis Druckpunkt:

Generell wird vermutet, dass Varianten mit einem Druckpunkt bei der Frage nach der Erkennbarkeit der Betätigung deutlich besser bewertet werden als Varianten ohne Druckpunkt (vgl. Abschnitt 2.1.3). Hinsichtlich einer möglichst komfortablen Haptik könnte es sein, dass die Varianten ohne Druckpunkt deutlich besser abschneiden.

Betätigung bis mechanischer Widerstand:

Es wird eine Abhängigkeit der Bewertungen für die Variablen „Betätigungskraft“ und „Betätigungsweg bis Druckpunkt“ von dem maximalen Auslenkbereich des Joysticks erwartet.

7.4 Methode

7.4.1 Stichprobe

Zur Durchführung der Untersuchung im MMI-Fahrsimulator standen insgesamt drei Wochen zur Verfügung. Bei einer Versuchsdauer von ca. zwei Stunden pro Proband ergab sich eine Gesamtanzahl von 26 Versuchspersonen, die sich wie folgt zusammensetzte (s. nächste Seite).

Vpn	Männlich	Weiblich	Jüngste Vp	Älteste Vp	Mittleres Alter
26	15	11	20	58	34

Es wurden die Körpermaße Handlänge und Handflächenlänge erfasst, welche wieder sehr gut den Maßen der Gesamtbevölkerung (Bandbreite, Durchschnitt) entsprachen. Unter den 26 Probanden befanden sich wiederum leider nur drei Linkshänder, was Aussagen zur Händigkeit unmöglich macht.

7.4.2 Hard- und Software

Die verwendete Hard- und Software entspricht dem in der ersten Untersuchung verwendeten Material. Es ist in Abschnitt 5.1 und 5.2 ausführlich beschrieben. Zur Darstellung unterschiedlicher Betätigungswege bis zu einem mechanischem Widerstand wurden Abdeckplatten auf den Joystick aufgesetzt, die den Auslenkbereich in gewünschtem Ausmaß einschränkten.

Wesentlicher Bestandteil der Untersuchung war das Fahren im Simulator. Der Hintergrund dieser parallelen Fahraufgabe wird noch ausführlich in Abschnitt 7.4.4 erläutert. Der MMI-Fahrsimulator der DaimlerChrysler-Fahrzeugforschung ist in Abschnitt 5.3 beschrieben. Bei der Fahrstrecke handelte es sich um eine Landstraße mit lang gezogenen Kurven. Die Vpn hatten während des Versuchs die Aufgabe, einem Führungsfahrzeug, welches mit einer konstanten Geschwindigkeit von 60 km/h fuhr, in angenehmen Abstand zu folgen.

7.4.3 Datenaufzeichnung

Die Bewertungen der Vpn wurden während des Versuches direkt mitprotokolliert. Parallel dazu erfolgte eine automatische Aufzeichnung aller Auslenkungen und Tastendrucke um die manuell aufgezeichneten Daten überprüfen zu können. Fahrleistungsdaten wurden nicht erhoben.

7.4.4 Versuchsdesign

Wie bereits beschrieben, mussten die Vpn während der Betätigung des Joysticks und der anschließenden Bewertung im Simulator fahren. Durch die parallele Fahraufgabe sollte zunächst verhindert werden, dass die Probanden sich zu stark auf die haptischen Eigenschaften des Joysticks konzentrieren konnten. Des Weiteren entspricht dies auch mehr der tatsächlichen Situation im Fahrzeug während der Fahrt. Aus diesem Grund fand die Untersuchung im MMI-Fahrsimulator der DaimlerChrysler-Fahrzeugforschung in Untertürkheim statt.

In der Untersuchung wurden die folgenden haptischen Gestaltungsparameter (= unabhängige Variablen) untersucht:

Variable A: Betätigungsrichtung

Um die Richtungsabhängigkeit in Bezug auf die Bewertung von Betätigungskräften und -wegen zu untersuchen, wurde die Auslenkung in die vier Grundrichtungen untersucht. Die Auslenkung in die Diagonalrichtungen wurde nicht untersucht, da dies den Umfang der Untersuchung inakzeptabel vergrößert hätte.

Variable B: Betätigungskraft

Für die Variable „Betätigungskraft“ soll es in der Untersuchung zwei Faktorstufen geben. Wie die vorangegangene Untersuchung zeigte, wurde der Vergleichsreiz 1 überwiegend gleich groß wie der Standardreiz empfunden. Vergleichsreiz 2 wurde überwiegend etwas kleiner, Vergleichsreiz 3 überwiegend deutlich kleiner als der Standardreiz empfunden. Um zu gewährleisten, dass sich die zwei Faktorstufen gut differenzieren lassen und gleichzeitig sich die Werte stärker im optimalen Wirkungsbereich des haptischen Joysticks befinden als der Maximal- und Minimalwert (kein Vibrieren, gute Rückstellung), werden als Kräfte für die folgende Untersuchung

- für die **große Betätigungskraft** das Mittel aus den Werten des Standardreizes und des Vergleichsreizes 1 ausgewählt. Dies entspricht einer maximalen Gegenkraft von 48 % (= 0,96 N).
- für die **kleine Betätigungskraft** das Mittel aus den Werten der Vergleichsreize 2 und 3 ausgewählt. Dies entspricht einer maximalen Gegenkraft von 32 % (= 0,64 N).

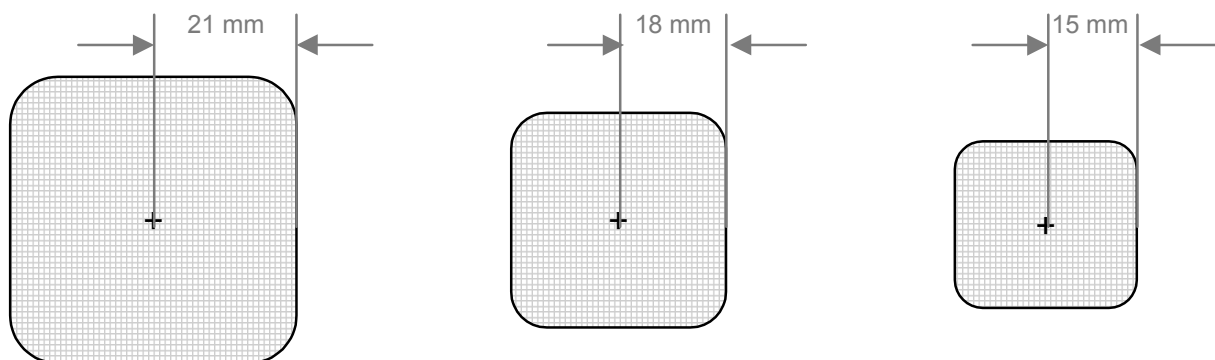
Variable C: Betätigungsweg bis Druckpunkt

In Bezug auf den Verlauf der Gegenkraft bei Auslenkung sollen folgende drei Faktorstufen untersucht werden:

- **Kurzer Weg bis Druckpunkt:** Es zeigte sich in der vorigen Untersuchung, dass der lange Betätigungsweg ab dem Druckpunkt bis zum mechanischen Anschlag bei dem Vergleichsreiz 3 von vielen Vpn als ungewohnt empfunden wurde. Da aufgrund der Ergebnisse angenommen wird, dass sich die Werte des Vergleichsreizes 2 und des Standardreizes auch noch gut differenzieren lassen, wurde für die Untersuchung der Wert des Vergleichsreizes 2 genommen. Dies entspricht einem Wert von 40%/60% des maximalen Auslenkbereichs.
- **Langer Weg bis Druckpunkt:** Hierfür wird die Einstellung des Standardreizes aus der ersten Untersuchung genommen, was einem Wert von 60%/80% des maximalen Auslenkbereichs entspricht.
- **Kein Druckpunkt:** Hierfür wurde die Druckpunkt-Funktion deaktiviert.

Variable D: Betätigungsweg bis mechanischer Widerstand

Es wurden zwei Schablonen angefertigt, die den maximalen Auslenkbereich des Joysticks auf gewünschte Weise einschränken. Somit gibt es insgesamt drei Faktorstufen:



1) Auslenkbereich I

2) Auslenkbereich II

3) Auslenkbereich III

Die empfundene Kraftstärke ist abhängig von der Steigung des Gegenkraftverlaufs und nicht von deren Endstärke. Das bedeutet, dass die Kräfte für die eingeschränkten Auslenkbereiche herunterskaliert werden müssen, um einen identischen Kraftanstieg zu erhalten:

$$Kraft_{\text{AuslenkbereichII}} = \frac{18\text{mm}}{21\text{mm}} = 85,71\% \cdot Kraft_{\text{AuslenkbereichI}}$$

$$Kraft_{\text{AuslenkbereichIII}} = \frac{15\text{mm}}{21\text{mm}} = 71,43\% \cdot Kraft_{\text{AuslenkbereichI}}$$

Versuchsdesign:

Die vollständige Kombination der Variablen B und C ergibt $2 \times 3 = 6$ Haptik-Varianten:

1)	Große Betätigungskraft	+	Kurzer Weg bis Druckpunkt
2)	Große Betätigungskraft	+	Langer Weg bis Druckpunkt
3)	Große Betätigungskraft	+	Kein Druckpunkt
4)	Kleine Betätigungskraft	+	Kurzer Weg bis Druckpunkt
5)	Kleine Betätigungskraft	+	Langer Weg bis Druckpunkt
6)	Kleine Betätigungskraft	+	Kein Druckpunkt

Diese 6 Varianten sollen in Paarvergleichen vollständig miteinander verglichen werden.

Nach der 2. Kombinationsregel ergeben sich $\binom{6}{2} = 15$ Paarvergleiche.

Die Überprüfung der Hypothesen von Variable A (Betätigungsrichtung) wurde nur mit großem Auslenkbereich durchgeführt. Es wird angenommen, dass bei großem Auslenkbereich die Faktorstufen des Faktors A am besten differenziert werden können.

Die Reihenfolge der Betätigungsrichtungen ist vollständig permutiert. Die 15 Paarvergleiche pro Versuchsdurchgang werden ebenfalls in zufälliger Reihenfolge durchgeführt.

Ein Fragebogen zur subjektiven Bewertung soll erfassen, inwieweit eine variable Haptik generell erwünscht ist. Die Befragung könnte auch ergeben, dass Betätigungskräfte und -wege nicht richtungsabhängig sein sollten, da dies als verwirrend oder unangenehm empfunden wird.

7.5 Versuchsablauf

Die Untersuchung wurde standardisiert durchgeführt. Zu Beginn hatte die Vp zunächst die Möglichkeit, in einer kurzen Eingewöhnungsfahrt das Fahren im Fahrsimulator kennen zu lernen. Es folgte die Vorstellung des Bedienelements und die Einweisung in den Versuchsablauf; dabei wurde der Vp jedoch nicht das Spektrum der zu bewertenden Kräfte und Wege vorgestellt.

Nun wurde die Vp angewiesen, während der Fahrt im Fahrsimulator die jeweils 15 Paarvergleiche durchzuführen. Für den Auslenkbereich I erfolgte dies für alle vier Betätigungsrichtungen. Die mündlichen Bewertungen der Vp wurden mitprotokolliert und zur Ermittlung der am besten bewerteten Haptik-Varianten parallel ausgewertet. In einer Fahrpause hatte die Vp die Aufgabe, den demographischen Fragebogen auszufüllen.

Als weiterer Schritt wurden die Paarvergleiche noch einmal für die Auslenkbereiche II und III durchgeführt, allerdings jeweils nur für die Auslenkung nach links. Abschließend wurden die drei Auslenkbereiche anhand von Paarvergleichen direkt miteinander verglichen. Die Vp wurde gebeten in einem Fragen zur subjektiven Bewertung ihre Gesamteinschätzung vorzunehmen.

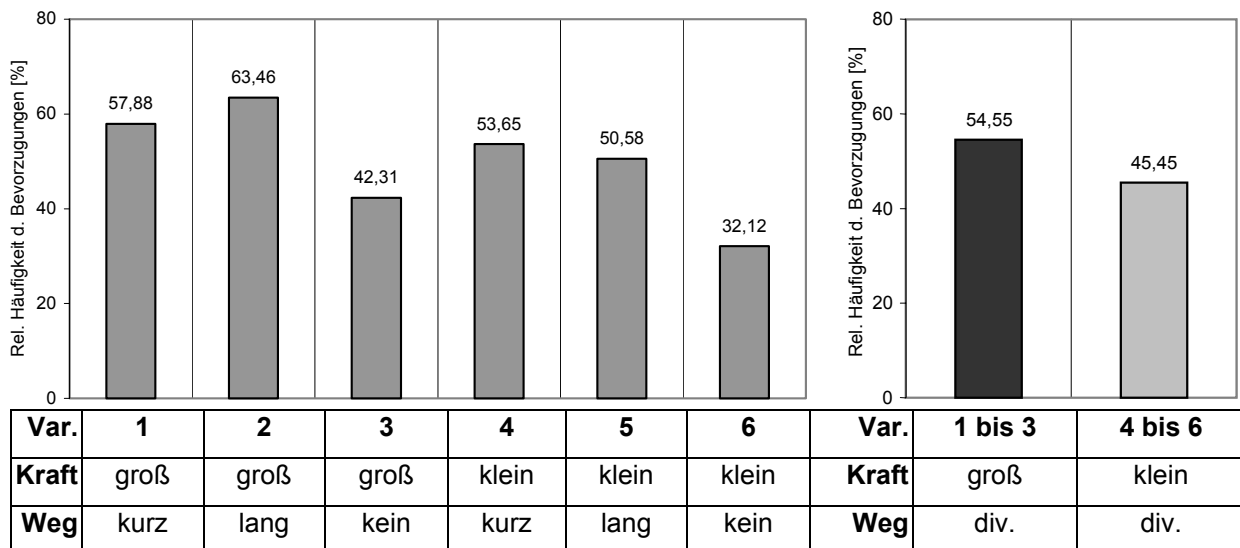
Der zeitliche Umfang der Untersuchung beruht auf der Annahme, dass ein einzelner Paarvergleich nicht länger als 30 Sekunden in Anspruch nimmt. Es ergibt sich eine Gesamtdauer von ca. 90 Minuten. In Vorversuchen wurde der geschätzte zeitliche Umfang der Untersuchung überprüft.

7.6 Ergebnisse

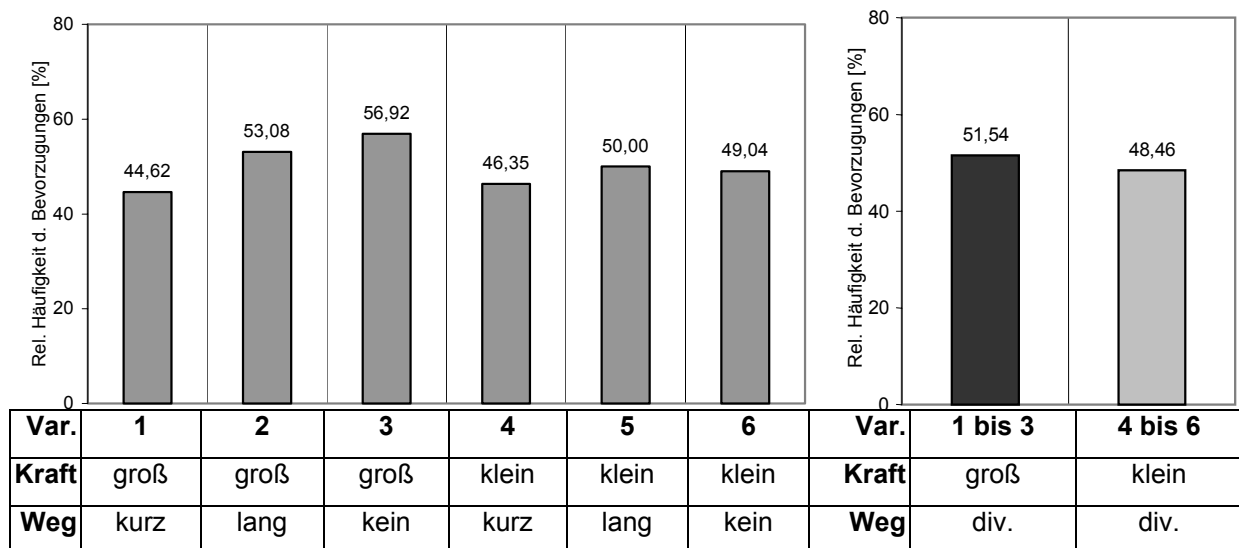
Wird eine Faktorstufenkombination bei der Auslenkung in eine Richtung als besser bewertet, wird ihr der Wert 1 zugeordnet. Der schlechter bewerteten Faktorstufenkombination wird die Zahl 0 zugeordnet. Auf diese Weise erhält man für jede Variante eine Anzahl von Nennungen, wie oft die Variante beim Vergleich mit einer beliebigen anderen Variante bevorzugt wurde. Bezogen auf die maximal mögliche Anzahl von Nennungen ergibt sich die relative Häufigkeit der Bevorzungen, wie sie im Folgenden für die einzelnen Haptik-Varianten dargestellt ist.

7.6.1 Ergebnisse kumuliert

Auf die Frage „Bei welcher der beiden Varianten waren Sie sich **sicherer**, durch Auslenken des Joystick eine Funktion ausgewählt zu haben?“ antworteten die Vpn folgendermaßen (dargestellt sind die Anzahl der Nennungen „besser bewertet“ für den großen Auslenkbereich kumuliert über alle 4 Betätigungsrichtungen)



Die Ergebnisse auf die Frage „Welche der beiden Varianten empfanden Sie als **komfortabler** / angenehmer / sympathischer?“ sind auf der nächsten Seite dargestellt.



Unterschiede zwischen den Häufigkeiten eines k-fach gestuften Merkmals – in der vorliegenden Untersuchung sind dies die sechs Haptik-Varianten – können mit dem allgemeinen eindimensionalen χ^2 -Test überprüft werden [BORTZ, 1993]. Die Nullhypothese lautet hierbei, dass alle sechs Haptik-Varianten gleich gut bewertet werden, der Erwartungswert f_e beträgt im unteren Fall also $f_e = 260$ (Gleichverteilung). Diesem werden die beobachteten Werte f_b gegenübergestellt.

	Erkennbarkeit der Bedienung						Komfort der Haptik					
Variante	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Kraft	groß	groß	groß	klein	klein	klein	groß	groß	groß	klein	klein	klein
Weg	kurz	lang	kein	kurz	lang	kein	kurz	lang	kein	kurz	lang	kein
Großer Auslenkbereich, alle 4 Betätigungsrichtungen												
f_b	301	330	220	279	263	167	232	276	296	241	260	255
f_e	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260
	$p = 0,000$						$p = 0,063$					

Tabelle 7.1: Test auf Gleichverteilung (allgemeiner eindimensionaler χ^2 -Test)

Die Unterschiede in den Nennungen bei der Frage nach der Erkennbarkeit der Bedienung sind hochsignifikant. Hinsichtlich des Bedienkomforts liegt die gefundene Wahrscheinlichkeit von $p = 0,0630$ über dem α -Niveau von 0,05, die Nullhypothese bleibt aufrecht erhalten. Es ließ sich also nicht widerlegen, dass die Unterschiede in den Aussagen zum Komfort der Haptik zufällig aufgetreten sind. Aus diesem Grund werden im Weiteren nur die Ergebnisse der Befragung bezüglich der Erkennbarkeit einer erfolgten Bedienung einer weiteren statistischen Überprüfung unterzogen.

Im Anschluss an die Gesamtsignifikanz wird die Frage untersucht, ob sich einzelne Haptik-Varianten von den übrigen Varianten bedeutsam unterscheiden [BORTZ, 1993]. Hierzu wird der beobachtete Wert f_b für eine Variante mit dem Durchschnittswert der übrigen Varianten f_d verglichen. Der Erwartungswert f_e ist dabei jeweils der Mittelwert aus den beiden Werten. Die Ergebnisse sind auf der nächsten Seite dargestellt.

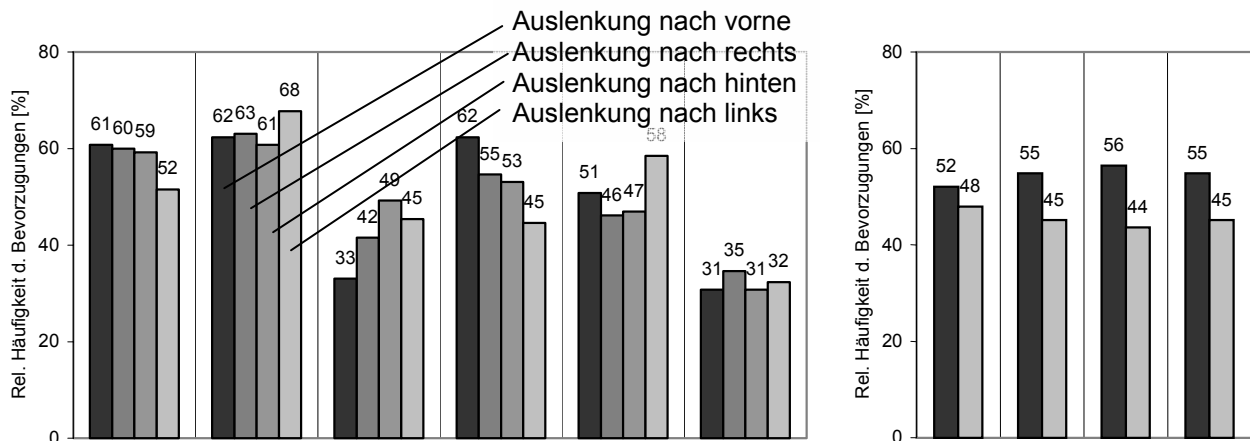
	Erkennbarkeit der Bedienung					
Variante	1	2	3	4	5	6
Kraft	groß	groß	groß	klein	klein	klein
Weg	kurz	lang	kein	kurz	lang	kein
Großer Auslenkbereich, alle 4 Betätigungsrichtungen						
f_b	301	330	220	279	263	167
f_d	251,8	246	268	256,2	259,4	278,6
f_e	276,4	288	244	267,6	261,2	222,8
	p = 0,036	p = 0,001	p = 0,030	p = 0,324	p = 0,8745	p = 0,000

Tabelle 7.2: Unterschiede einzelner Haptik-Varianten (allgemeiner eindimensionaler χ^2 -Test)

Das Ergebnis zeigt, dass die Variante „Große Betätigungskraft, langer Weg bis Druckpunkt“ auf dem 1%-Niveau hinsichtlich der Erkennbarkeit der Bedienung signifikant besser bewertet wird. Die Variante „Kleine Betätigungskraft, kein Druckpunkt“ wird hochsignifikant schlechter bewertet.

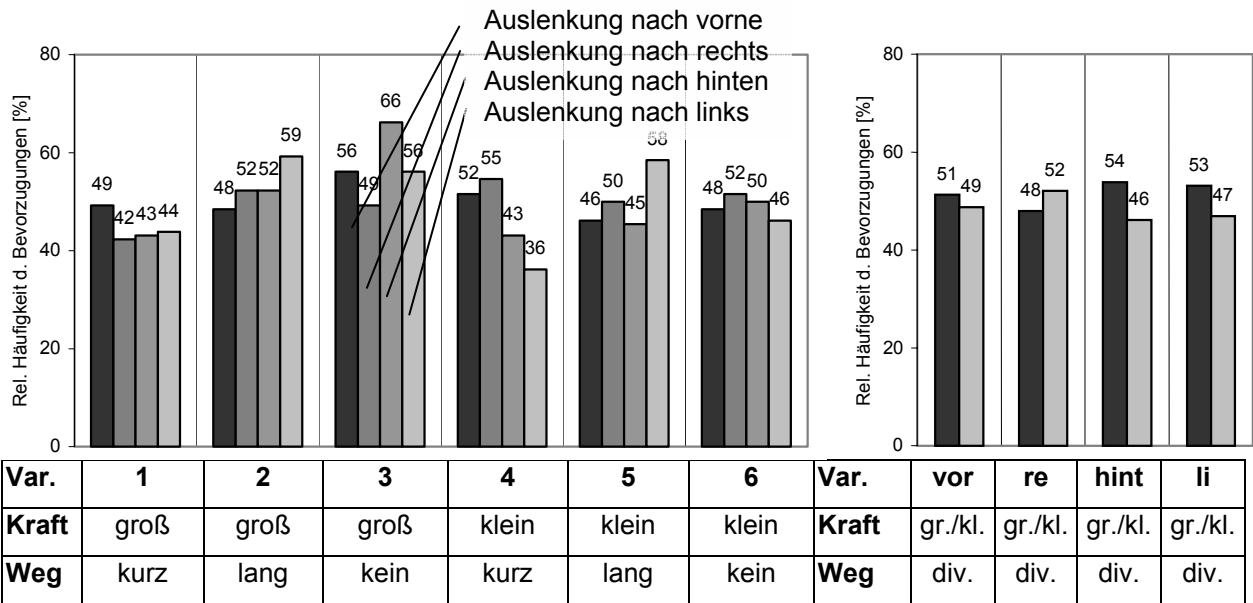
7.6.2 Betätigungsrichtung

Wie in Abschnitt 7.4.4 beschrieben, wurde die Auslenkung in vier Richtungen untersucht. Auf die Frage „Bei welcher der beiden Varianten waren Sie sich **sicherer**, durch Auslenken des Joysticks eine Funktion ausgewählt zu haben?“ ergeben sich folgende relative Häufigkeiten der Bevorzugungen für die vier Betätigungsrichtungen:



Var.	1	2	3	4	5	6	Var.	vor	re	hint	li
Kraft	groß	groß	groß	klein	klein	klein	Kraft	gr./kl.	gr./kl.	gr./kl.	gr./kl.
Weg	kurz	lang	kein	kurz	lang	kein	Weg	div.	div.	div.	div.

Die Ergebnisse der Frage „Welche der beiden Varianten empfanden Sie als **komfortabler** / angenehmer / sympathischer?“ sind wieder auf der nächsten Seite dargestellt.



Die statistische Auswertung überprüft hierbei, ob sich die Nennungen für einzelne Auslenkbereiche bzw. für einzelne Betätigungsrichtungen signifikant von den anderen unterscheiden [BORTZ, 1993]. Die folgende Tabelle zeigt den Vergleich der vier Betätigungsrichtungen:

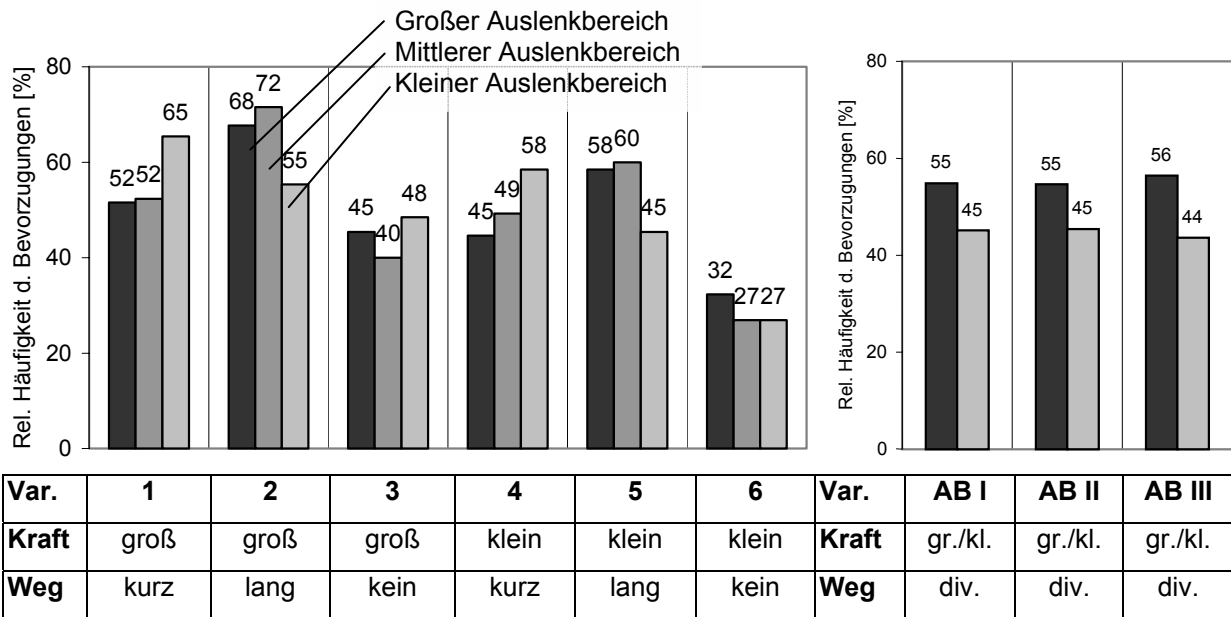
	Erkennbarkeit der Bedienung						Komfort der Haptik					
Varianten	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Kraft	groß	groß	groß	klein	klein	klein	groß	groß	groß	klein	klein	klein
Weg	kurz	lang	kein	kurz	lang	kein	kurz	lang	kein	kurz	lang	kein
Unterschied Betätigung nach rechts zu nach vorne, großer Auslenkbereich												
f_b	78	82	54	71	60	45	55	68	64	71	65	67
f_e	79	81	43	81	66	40	64	63	73	67	60	63
	$p = 0,387$						$p = 0,596$					
Unterschied Betätigung nach hinten zu nach vorne, großer Auslenkbereich												
f_b	77	79	64	69	61	40	56	68	86	56	59	65
f_e	79	81	43	81	66	40	64	63	73	67	60	63
	$p = 0,028$						$p = 0,347$					
Unterschied Betätigung nach links zu nach vorne, großer Auslenkbereich												
f_b	67	88	59	58	76	42	57	77	73	47	76	60
f_e	68	93	52	64	78	35	64	63	73	67	60	63
	$p = 0,663$						$p = 0,014$					
Unterschied Betätigung nach hinten zu nach rechts, großer Auslenkbereich												
f_b	77	79	64	69	61	40	56	68	86	56	59	65
f_e	78	82	54	71	60	45	55	68	64	71	65	67
	$p = 0,761$						$p = 0,045$					
Unterschied Betätigung nach links zu nach rechts, großer Auslenkbereich												
f_b	67	88	59	58	76	42	57	77	73	47	76	60
f_e	78	82	54	71	60	45	55	68	64	71	65	67
	$p = 0,098$						$p = 0,021$					
Unterschied Betätigung nach links zu nach hinten, großer Auslenkbereich												
f_b	67	88	59	58	76	42	57	77	73	47	76	60
f_e	77	79	64	69	61	40	56	68	86	56	59	65
	$p = 0,143$						$p = 0,078$					

Tabelle 7.3: Vergleich der Betätigungsrichtungen (allgemeiner eindimensionaler χ^2 -Test)

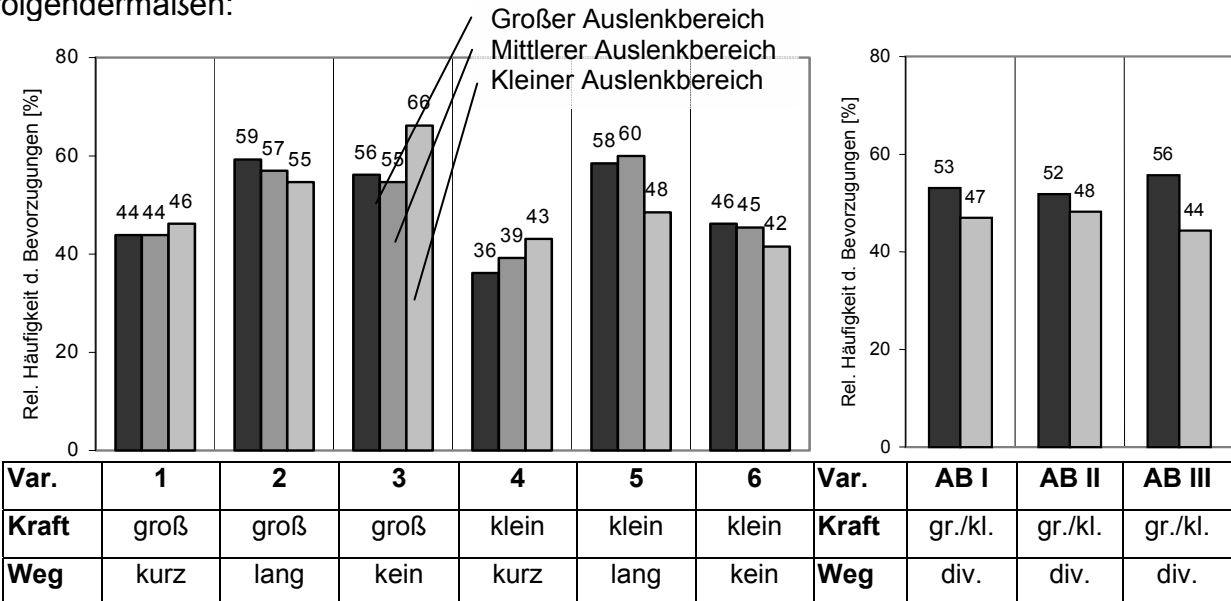
Wie die Tabelle zeigt, konnten auf dem 1%-Signifikanzniveau keine bedeutsamen Unterschiede zwischen einzelnen Betätigungsrichtungen nachgewiesen werden. Dies gilt sowohl für die Frage nach der Erkennbarkeit der Bedienung als auch in Hinsicht auf den Komfort der Bedienung.

7.6.3 Betätigungsweg bis mechanischer Widerstand

Die untenstehende Darstellung zeigt die Anzahl der Nennungen „besser bewertet“ für drei Auslenkbereiche für die Betätigung nach links. Die Frage lautete wieder „Bei welchen der beiden Varianten waren Sie sich **sicherer**, durch Auslenken des Joysticks eine Funktion ausgewählt zu haben?“:



Die Frage „Welche der beiden Varianten empfanden Sie als **komfortabler** / **angenehmer** / **sympathischer**?“ beantworteten die Vpn in Bezug auf die drei Auslenkbereiche folgendermaßen:



Die statistische Auswertung des Vergleichs der einzelnen Auslenkbereiche ist der folgenden Tabelle zu entnehmen:

	Erkennbarkeit der Bedienung							Komfort der Haptik					
Varianten	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
Kraft	groß	groß	groß	klein	klein	klein		groß	groß	groß	klein	klein	klein
Weg	kurz	lang	kein	kurz	lang	kein		kurz	lang	kein	kurz	lang	kein
Unterschied mittlerer zu großem Auslenkbereich, Betätigung nach links													
f_b	68	93	52	64	78	35		57	74	71	51	78	59
f_e	67	88	59	58	76	42		57	77	73	47	76	60
	$p = 0,705$							$p = 0,989$					
Unterschied kleiner zu großem Auslenkbereich, Betätigung nach links													
f_b	85	72	63	76	59	35		60	71	86	56	63	54
f_e	67	88	59	58	76	42		57	77	73	47	76	60
	$p = 0,002$							$p = 0,187$					
Unterschied kleiner zu mittlerem Auslenkbereich, Betätigung nach links													
f_b	85	72	63	76	59	35		60	71	86	56	63	54
f_e	68	93	52	64	78	35		57	74	71	51	78	59
	$p = 0,003$							$p = 0,203$					

Tabelle 7.4: Vergleich der Auslenkbereiche (allgemeiner eindimensionaler χ^2 -Test)

Man sieht, dass hinsichtlich der Erkennbarkeit der Bedienung sich die Nennungen für den kleinen Auslenkbereich signifikant von den Nennungen für den mittleren und den großen Auslenkbereich unterscheiden. Bei näherer Betrachtung der Nennungen für die einzelnen Varianten wird deutlich, dass bei kleinem Auslenkbereich die Haptik-Varianten mit kurzem Weg bis Druckpunkt deutlich besser bewertet wurden als bei den anderen zwei Auslenkbereichen. Dies deutet darauf hin, dass der Betätigungsweg nach dem Druckpunkt bis zum mechanischen Anschlag entscheidender ist für die Bewertung als der Betätigungsweg bis zum Druckpunkt.

Es gibt keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf den Komfort der Haptik-Varianten.

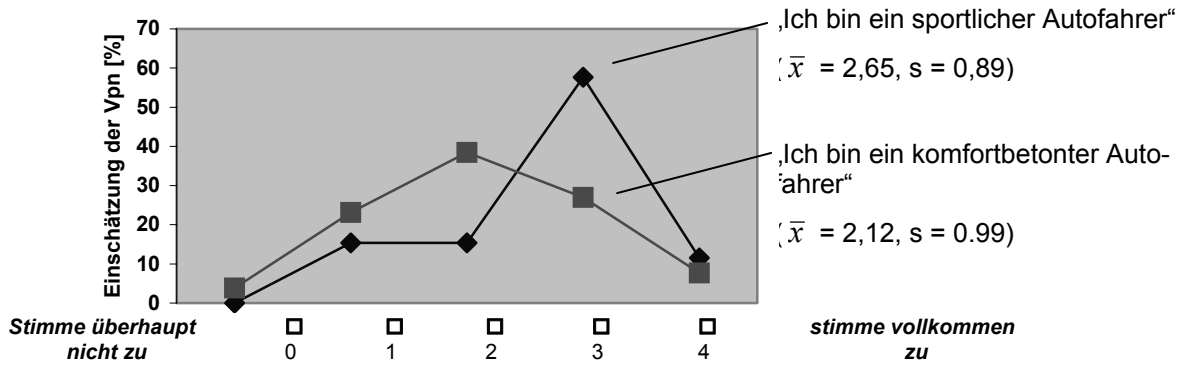
7.6.4 Fragebogenergebnisse

Demographischer Fragebogen

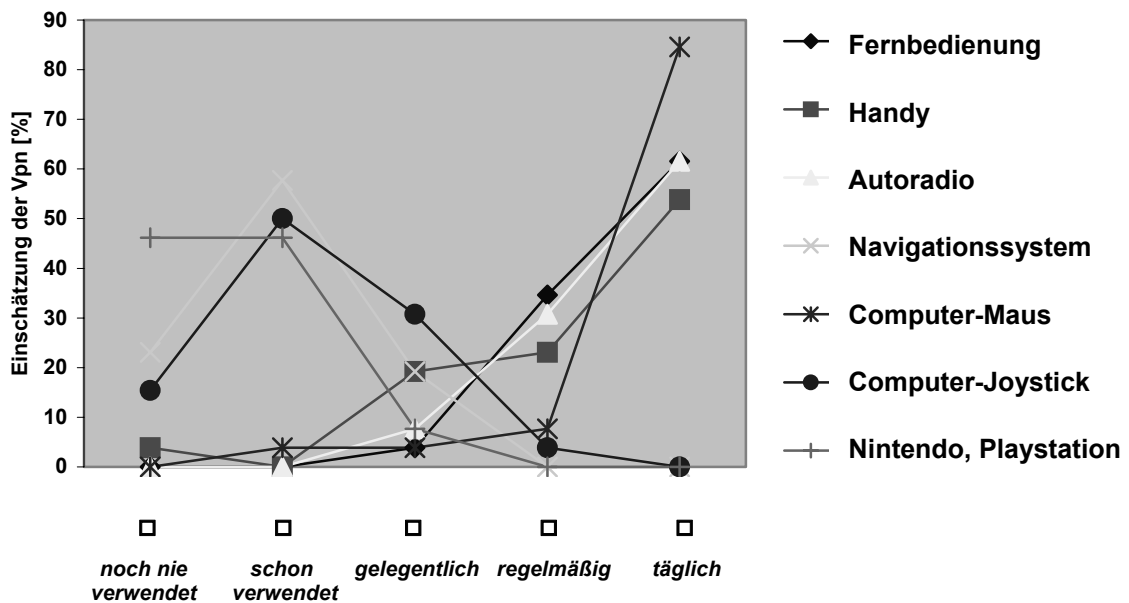
Neben Angaben zur Person selbst wurden im demographischen Fragebogen auch Fragen zur individuellen Nutzung von Kraftfahrzeugen gestellt. Die Ergebnisse sind im Folgenden exemplarisch für die gesamte Arbeit dargestellt:

- Bis auf eine Ausnahme besitzen alle Vpn momentan ein Auto.
- Auf die Frage, wie oft sie ihr Fahrzeug benutzen, antworteten 18 Vpn (69%) mit „Täglich“, 5 Vpn (19%) kreuzten „Mehrere Male/Woche“ und 3 (12%) „1mal/Woche oder weniger“ an.
- Die Frage, ob sie überwiegend Langstrecken fahren, beantworteten 16 Vpn mit nein (62%) und 10 mit ja (38%).

- Einschätzung des persönlichen Fahrstils:



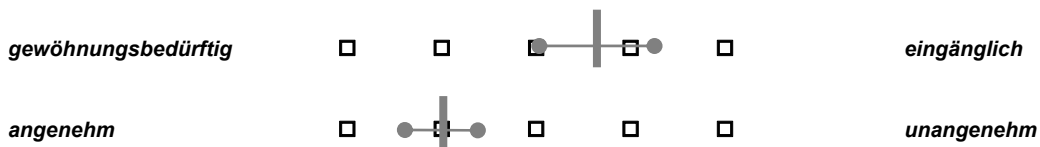
Des Weiteren wurde gefragt, wie häufig die Vpn folgende spezielle Bedienelemente benutzt:



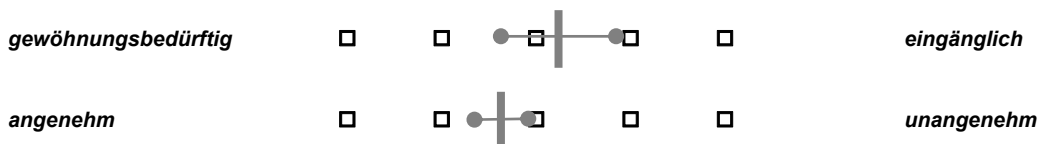
Fragebogen zur subjektiven Bewertung

Im Anschluss an die Untersuchung wurden die Vpn gebeten, folgende Einschätzungen vorzunehmen:

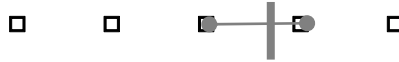
- „Wie empfanden Sie insgesamt die Bedienung des Joysticks während der Fahrt?“:



- „Wie empfanden Sie es, dass sich die haptischen Eigenschaften des Bedienelements änderten?“:



nicht sinnvoll



sinnvoll

- „Welche Größe sollte Ihrer Meinung nach der maximale Auslenkbereich des Joysticks haben?“:



- „Können Sie sich generell die Bedienung eines Fahrerinformationssystems mit einem einzigen Bedienelement vorstellen?“:

gar nicht



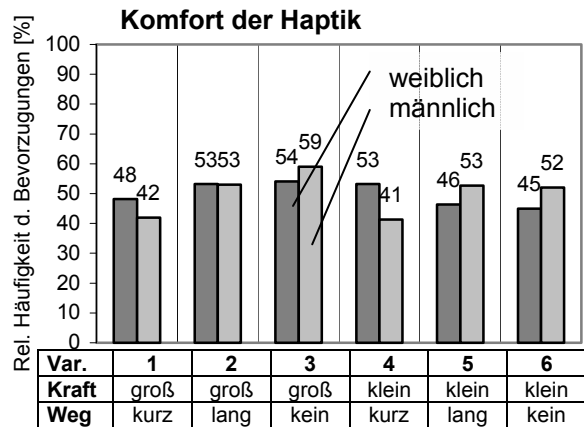
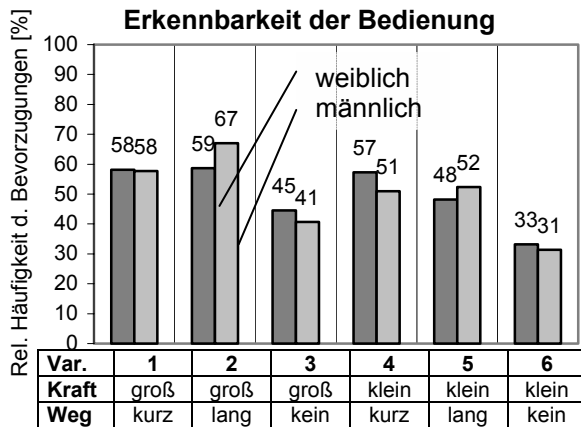
sehr gut

7.6.5 Weitere Ergebnisse

Im Folgenden wurden die Ergebnisse noch hinsichtlich demographischer Merkmale wie Geschlecht, Alter sowie hinsichtlich Angaben der Vpn zur Nutzung von Kraftfahrzeugen und zur Erfahrung im Umgang mit speziellen Bedienelementen ausgewertet.

Eine Auswertung hinsichtlich solcher Merkmale wurde ausschließlich im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführt. Generell ist die Überprüfung von Unterschieden bezüglich demografischer Merkmale für die vorliegende Arbeit von untergeordnetem Interesse. Es wurde daher bei den Probandenuntersuchungen stets auf eine möglichst ausgeglichene Stichprobe hinsichtlich demographischer Merkmale geachtet.

Geschlecht



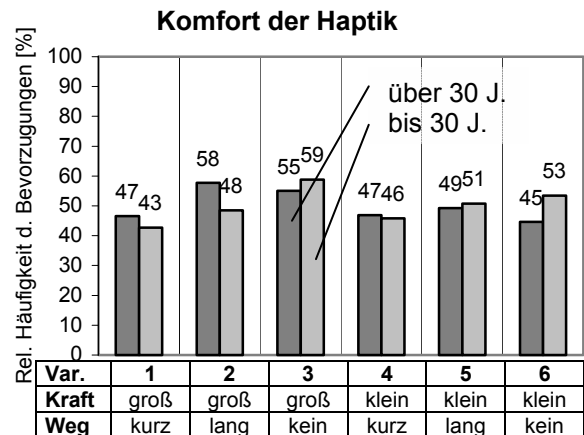
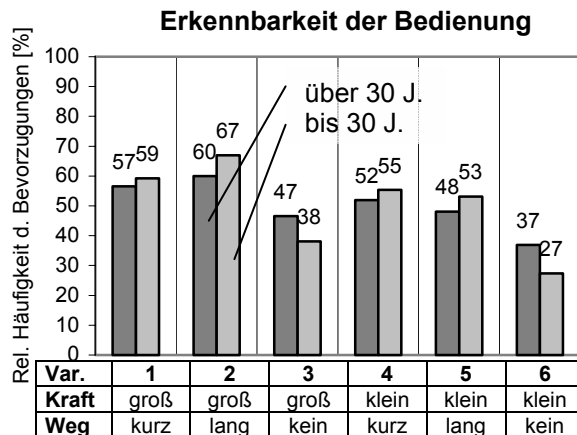
In Bezug auf die Erkennbarkeit der Bedienung ergibt sich bei der Durchführung eines allgemeinen eindimensionalen χ^2 -Tests ein $p = 0,328$, d. h. die Unterschiede sind nicht signifikant. Bezogen auf den Komfort der Haptik ergibt sich ein $p = 0,015$, dass nur unwesentlich über dem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$ liegt. Tendenziell bevorzugen Frauen die Haptik-Varianten mit kurzem Weg bis Druckpunkt etwas mehr, Männer bevorzugen hingegen die Varianten ohne Druckpunkt etwas stärker.

Die Unterteilung der Stichprobe hinsichtlich des Geschlechts korreliert mit einer möglichen Unterteilung in Bezug auf die Handlänge bzw. Handflächenlänge.

Alter

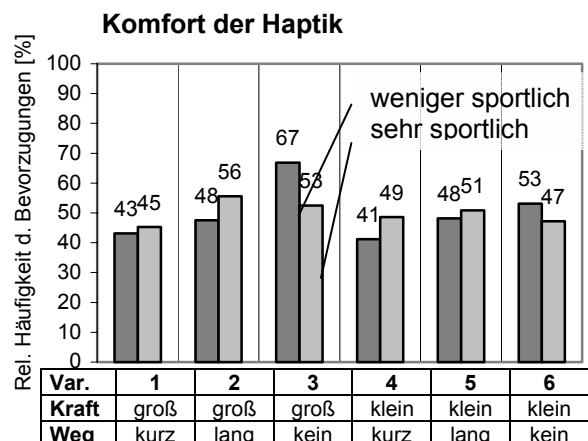
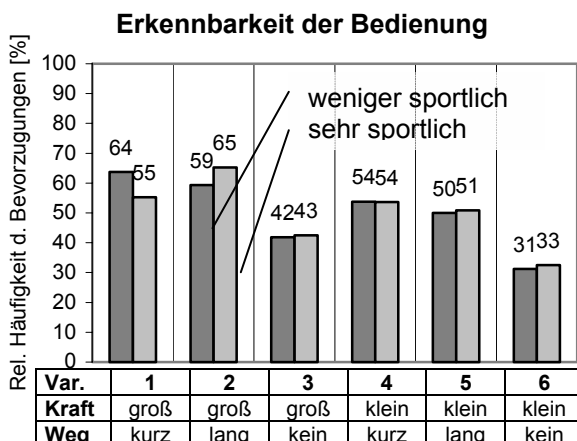
Bezüglich des Alters lässt sich die Stichprobe in zwei gleich große Gruppen aufteilen, in eine Gruppe mit einem Alter über 30 Jahre und in eine Gruppe mit einem Alter von bis einschließlich 30 Jahren.

Die Unterschiede bei der Bewertung der Erkennbarkeit der Bedienung sind mit einem $p = 0,003$ signifikant. Die Vpn mit einem Alter von bis zu 30 Jahren bewerteten die Haptik-Varianten mit Druckpunkt deutlich besser als die Vpn mit einem Alter von über 30 Jahren. Der Unterschied in Bezug auf den Komfort der Haptik ist mit $p = 0,072$ nicht signifikant.



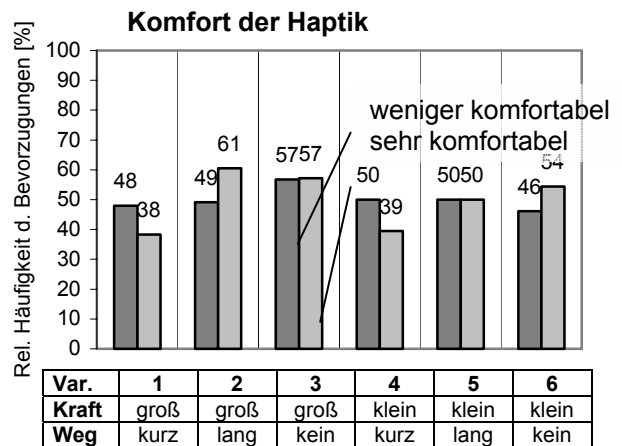
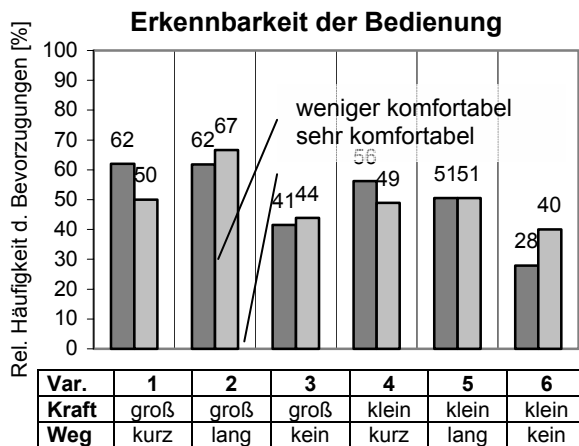
Angaben zur Nutzung von Kraftfahrzeugen

18 Probanden schätzten sich selbst als sportlichen Autofahrer ein, 8 Personen waren unentschieden bzw. stimmen dem nicht zu. Die Bewertungen der Haptik-Varianten durch die zwei Teilgruppen sind unten dargestellt. Die Unterschiede sind mit $p = 0,693$ (Erkennbarkeit der Bedienung) und $p = 0,042$ (Komfort der Haptik) nicht signifikant. Lediglich die Bevorzugung der Haptik-Variante „Große Betätigungskraft, kein Druckpunkt“ bei der Bewertung des Bedienkomforts durch weniger sportliche Autofahrer ist auffällig.



Der Aussage „Ich bin ein komfortbetonter Autofahrer“ stimmten 9 Vpn zu, 17 Probanden waren unentschieden bzw. stimmten dem nicht zu. Die Diagramme auf der nächsten Seite zeigen die deutlich unterschiedlichen Bewertungen. Hinsichtlich der Erkennbarkeit der Bedienung bewerten komfortbetonte Autofahrer die Haptik-Varianten mit

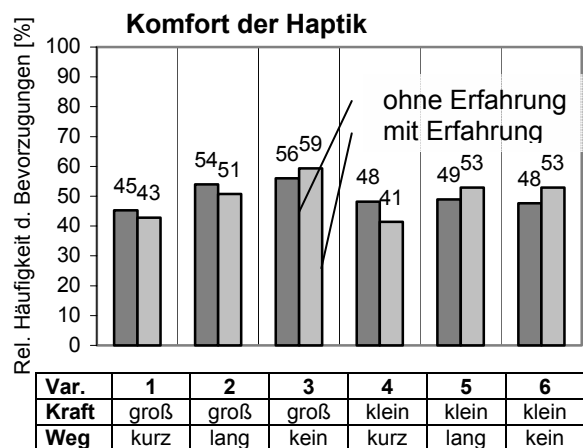
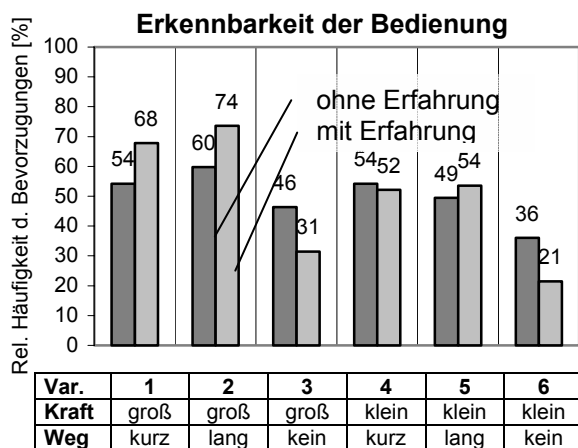
kurzem Weg bis Druckpunkt deutlich schlechter, Varianten ohne Druckpunkt dagegen besser als die anderen Versuchspersonen ($p = 0,006$). Ähnliche Unterschiede können bei der Bewertung des Bedienkomforts festgestellt werden ($p = 0,011$).



Angaben zur Erfahrung im Umgang mit speziellen Bedienelementen

Hinsichtlich des Umgangs mit den abgefragten Bedienelementen (vgl. Abschnitt 7.6.4.1) zeichnet sich ein sehr homogenes Bild ab, so dass diesbezüglich eine Unterteilung der Vpn in zwei Gruppen nicht sinnvoll erscheint.

7 Personen gaben an, dass sie schon einmal ein Bedienelement mit Krafrückkopplung benutzt haben. In Bezug auf die Bewertung der Haptik-Varianten ergeben sich signifikante Unterschiede. Personen mit Force-Feedback-Erfahrung bewerten in Bezug auf die Erkennbarkeit der Bedienung die Varianten mit Druckpunkt deutlich besser, die Varianten ohne Druckpunkt deutlich schlechter. Generell bevorzugen sie in stärkerem Maße die große Betätigungskraft ($p = 0,000$). Bei der Bewertung des Bedienkomforts zeichnen sich dagegen keine signifikanten Unterschiede ab ($p = 0,659$).



7.7 Diskussion

Bei der statistischen Auswertung der relativen Häufigkeiten der Bevorzugungen konnte zunächst nachgewiesen werden, dass die Unterschiede zwischen den Haptik-Varianten bei der Bewertung der Erkennbarkeit der Bedienung nicht zufällig sind. Hinsichtlich der Bewertung des Bedienkomforts konnte dies nicht festgestellt werden. In einem zweiten Schritt konnte nachgewiesen werden, dass die Haptik-Variante „Große Betätigungs-

kraft, langer Weg bis Druckpunkt“ auf dem 1%-Niveau hinsichtlich der Erkennbarkeit der Bedienung signifikant besser bewertet wurde.

In einem weiteren Schritt wurden einzelne Verteilungsformen miteinander verglichen. Bezüglich der in Abschnitt 7.3 formulierten Hypothesen lassen sich folgende Feststellungen machen:

- **Betätigungsrichtung**

In Bezug auf die Betätigungsrichtung konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Verteilungsformen nachgewiesen werden. Somit konnte keine der aufgestellten Hypothesen bestätigt werden. In der Tendenz werden zwar die Varianten mit großer Betätigungskraft bei der Auslenkung nach hinten sowohl bei der Frage nach der Erkennbarkeit der Betätigung als auch bei der Frage nach einer komfortablen Haptik minimal besser bewertet als bei Auslenkung nach vorne, die Unterschiede sind jedoch sehr gering. Des Weiteren wird die kleine Betätigungskraft bei der Frage nach einer komfortablen Haptik ausschließlich bei der Auslenkung nach links bevorzugt, die große Betätigungskraft wird bei der Auslenkung nach hinten und nach links stärker bevorzugt. Diese Auffälligkeiten konnten jedoch ebenfalls statistisch nicht belegt werden.

- **Betätigungskraft**

Die oben beschriebenen signifikanten Unterschiede der Haptik-Varianten „Große Betätigungskraft, langer Weg bis Druckpunkt“ und „Kleine Betätigungskraft, kein Druckpunkt“ gegenüber den restlichen Varianten bestätigen die Hypothese, wonach die große Betätigungskraft bei der Bewertung der Erkennbarkeit der Betätigung deutlich besser abschneidet.

Bei der Frage nach einer möglichst komfortablen Haptik konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die Variante „Große Kraft + kein Druckpunkt“ wird am besten bewertet, die Häufigkeiten der Urteile sind homogener verteilt als bei der Bewertung der Erkennbarkeit. Die große Betätigungskraft schneidet insgesamt etwas besser ab als die kleine Betätigungskraft. Die Hypothese, dass bei dieser Bewertung die kleine Betätigungskraft deutlich besser abschneidet, konnte also nicht bestätigt werden.

Die Auswertung der ersten vier Versuchsdurchgänge hinsichtlich Veränderungen in den Bewertungen in Abhängigkeit von der Versuchsdauer ergab keine eindeutige Tendenz in eine bestimmte Richtung. Die Hypothese, wonach die kleine Betätigungskraft im Laufe der Untersuchung zunehmend besser bewertet wird, konnte also nicht bestätigt werden.

- **Betätigungsweg bis Druckpunkt**

Die Hypothese, wonach Haptik-Varianten mit einem Druckpunkt bei der Bewertung der Erkennbarkeit der Betätigung besser bewertet werden als Varianten ohne Druckpunkt, konnte eindeutig bestätigt werden. Die oben beschriebenen signifikanten Unterschiede der Varianten „Große Betätigungskraft, langer Weg bis Druckpunkt“ und „Kleine Betätigungskraft, kein Druckpunkt“ sind ein klares Indiz dafür.

Es stellte sich ebenfalls heraus, dass die Haptik-Varianten ohne Druckpunkt bei der Bewertung des Komforts der Haptik besser abschneiden als bei der Bewertung der Erkennbarkeit. So wurde die Variante „Große Betätigungskraft + kein Druckpunkt“ hinsichtlich des Komforts insgesamt am besten bewertet. Wie bereits erwähnt, unterscheiden sich die Ergebnisse jedoch nicht signifikant, so dass diesbezüglich keine eindeutigen Aussagen gemacht werden können.

▪ **Betätigung bis mechanischer Widerstand**

Hinsichtlich der Erkennbarkeit der Bedienung unterscheiden sich die Ergebnisse für den kleinen Auslenkbereich von denen des großen und mittleren Auslenkbereichs signifikant. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass für den kleinen Auslenkbereich die Varianten mit kurzem Weg bis Druckpunkt am besten bewertet werden, wohingegen für die zwei anderen Auslenkbereiche die Varianten mit spätem Druckpunkt bevorzugt werden. Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass für die Erkennbarkeit der Bedienung der Weg zwischen Druckpunkt und mechanischem Anschlag die entscheidende Empfindungsgröße ist.

7.8 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der beschriebenen Probandenuntersuchung zeigen, dass große Betätigungskräfte und ein auf den Betätigungsweg bezogen später Druckpunkt die Erkennbarkeit einer erfolgten Betätigung durch Auslenken des Joysticks am besten unterstützen. Die Haptik-Variante „Große Betätigungskraft + langer Weg bis Druckpunkt“ stellt sich als die Variante mit den besten haptischen Eigenschaften heraus. Sie ist somit für die Bedienung eines Fahrerinformationssystems die am besten geeignete Haptik-Variante. Dass die Variante „Kleine Betätigungskraft, kein Druckpunkt“ hochsignifikant schlechter bewertet wurde, kann als Indiz dafür angesehen werden, dass für die Erkennung einer durchgeführten Interaktion auf einen spürbaren Druckpunkt nicht verzichtet werden sollte. Eine in Bezug auf die Betätigungsrichtung unterschiedliche Haptik ist nach den vorliegenden Ergebnissen nicht sinnvoll. Hinsichtlich der Bewertung des Bedienkomforts konnten keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden. Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass die Probanden in Bezug auf die sichere Erkennbarkeit einer erfolgten Bedienung klare Aussagen machen können, was gut und was schlecht ist, dass dies aber bei der Bewertung des Komforts überwiegend nicht möglich ist. Wahrscheinlich überlagern sich bei der Bewertung des Komforts der Haptik mehrere Faktoren.

8 Vergleich eines aktiven haptischen Joysticks und eines aktiven haptischen Schiebepfeilers in einem Simulatorexperiment

8.1 Einleitung

Im vorangegangenen Experiment wurden die haptischen Eigenschaften des aktiven haptischen Joysticks untersucht. Dabei wurden unterschiedliche Betätigungskräfte und -wege des Joysticks bei der Auslenkung in vier Richtungen im Hinblick auf die Erkennbarkeit einer erfolgten Bedienung verglichen. Um der generellen Zielsetzung der Arbeit - der Optimierung der haptischen Schnittstelle eines Fahrerinformationssystems - näher zu kommen, gilt es, weitere Interaktionsarten neben der Itemauswahl zu betrachten. Dabei wird der Einsatz des im Joystick integrierten Drucktasters z. B. zur Bestätigung einer Listenauswahl oder zur Alphanumerischen Eingabe nötig. In diesem Zusammenhang wird eine Problematik des Joysticks als Eingabemedium eines Fahrerinformationssystems deutlich. In Abbildung 8.1 ist die Betätigung eines in einem Joystick integrierten Drucktasters dargestellt. Bei Drücken des Drucktasters bei stark ausgelenktem Joystick entsteht ein Moment, welches die Auslenkung des Joysticks weiter vergrößert. Dadurch kann es vorkommen, dass z. B. bei einer positionscodierten Alphanumerischen Eingabe, wie sie im Weiteren noch beschrieben wird, es zu einer Verschiebung der Cursorposition und somit zur Auswahl eines falschen Buchstabens kommt.

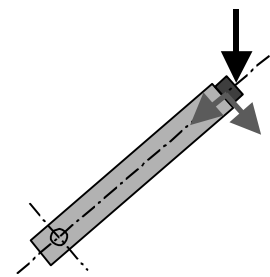


Abbildung 8.1: In Joystick integrierter Drucktaster

Aufgrund dieser Problematik entschied man sich für die Entwicklung eines aktiven haptischen Schiebepfeilers, wie er in Abschnitt 8.4.2 ausführlich beschrieben ist. Da bei diesem Bedienelement der Bedienaufsatz mit Drucktaster immer senkrecht auf der Verfaberebene steht, entsteht kein Moment, welches die Position verschieben könnte. Ob diese Entwicklung zu einer Optimierung der in dieser Arbeit entwickelten haptischen Mensch-Maschine-Schnittstelle führt, ist u. a. eine Fragestellung dieser Untersuchung. Im Folgenden sollen also im Wesentlichen die zwei Bedienelemente Joystick und Schiebepfeiler miteinander verglichen werden.

8.2 Zielsetzung und Fragestellung

Die Zielsetzung der hier beschriebenen Probandenuntersuchung ist der Vergleich des aus der ersten Untersuchung bekannten aktiven haptischen Joysticks, welcher sich durch eine rotatorische Bedienung um einen Drehpunkt auszeichnet, mit einem aktiven haptischen Schiebepfeiler. Dieses Bedienelement weist eine translatorische Bedienung in einer Ebene auf. Der Vergleich soll anhand der Interaktionsaufgaben Menüauswahl, Listenauswahl und Alphanumerische Eingabe erfolgen, welche noch ausführlich in Abschnitt 8.4.3 beschrieben werden. Die wesentliche Fragestellung lautet also, welches Bedienelement für die Bedienung eines Fahrerinformationssystems besser geeignet ist.

Leistungsindikatoren für Bedienung von Fahrerinformationssystemen sind im Wesentlichen die Messgrößen Bedienfehler und Bediendauer. Es soll also untersucht werden, welches Stellteil in Abhängigkeit der einzelnen Bedienungsaufgaben Vor- bzw. Nachteile in Bezug auf diese Messgrößen aufweist. Des Weiteren wird das subjektive Empfinden

der Probanden abgefragt. Generell wird Betätigungshaptik sehr subjektiv bewertet. Es existieren beim Bediener keine objektiven Bewertungskriterien für Betätigungshaptik. Für die Bewertung von Lösungsvarianten ist also sicherlich auch die subjektive Bewertung der Probanden heranzuziehen.

Des Weiteren werden die haptischen Eigenschaften der Bedienelemente in Abhängigkeit der Interaktionsaufgaben systematisch variiert. Das Ziel hierbei ist, in Anknüpfung an die vorangegangene Untersuchung weiter der Frage nachzugehen, welche Betätigungskraft bzw. haptische Gestaltung einer optimierten haptischen Schnittstelle am nächsten kommt.

8.3 Hypothesen

Entsprechend den oben formulierten Fragestellungen wird zunächst allgemein angenommen, dass

- die zwei Bedienarten sich im Hinblick auf die abhängigen Variablen Bediendauer und –fehler sowie auf deren subjektive Bewertungen durch die Probanden in Abhängigkeit von den drei Bedienaufgaben unterscheiden.
- eine bestimmte Krafteinstellung bzw. haptische Gestaltung in Abhängigkeit der jeweiligen Bedienart und der jeweiligen Bedienaufgabe besser geeignet ist. Die Bewertungskriterien sind hier ebenfalls Bediendauer und –fehler sowie die subjektive Bewertung durch die Versuchspersonen.

Insgesamt wird erwartet, dass die subjektiven Bewertungen zumindest in der Tendenz die gleichen Ergebnisse liefern wie die objektiven Messdaten.

Es wird vermutet, dass sich folgende Einzelergebnisse einstellen:

- Aufgrund des größeren Bekanntheitsgrades des Joysticks und dessen Verwendung zur Anwahl von Menüfeldern (z.B. aus dem Spiele-/Entertainmentbereich) wird erwartet, dass dieser bei der Bedienaufgabe Menüauswahl besser abschneidet als der Schiebester. Eine translatorische Bewegung zur Auswahl eines Menüpunkts scheint weniger intuitiv und für den Benutzer ungewohnt zu sein.
- Dem hingegen wird angenommen, dass sich bei den Bedienaufgaben Listenauswahl und Alphanumerische Eingabe für die translatorische Bedienung Vorteile nachweisen lassen. Zum einen ist hier das Mapping, d. h. die Zuordnung des Bewegungsbereichs des Bedienelements zum Bildschirm, besser (s. Abbildung 8.2). Zum anderen besteht bei der rotatorischen Bedienung das bereits in der Einleitung beschriebene Problem, dass bei Betätigen des Drucktasters in einem weit ausgelenkten Zustand es zu Verschiebungen der Joystick-Position kommen kann.

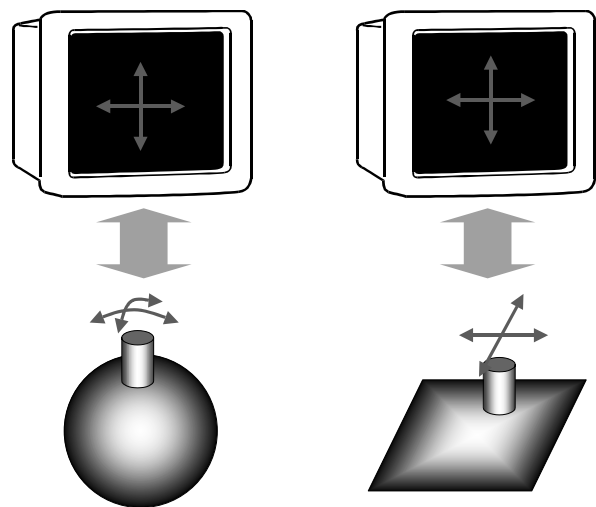


Abbildung 8.2: Mapping bei Joystick und Schiebester

- Bezüglich der Kräfteinstellungen bzw. der haptischen Gestaltungen wird erwartet, dass bei der großen Betätigungskraft weniger Bedienfehler auftreten, die Bedienzeiten aber insgesamt größer sind. Für die kleine Betätigungskraft wird ein entsprechend invertiertes Verhalten vermutet. Es bleibt abzuwarten, ob sich dieser Geschwindigkeits-Genauigkeits-Widerspruch für beide Bedienarten und über alle Bedienaufgaben nachweisen lässt.
- Bei der Interaktionsaufgabe Alphanumerische Eingabe soll des Weiteren untersucht werden, ob in der Eingabereihenfolge direkt benachbarte Buchstaben ein Problem speziell bei einer großen Betätigungskraft darstellen. Es wird vermutet, dass eine große Rasterkraft bewirkt, dass sich der Cursor unerwünscht gleich um mehrere Buchstaben verschiebt und es somit zu längeren Bedienzeiten und mehr Bedienfehlern kommt.
- In der vorangegangenen Untersuchung konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Betätigungsrichtungen festgestellt werden. Deshalb werden einzelne Betätigungsrichtungen in diesem Experiment nicht explizit untersucht. Es wird aber erwartet, dass sich die Diagonalen deutlich schlechter bedienen lassen als die Hauptrichtungen.
- Bei der Bedienaufgabe Menüauswahl wird für die Bedienung mit dem Joystick angenommen, dass sich bei haptischen Gestaltungen mit Druckpunkt weniger Bedienfehler ereignen. Diese Annahme stützt sich ebenfalls auf die Ergebnisse der ersten Untersuchung, bei der Varianten mit einem Druckpunkt hinsichtlich der Erkennbarkeit einer erfolgten Betätigung signifikant besser bewertet wurden. Ob sich dies bei der translatorischen Bedienung ähnlich verhält, bleibt abzuwarten.

8.4 Methode

8.4.1 Stichprobe

Zur Durchführung der Untersuchung im MMI-Fahrsimulator standen insgesamt drei Wochen zur Verfügung. Insgesamt nahmen an der Untersuchung 29 Personen teil, wobei 15 Probanden DaimlerChrysler-Mitarbeiter waren, 14 Vpn konnten extern akquiriert werden. Die Stichprobe setzte sich wie folgt zusammen:

Vpn	Männlich	Weiblich	Jüngste Vp	Älteste Vp	Mittleres Alter
29	18	11	25	44	30

Es wurde versucht, eine relativ homogene Stichprobe hinsichtlich der Erfahrung im Umgang mit Computern zu verwenden, um möglichst eindeutige Aussagen zu den oben formulierten Hypothesen zu bekommen. In einem demographischen Fragebogen gaben die Vpn an, wie oft sie einen Computer geschäftlich oder privat nutzen. Es stellte sich heraus, dass dies bei 25 der 29 Personen täglich bzw. sogar mehrere Stunden täglich der Fall ist. Des Weiteren befand sich niemand darunter, der nicht zumindest mehrmals wöchentlich am Computer sitzt. Man kann also davon ausgehen, dass alle Probanden im Umgang mit elektronischen Medien erfahren sind. Dies ist im Sinne einer möglichst homogenen Stichprobe durchaus erwünscht. Personen, die im Umgang mit dem Computer unerfahren sind, wären eventuell mit den Bedienaufgaben überfordert gewesen und hätten so eine weitere, unerwünschte Varianzquelle eingeführt.

8.4.2 Hardware

8.4.2.1 Aktiver haptischer Joystick

Der verwendete aktive haptische Joystick wurde bereits in den vorangegangenen Untersuchungen verwendet und ist in Abschnitt 5.1 ausführlich beschrieben, so dass darauf an dieser Stelle nicht mehr eingegangen wird.

Lediglich der Stickaufsatz wurde neu angefertigt. Wesentlicher Grund hierfür war, dass Joystick und Schiebestereller einen exakt identischen Bedienaufsatz haben sollten, um eventuelle Einflüsse dieses Faktors auszuschließen. Der achteckige Aufsatz, welcher die acht Bedienrichtungen bei der Menüauswahl codiert (vgl. Abschnitt 2.2.2), beinhaltet einen gewöhnlichen Drucktaster mit 1,5 N Druckkraft und 2 mm Betätigungsweg.

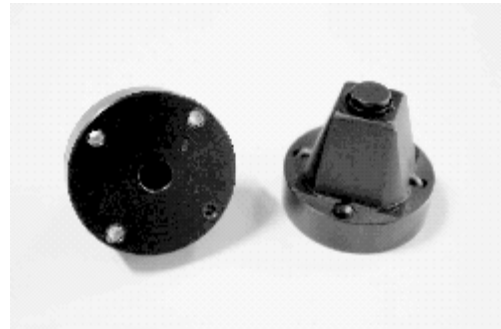


Abbildung 8.3: Bedienaufsätze

8.4.2.2 Aktiver haptischer Schiebestereller

Der in dieser Untersuchung verwendete aktive haptische Schiebestereller wird dadurch erzeugt, indem man den unten abgebildeten Aufsatz auf den aktiven haptischen Joystick aufsetzt. Dem Joystick wird zuvor der Bedienaufsatz abgenommen und eine Kugel aufgesetzt, welche als Kugelgelenk fungierend die programmierten Kräfte auf den Schlitten (s. rechte Abbildung) überträgt bzw. die Betätigungsbewegungen direkt an das Bedienelement weiterleitet.

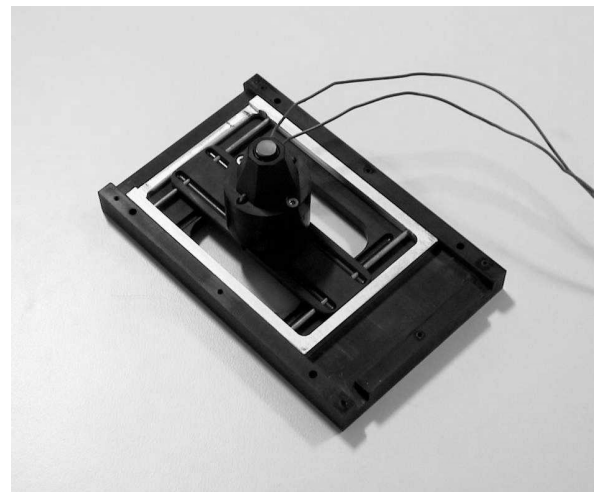
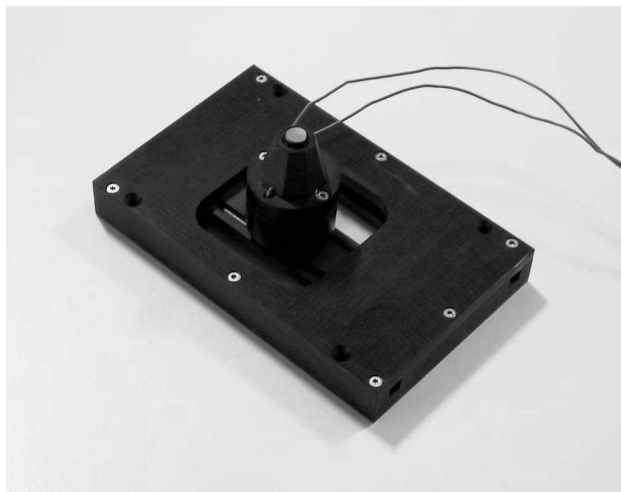


Abbildung 8.4 und 8.5: Aktiver haptischer Schiebestereller

Der Schlitten des Schiebestereller-Aufsatzes ist besonders reibungsarm gelagert, so dass die mechanische Reibung die programmierte Haptik möglichst wenig beeinflusst. Der Bewegungsbereich des Schlittens ist ausreichend bemessen, so dass dieser durch den Auslenkbereich des Joysticks definiert ist und somit eine Vergleichbarkeit mit dem Joystick gewährleistet ist.

8.4.3 Software

Die in dieser Untersuchung verwendeten Anwendungen wurden nicht mehr wie in der ersten Untersuchung mit dem Software-Tool VAPS™ programmiert, sondern in einer offenen C++-Programmier-Umgebung entwickelt. Wie bereits in Abschnitt 5.2 erwähnt, erwies sich VAPS™ als zu inflexibel bei der Verwendung unterschiedlicher Anwendungen. Des Weiteren kommt es bei der Verwendung von VAPS™ zu minimalen Zeitverzögerungen, welche aber der Verwendung einer aktiven Haptik mit Refresh-Frequenzen von 300 Hz und mehr zu drastischen Qualitätseinbußen führen.

Die verwendeten Force-Feedback-Effekte werden bei einer Programmierung in C++ durch sog. Immersion Foundation Classes erzeugt (s. <http://www.immersion.com>) und in einer speziell dafür vorgesehenen C++-Quelldatei definiert. Es stehen vielfältige Effekte zur Verfügung. Eine Beschreibung der einzelnen Haptiken erfolgt speziell in Bezug auf die drei Bedienungsaufgaben in den folgenden Unterkapiteln.

8.4.3.1 Bedienungsaufgabe Menüauswahl

Die Funktionsweise der Bedienungsaufgabe Menüauswahl erläutert die folgende Abbildung:

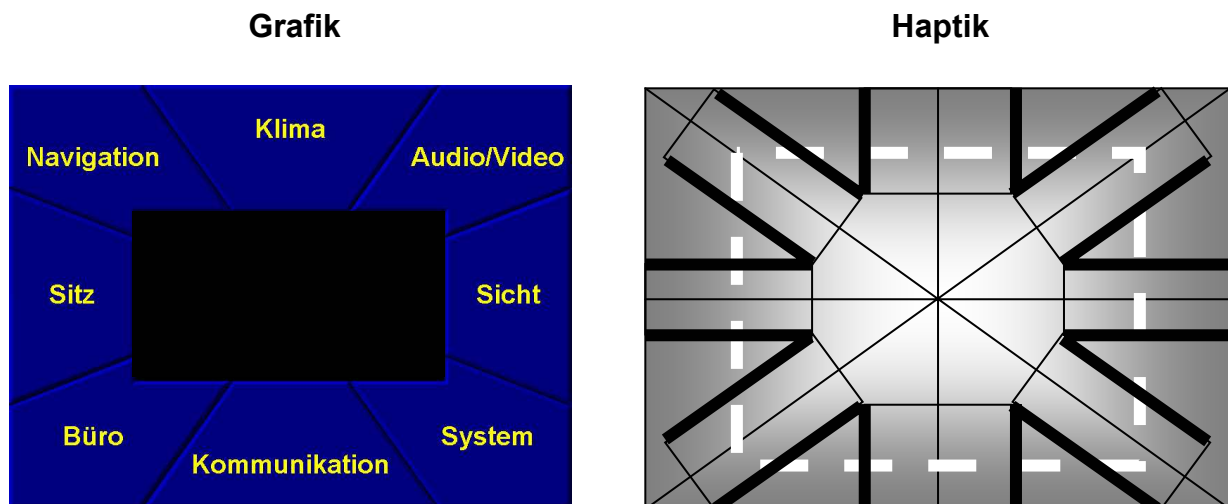


Abbildung 8.6: Menüauswahl

Auf der Bildschirmoberfläche sind acht konzentrische Menüfelder zu sehen, welche in zufälliger Reihenfolge auszuwählen waren. Dies erfolgte durch Auslenken des Joysticks bzw. Verschieben des Schiebepfeils zu dem entsprechenden Feld hin. Eine auf den gesamten Auslenkbereich wirkende Federkraft bewirkt die Zentrierung nach erfolgter Auslenkung. Die Vpn erhielten dabei eine visuelle Rückmeldung, welches Menüfeld sie nun tatsächlich ausgewählt hatten. Die Auslenkung in die acht Richtungen wird dabei haptisch unterstützt durch entsprechende Kanäle, wie sie in der rechten Abbildung zu sehen sind. Bei Überschreiten der dicken schwarzen Linien ist eine starke Gegenkraft zu spüren. Das gestrichelte weiße Rechteck stellt die Position des Druckpunkts dar, der zum Teil Verwendung fand.

8.4.3.2 Bedienungsaufgabe Listenauswahl

Bei der Bedienungsaufgabe Listenauswahl mussten aus einer mehrseitigen Liste hintereinander drei Städte ausgewählt werden. Die Reihenfolge der Städte war dabei vollständig permutiert. Die verwendete Grafik und Haptik gibt die folgende Abbildung wieder:

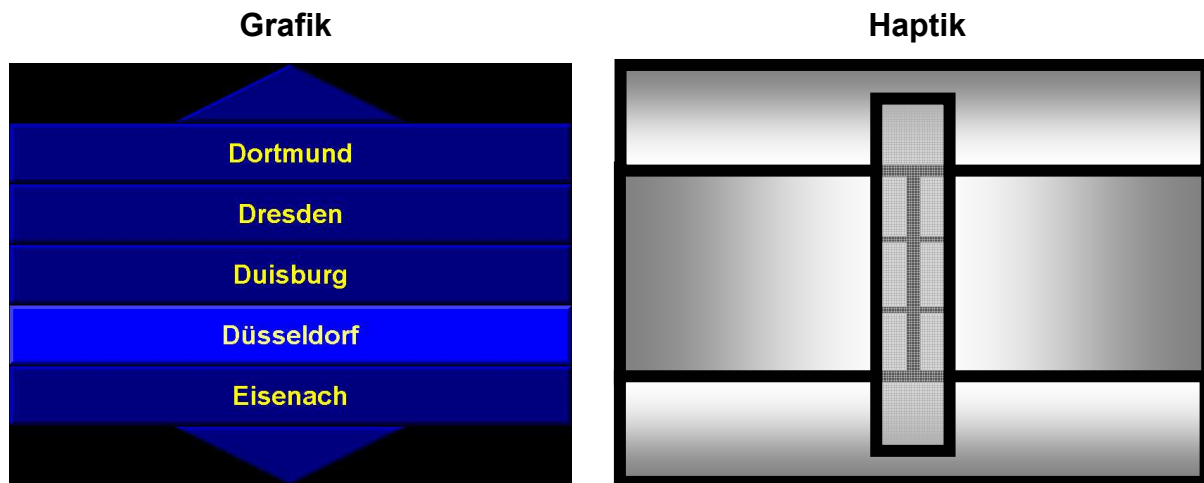


Abbildung 8.7: Listenauswahl

Auf einer Bildschirmseite sind fünf Einträge der Liste dargestellt, denen positionscodiert fünf Rasterpunkte zugeordnet sind. Die Position des Bedienelements entspricht also eindeutig der Position des Cursors. Um eine Seite der Liste weiterzublättern, musste der Cursor auf den darüber bzw. darunter angeordneten Pfeil gebracht werden. Konstante, gerichtete Kräfte von oben und unten stellen das Bedienelement wieder zurück auf einen der Listeneinträge. Ebenso bewirken Kräfte von links und rechts, dass der Joystick bzw. der Schieberegler sich nur in einer Richtung nach vorne und zurück bewegen lässt. Die Auswahl eines Listeneintrags erfolgt abschließend durch Drücken des integrierten Drucktasters.

8.4.3.3 Bedienungsaufgabe Alphanumerische Eingabe

Der Bedienungsaufgabe Alphanumerische Eingabe liegt folgende Grafik und Haptik zugrunde:

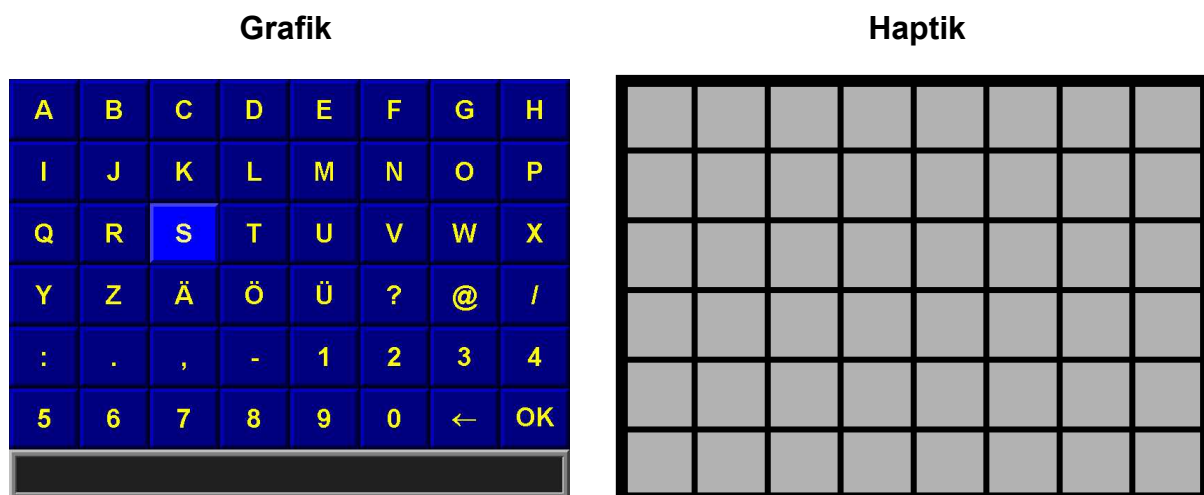


Abbildung 8.8: Alphanumerische Eingabe

Auf der Bildschirmoberfläche sind in sechs Zeilen und acht Spalten das Alphabet und weitere benötigte Zeichen dargestellt. Dem ist - wieder im Sinne einer eindeutigen Positionscodierung - ein haptisches Raster mit sechs Zeilen und acht Spalten zugeordnet. Das Feld eines Buchstabens entspricht also eindeutig einem Feld in dem haptischen Raster. Bei Überschreiten einer Rasterlinie spürt man eine Gegenkraft, sodass der

Eindruck erweckt wird, der Cursor raste in einem Buchstaben ein. Das haptische Raster hat das Ziel, die Auswahl eines Buchstabens zu erleichtern. Die Auswahl eines Buchstabens erfolgt schließlich wieder durch Drücken des Drucktasters. Das ausgewählte Zeichen erscheint in der Anzeigenleiste am unteren Rand der Bildschirmoberfläche. Eine Eingabe kann durch Auswahl des Zurück-Pfeiles korrigiert werden. Pro Variante (vgl. Abschnitt 8.4.6) waren zwei, jeweils 16 Buchstaben lange Straßennamen einzugeben.

8.4.4 Fahrsimulator

Die Untersuchung fand wieder im MMI-Fahrsimulator der DaimlerChrysler-Fahrzeufforschung in Untertürkheim statt. Auf diese Versuchsumgebung wurde bereits ausreichend eingegangen. Bei der Fahrstrecke handelte es sich wieder um eine Landstraße mit lang gezogenen Kurven. Die Vpn hatten während des Versuchs wiederum die Aufgabe, einem Führungsfahrzeug, welches mit einer konstanten Geschwindigkeit von 60 km/h fuhr, in angenehmen Abstand zu folgen.

8.4.5 Datenaufzeichnung

Die in der Untersuchung verwendeten Anwendungen waren so programmiert, dass die Auslenkungen und Tastendrücke der Vpn automatisch mitprotokolliert und daraus sofort die entsprechende Bediendauer und Bedienfehler berechnet wurden. Zusätzlich wurden subjektive Bewertungen der einzelnen Haptik-Varianten mitprotokolliert. Fahrleistungsdaten wurden nicht aufgezeichnet.

8.4.6 Versuchsdesign

Zunächst wird kurz auf einen methodischen Hintergrund dieses Experiments eingegangen. Das parallele Bearbeiten von Bedienaufgaben neben der Hauptaufgabe Fahren im Simulator basiert auf der **Methode der Nebenaufgabe** [vgl. FÄRBER, 1987]. Die Methode geht dabei von folgendem Ansatz aus: Ist eine Person in der Lage, eine Hauptaufgabe fehlerfrei auszuführen, so verfügt sie in der Regel über Restkapazitäten, die durch die Hauptaufgabe nicht voll ausgeschöpft werden. Muss sie zusätzlich zur Hauptaufgabe noch eine Nebenaufgabe ausführen, so kann man aus der Leistungsgüte der Nebenaufgabe die Restkapazität ableiten [FÄRBER, 2002]. Die Methode der Nebenaufgabe kommt bei der Untersuchung sensorischer, motorischer und mentaler Kapazitäten zur Anwendung. Die Methode bietet sich also als Verfahren an, um Entwicklungen im Rahmen dieser Arbeit zu bewerten. Dabei sind eine Reihe von Forderungen an Nebenaufgaben zu beachten [vgl. FÄRBER, 1987].

Im Weiteren wird auf die unabhängigen Variablen der Untersuchung eingegangen. Abbildung 8.9 gibt einen Überblick über das Versuchsdesign.

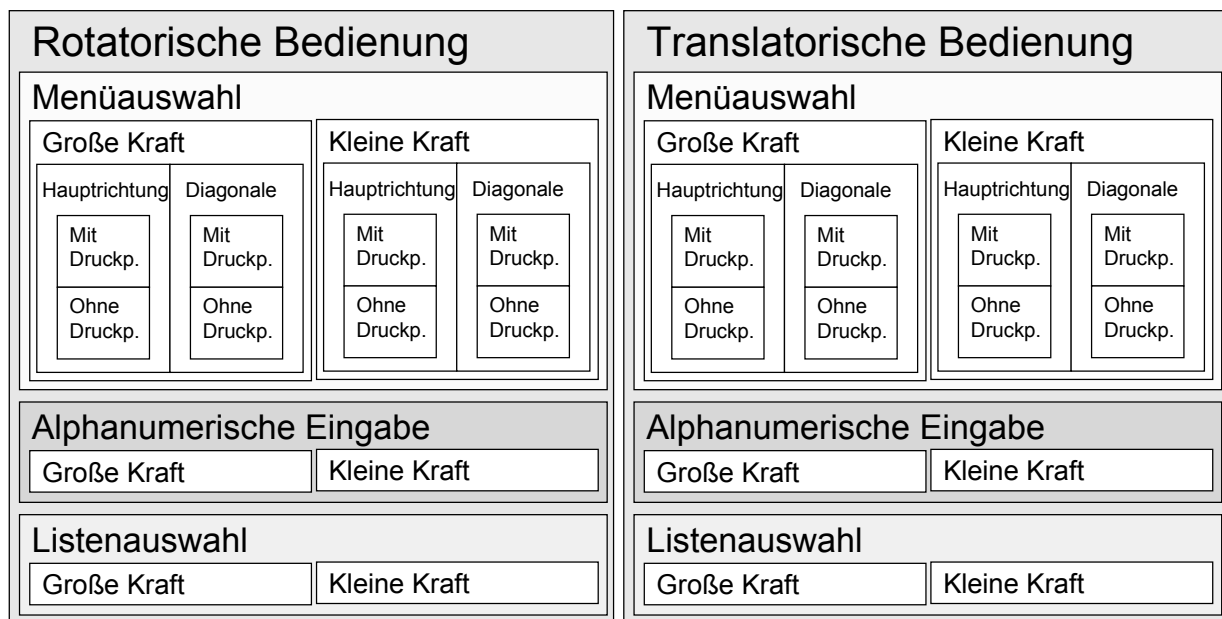


Abbildung 8.9: Versuchsdesign

Der obigen Abbildung können die unabhängigen Variablen der Untersuchung entnommen werden. Der symmetrische Aufbau ergibt sich aus der primären unabhängigen Variablen der Untersuchung, der Bedienart.

Variable A: Bedienart

Die zwei alternativen Bedienarten

- **rotatorische Bedienung** (*aktiver haptischer Joystick*) und
- **translatorische Bedienung** (*aktiver haptischer Schiebesterler*).

sollen daraufhin verglichen werden, wie gut sich mit ihnen die Bedienungsaufgaben

- **Menüauswahl**,
- **Listenauswahl** und
- **Alphanumerische Eingabe**

durchführen lassen (vgl. hierzu Abschnitt 8.4.3).

Bei den drei Bedienungsaufgaben handelt es sich nicht um eine unabhängige Variable „Interaktionsaufgabe“ im eigentlichen Sinne, da sie aufgrund ihrer Unterschiedlichkeit keine vergleichbaren Faktorstufen darstellen. Es handelt sich hierbei vielmehr um drei voneinander unabhängige Bestandteile der Untersuchung.

Variable B: Betätigungskraft bzw. haptische Gestaltung

Für die unabhängige Variable Betätigungskraft gibt es in der Untersuchung bei den Interaktionsaufgaben Listenauswahl und der Alphanumerischen Eingabe zwei Faktorstufen:

- **Große Betätigungskraft**
- **Kleine Betätigungskraft**

Variiert wurde hierbei die Größe der Rasterkraft. Sie betrug genauso für den Joystick wie für den Schiebesterler bei der Interaktionsaufgabe Listenauswahl für die große Betätigungskraft 0,3 N und für die kleine Betätigungskraft 0,2 N und bei der Alphanumerischen Eingabe für die große Betätigungskraft 0,4 N und für die kleine Betätigungskraft

0,3 N. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die empfundene Kraft zusätzlich von der Größe des mit der Kraft beaufschlagten Feldes beeinflusst wird.

Bei der Interaktionsaufgabe Menüauswahl wurde die Variable Betätigungskraft noch mit der Option Druckpunkt kombiniert. Es ergeben sich vier Faktorstufen

- **Große Betätigungskraft, mit Druckpunkt**
- **Große Betätigungskraft, ohne Druckpunkt**
- **Kleine Betätigungskraft, mit Druckpunkt**
- **Kleine Betätigungskraft, ohne Druckpunkt**

Die in der ersten Untersuchung spezifizierten Kräfteinstellungen können bei Programmierung der Untersuchungsanwendungen mit C++ nicht realisiert werden, da dies ein Vibrieren zur Folge haben würde. Die Kräfteinstellungen für die Interaktionsaufgabe Menüauswahl ergeben sich zum einen aus einer maximal darstellbaren Kraft, über der das Bedienelement zum Vibrieren anfängt und einer Kraft, die mindestens notwendig ist, damit das Bedienelement sich im Anschluss an die Auslenkung wieder automatisch zentriert.

Die Betätigungskraft bezieht sich hier auf die zentrierende Federkraft. Beim Joystick erreicht sie bei der großen Betätigungskraft ein Maximum von 0,5 N und bei der kleinen Betätigungskraft 0,4 N. Beim Schiebester waren entsprechend 0,7 N bzw. 0,6 N eingestellt. Die höheren Kräfte beim Schiebester werden für die Rückstellung der etwas größeren Masse im Vergleich zum Joystick benötigt.

Für den Betätigungsweg bis zum Druckpunkt wurde der in der vorherigen Untersuchung favorisierte lange Betätigungsweg von 60%/80% des maximalen Betätigungsweges übernommen. Der maximale Betätigungsweg, gemessen vom Mittelpunkt bis zum äußeren Rand, betrug dabei nur 13 mm, damit für den Schiebester mit translato- rischer Bedienung die Betätigungsbewegungen noch akzeptabel bleiben. Der maximale Betätigungsweg ist für Joystick und Schiebester gleich.

Für die Interaktionsaufgabe Alphanumerische Eingabe gab es noch die zusätzliche Variable „**Anzahl direkt benachbarter Buchstaben**“. Die insgesamt acht einzugebenden Straßennamen wurden in zwei Gruppen unterteilt, welche sich deutlich in der Anzahl direkt benachbarter Buchstaben unterscheiden. Sie wurden so dargeboten, dass in zufälliger Reihenfolge pro Haptik-Variante jeweils ein Straßename mit wenig und einer mit viel direkt benachbarten Buchstaben eingegeben werden musste.

Straßenname (Länge = 17 Buchstaben)	Anzahl Abstände = 1
Schimmelreiterweg	2
Kappelbergstraße	2
Ackermannstraße	2
Bruno-Frank-Gasse	2
Emmentalerstraße	6
Ringelnatzstaffel	6
Wolfmahdenstaffel	7
Nonnenwaldstraße	7

Allen Vpn wurden alle Varianten dargeboten, sodass es sich hierbei um ein vollständiges within-Design handelt.

8.5 Versuchsablauf

Die Untersuchung wurde standardisiert durchgeführt. In Vorversuchen wurde der geschätzte zeitliche Umfang der Untersuchung überprüft. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über den gesamten Versuchsablauf:

Nr.	Inhalt	Dauer
1	Begrüßung, Instruktionen (s. o.)	10 min
2	Kurze Eingewöhnungsfahrt	5 min
3	Teil 1 (= Bedienelement A) , Vp fährt: 3.1 Interaktionsaufgabe 1 3.2 Interaktionsaufgabe 2 3.3 Interaktionsaufgabe 3	30 min
4	Pause, Demographischer Fragebogen, Montage v. Bedienelement B	10 min
5	Teil 2 (= Bedienelement B) , Vp fährt: 5.1 Interaktionsaufgabe 1 5.2 Interaktionsaufgabe 2 5.3 Interaktionsaufgabe 3	30 min
6	Fragebogen zur subjektiven Gesamtbewertung	5 min
	Gesamtdauer	$\Sigma = 90$ min

Tabelle 8.1: Versuchsablauf

Die Reihenfolge der Bedienelemente, welcher die zwei Teile der Untersuchung entsprechen, wurde von Person zu Person abgewechselt. Innerhalb eines Versuchsteils wurde die Reihenfolge der drei Interaktionsaufgaben ebenfalls vollständig permutiert dargeboten.

Je nach Interaktionsaufgabe hatte, in Abhängigkeit von der Anzahl der Faktorstufen, der entsprechende Versuchsabschnitt zwei bzw. vier Durchgänge. Die Reihenfolge der Haptik-Varianten war vollständig permutiert. Die genaue Bedienaufgabe, d. h. welches Menüfeld oder Stadt auszuwählen war bzw. welche Straße eingegeben werden sollte, wurde dem Probanden über eine Audiodatei mitgeteilt.

Im Anschluss an jeden Durchgang hatten die Vpn die soeben erlebte Haptik-Variante nach folgenden Aspekten mündlich zu bewerten. Sie führen dabei weiter.

- „Wie empfanden Sie die Haptik des Joysticks/Schiebestellers **generell**?“
- „Wie empfanden Sie die Haptik des Joysticks/Schiebestellers **speziell im Hinblick auf eine fehlerfreie** Menüauswahl/Listenauswahl/Alphanumerische Eingabe?“
- „Wie empfanden Sie die Haptik des Joysticks/Schiebestellers **speziell im Hinblick auf eine schnelle** Menüauswahl/Listenauswahl/Alphanumerische Eingabe?“

Die Bewertung erfolgte anhand einer 5er-Skala.

8.6 Ergebnisse

Die statistische Auswertung erfolgt anhand zweifaktorieller Varianzanalysen. Zur genauen Überprüfung der signifikanten Unterschiede werden im Anschluss Scheffé-Tests durchgeführt.

Bei Durchführung des Versuchs war festzustellen, dass einige Probanden derart mit der Primäraufgabe „Fahren im Fahrsimulator“ beschäftigt waren, dass sie für mehrere Sekunden die Bedienaufgabe unterbrechen mussten. Dies führte z. T. zu sehr großen Messwerten, entspricht im Übrigen aber voll und ganz den Instruktionen, in denen die Vp dazu angehalten wurde, nur in dem Maße Bedienaufgaben auszuführen, wie es die Fahraufgabe zulässt. Zur Überprüfung des Einflusses dieser „extremen“ Messwerte auf das Gesamtergebnis wurde neben der Betrachtung aller Messwerte auch eine Betrachtung des 0. bis 95. Perzentils der Messwerte durchgeführt, d. h. hierbei bleiben die größten 5% der Werte unberücksichtigt.

8.6.1 Bediendauer

In einem ersten Schritt wird überprüft, wie sich die beiden Bedienarten bezüglich der abhängigen Variable Bediendauer verhielten. Dabei werden die Ergebnisse getrennt für die drei Bedienaufgaben dargestellt.

8.6.1.1 Alle Messwerte

Hinsichtlich der Bediendauer ergaben sich bei den Interaktionsaufgaben Menüauswahl und Alphanumerische Eingabe keine bedeutenden Unterschiede (Abbildungen 8.10 und 8.12). Die Faktoren Bedienart und Betätigungskraft bzw. haptische Gestaltung sind nicht signifikant. Bei der Listenauswahl ist die Faktor Betätigungskraft signifikant (Abbildung 8.11). Die zweifaktorielle Varianzanalyse ergibt $p = .003$. Der anschließende Scheffé-Test zeigt, dass speziell beim Joystick die kleine Kraft kürzere Bedienzeiten als die große Kraft lieferte ($p = .049$).

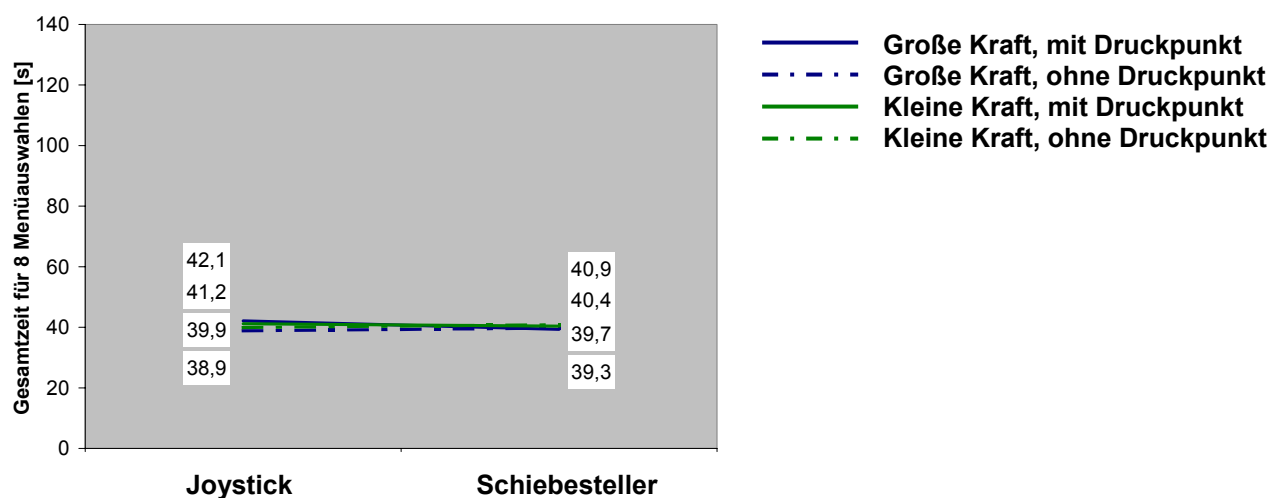


Abb. 8.10: Menüauswahl

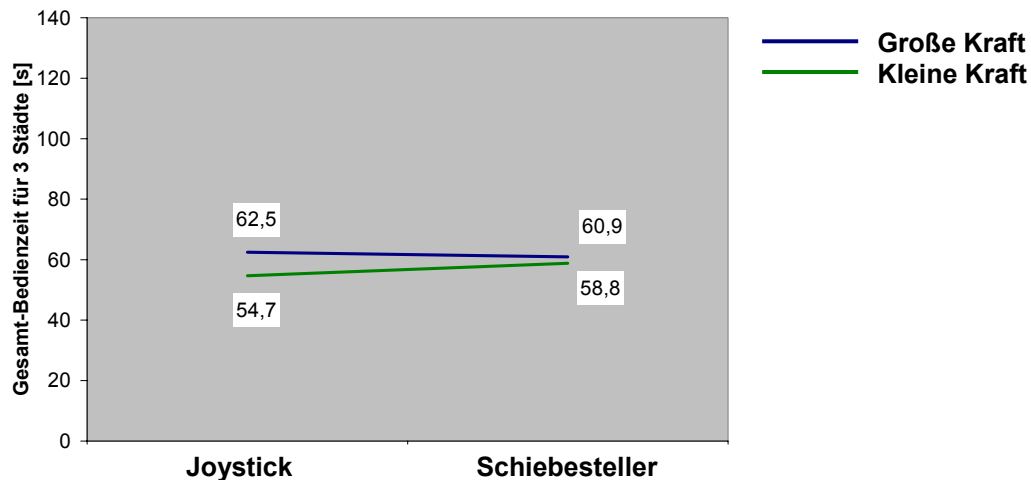


Abb. 8.11: Listenauswahl

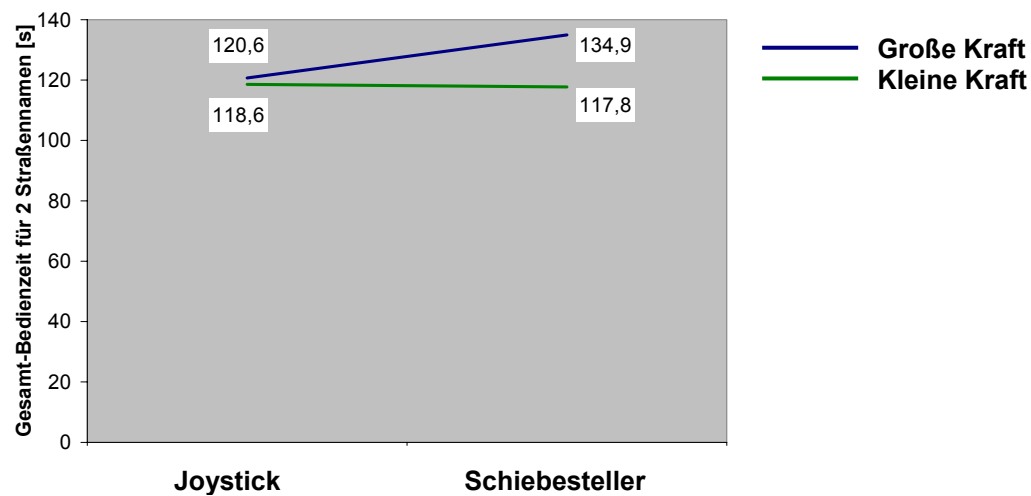


Abb. 8.12: Alphanumerische Eingabe

8.6.1.2 Messwerte 0. bis 95. Perzentil

Wie die folgenden Diagramme zeigen, spielte es bei dieser abhängigen Variable keine Rolle, ob alle Messwerte oder nur das 0. bis 95. Perzentil betrachtet wurden. So ist hier ebenfalls der Faktor Betätigungskraft bei der Listenauswahl signifikant ($p = .005$). Die Bediendauer des Joysticks mit großer Kraft unterscheidet sich signifikant von den Zeiten für Schiebesteller / kleine Kraft (Scheffé-Test, $p = .021$) und Joystick / kleine Kraft (Scheffé-Test, $p = .045$).

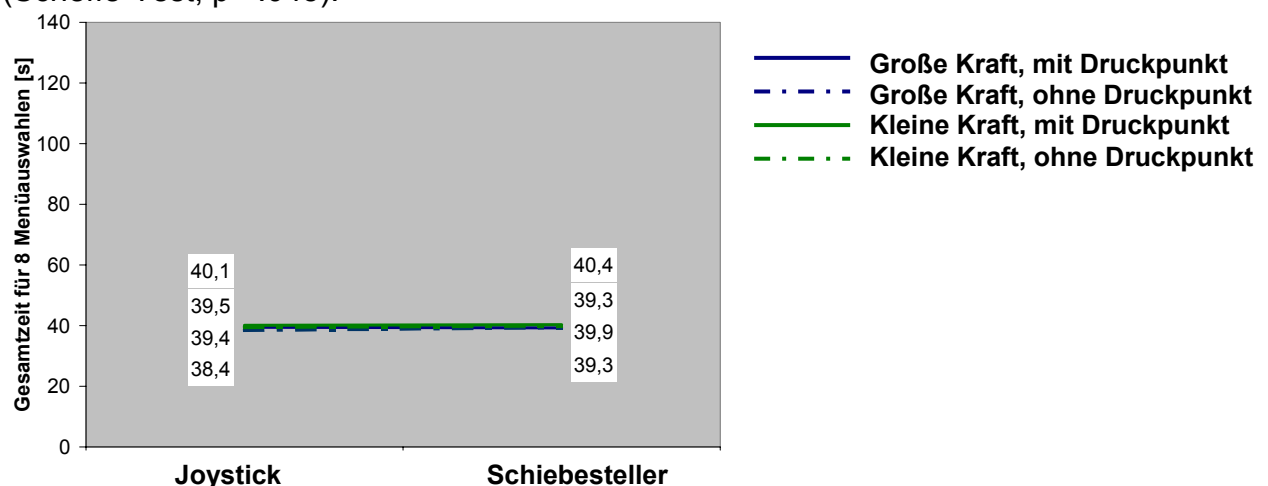


Abbildung 8.13: Menüauswahl

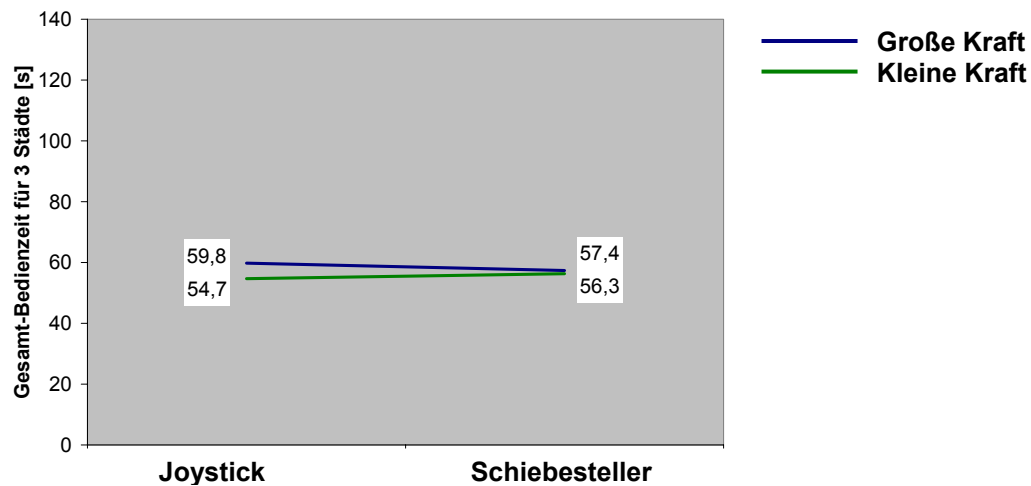


Abbildung 8.14 Listenauswahl

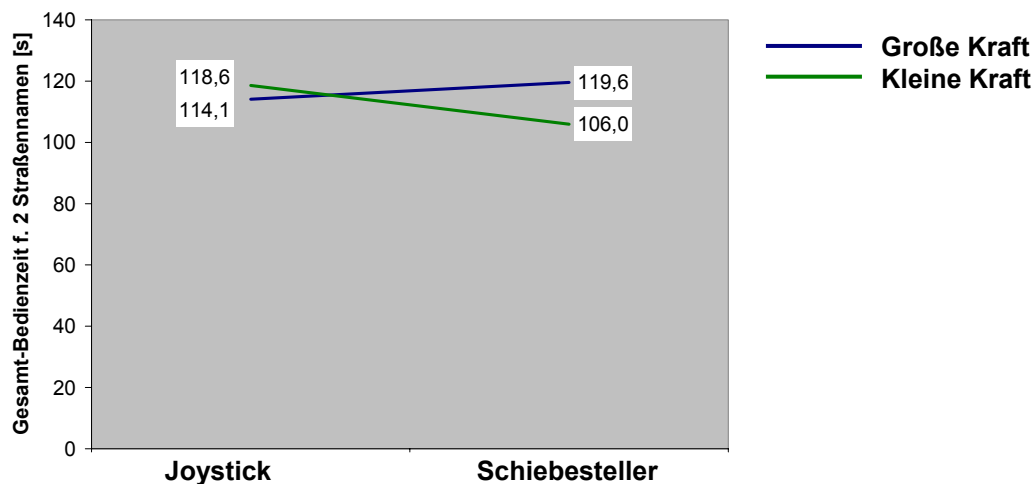


Abbildung 8.15 Alphanumerische Eingabe

8.6.2 Bedienfehler

Analog werden im Folgenden die Ergebnisse für die abhängige Variable Bedienfehler dargestellt.

8.6.2.1 Alle Messwerte

Bei der Menüauswahl zeichnet sich ein interessantes Bild ab. Die zweifaktorielle Varianzanalyse ergibt, dass die zwei Bedienarten sich signifikant unterscheiden ($p = .042$). Beim Joystick mit der Haptik-Variante „Große Kraft, mit Druckpunkt“ ereigneten sich signifikant weniger Bedienfehler als beim Schiebesteller mit der Haptik-Variante „Kleine Kraft, mit Druckpunkt“ (Scheffé-Test, $p = .049$). Generell zeichnen sich die Varianten mit Druckpunkt beim Joystick durch weniger Bedienfehler aus, wohingegen diese beim Schiebesteller besonders schlecht abschneiden. Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass ein Druckpunkt – also das Betätigen über eine Rasterung hinweg - bei einer rotatorischen Bedienung hilfreich, bei einer translatorischen Bedienung dagegen hinderlich wirkt.

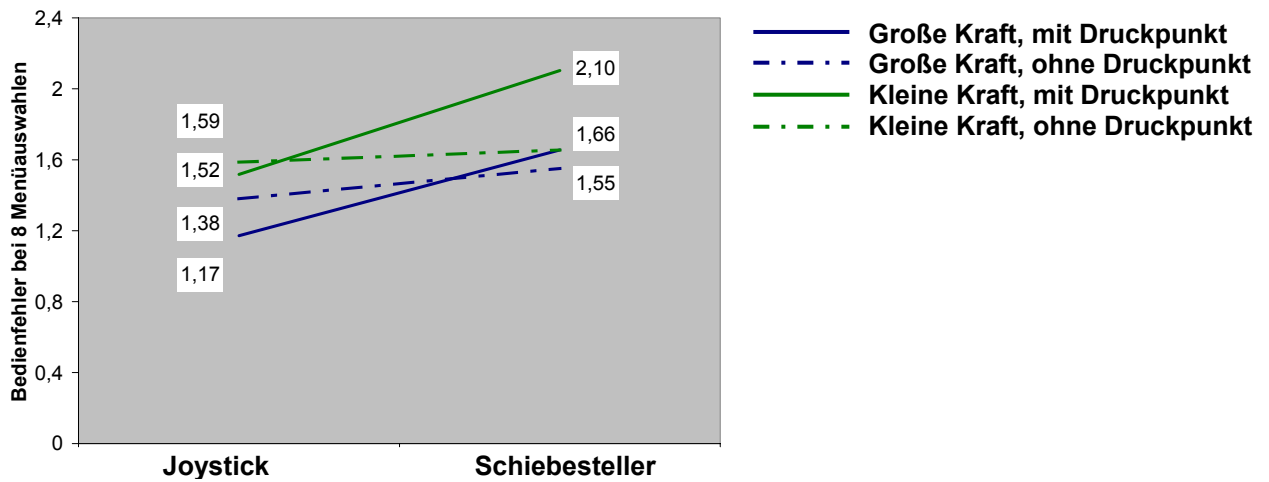


Abbildung 8.16 Menüauswahl

Wie zu sehen ist, kam es bei der Interaktionsaufgabe Listenauswahl insgesamt nur zu sehr wenigen „richtigen“ Bedienfehlern, indem die falsche Stadt ausgewählt wurde. So geschah dies beim Joystick insgesamt viermal, beim Schiebester kam dies überhaupt nicht vor. Dies stellt einen signifikanten Unterschied dar ($p = .043$). Hinsichtlich der Anzahl unnötiger Seitenwechsel, hervorgerufen durch „Überschwingen“ beim Blättern in der Liste, ist der Schiebester auch tendenziell besser ($p = .095$).

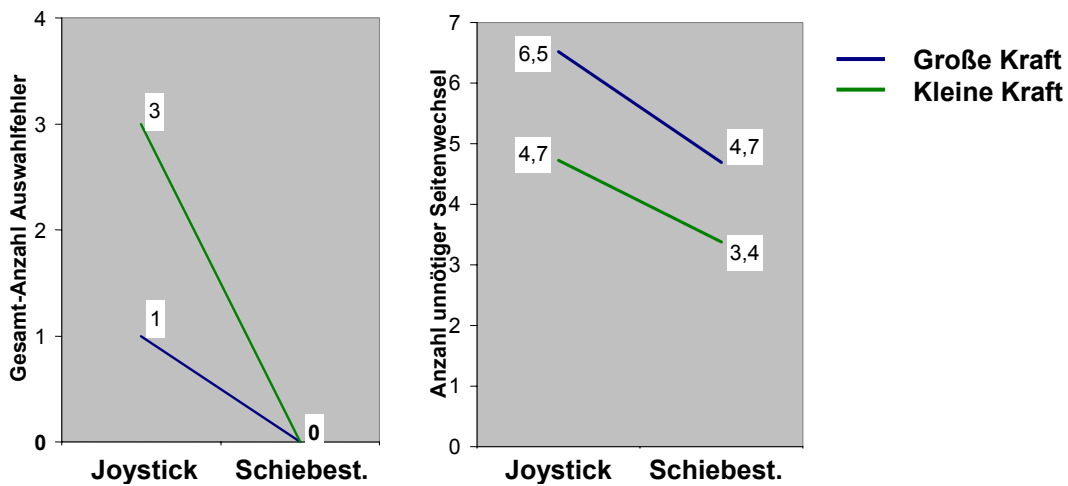


Abbildung 8.17 Listenauswahl

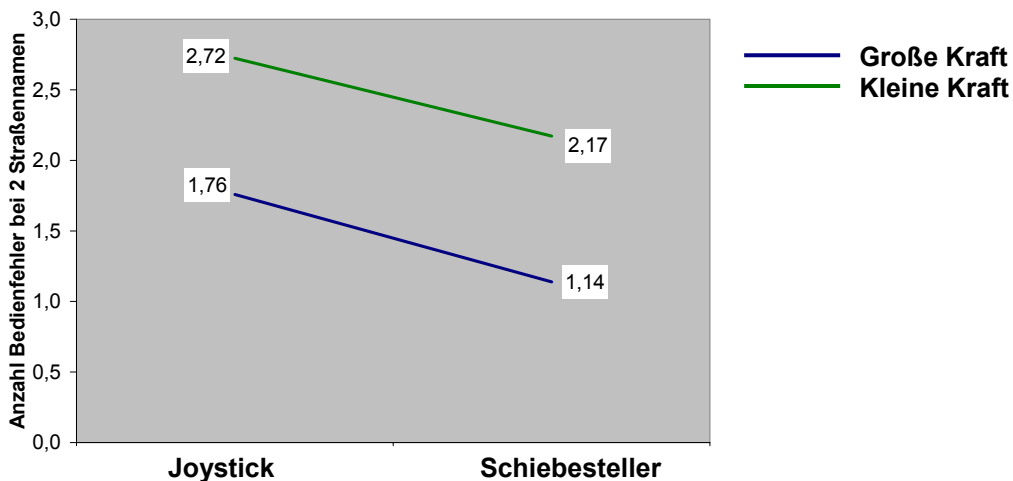


Abbildung 8.18 Alphanumerische Eingabe

Bei der Interaktionsaufgabe Alphanumerische Eingabe (s. Abbildung 8.18) ereignen sich bei der großen Betätigungskraft signifikant weniger Bedienfehler als bei der kleinen Kraft ($p = .013$). Als Bedienfehler wird hier die Auswahl eines falschen Buchstabens gewertet. Beim Schiebester ereignen sich tendenziell weniger Bedienfehler als beim Joystick ($p = .153$).

8.6.2.2 Messwerte 0. bis 95. Perzentil

Betrachtet man nur das 0. bis 95. Perzentil der Messwerte, so ist der Faktor Bedienart nicht mehr signifikant ($p = .155$):

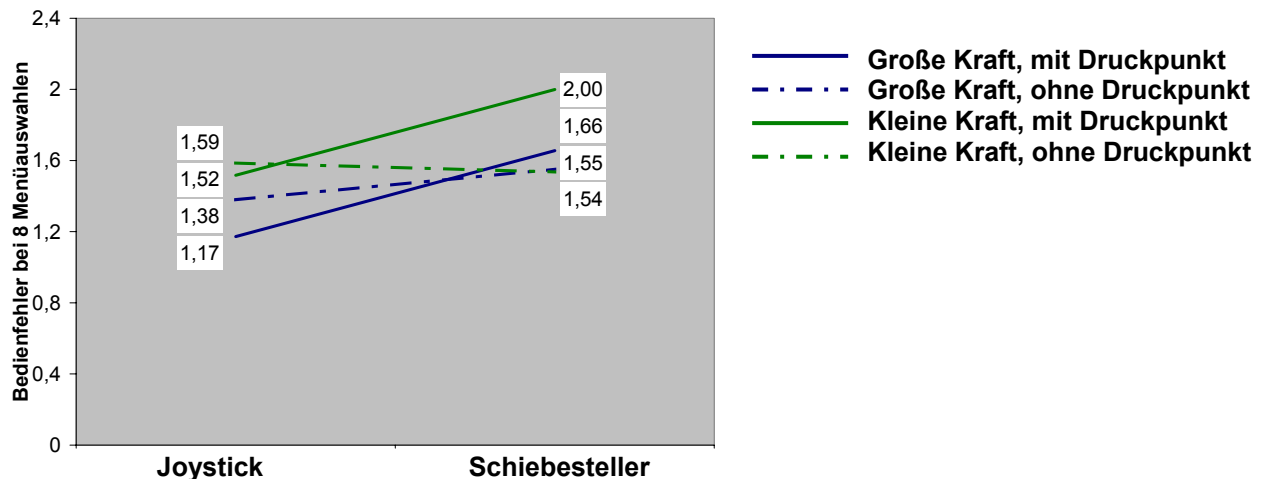


Abbildung 8.19 Menüauswahl

Bei der Listenauswahl ergibt sich bezüglich der Gesamtanzahl Auswahlfehler kein Unterschied zu den obigen Werten. Auch bei der Anzahl unnötiger Seitenwechsel zeichnet sich ein ähnliches Bild ab wie im vorangegangenen Kapitel. Der Schiebester schneidet tendenziell besser ab als der Joystick ($p = .097$).

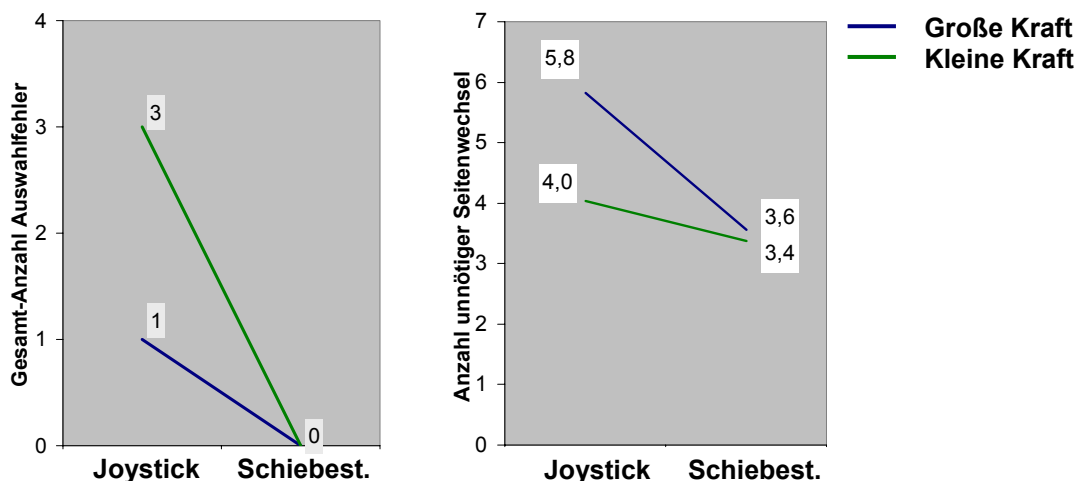


Abbildung 8.20 Listenauswahl

Auch bei der Alphanumerischen Eingabe ergibt sich das gleiche Bild wie bei der Betrachtung aller Messwerte (s. Abbildung 8.21). Der Faktor Betätigungskraft ist signifikant ($p = .046$), beim Schiebester ereignen sich tendenziell weniger Bedienfehler als beim Joystick ($p = .406$).

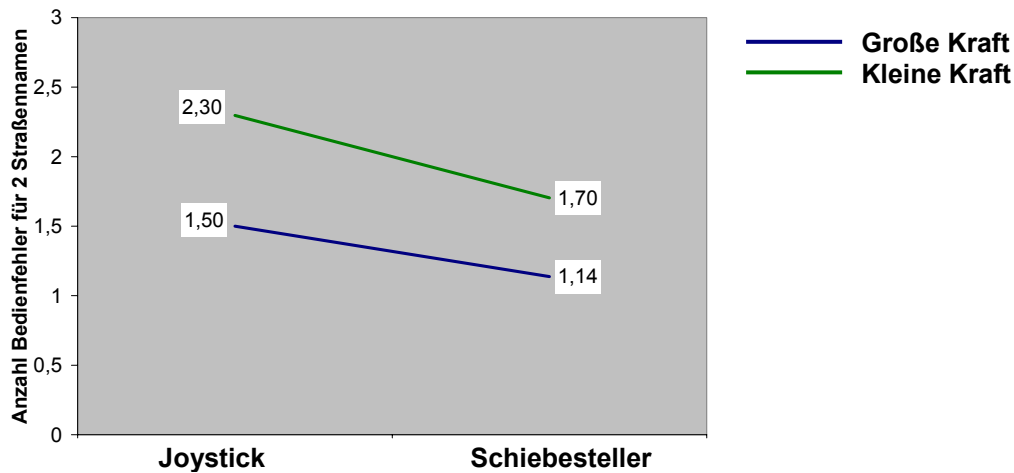


Abbildung 8.21: Alphanumerische Eingabe

8.6.3 Subjektive Bewertung der einzelnen Varianten

Im Folgenden sind nun die Ergebnisse der subjektiven Bewertungen für die einzelnen Faktorstufen getrennt für die drei Interaktionsaufgaben dargestellt.

Für die Interaktionsaufgabe Menüauswahl ergeben sich keine bedeutsamen Unterschiede. Die Bediensicherheit wird hier durchgehend etwas schlechter, die Bedienschnelligkeit etwas besser bewertet. Dies liegt wahrscheinlich an der hohen Anzahl Bedienfehler, speziell bei der Anwahl der Diagonalen. Zum anderen wird hier wohl das Interaktionsprinzip Direktmanipulation indirekt mitbewertet.

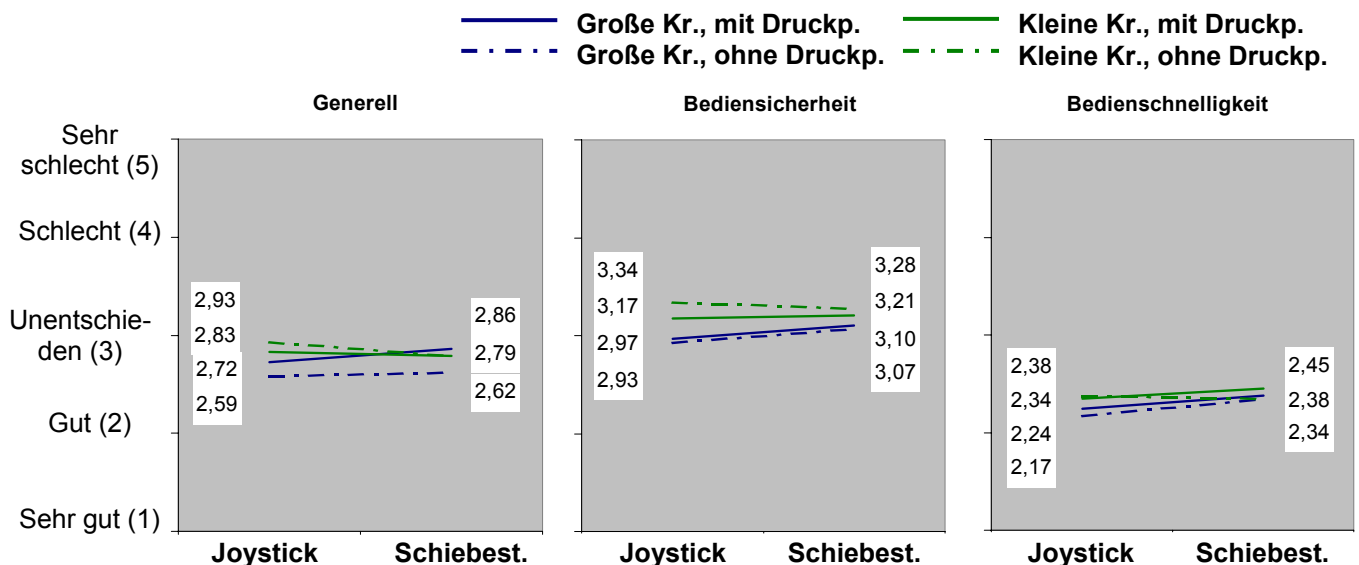


Abbildung 8.22 Menüauswahl

Bei der Interaktionsaufgabe Listenauswahl (vgl. Abbildung 8.23) ist der Faktor Betätigungskraft bei der generellen Bewertung ($p = .019$) und bei der Bewertung der Bediensicherheit ($p = .044$) signifikant. Besonders beim Schiebester wird die kleine Kraft deutlich besser bewertet.

Die unabhängige Bewertung der einzelnen Varianten bei der Interaktionsaufgabe Alphanumerische Eingabe (vgl. Abbildung 8.24) liefert sowohl für den Faktor Bedienart ($p = .000$ bei der generellen Bewertung bis $p = .007$ bei der Bewertung der Bediensicherheit), für den Faktor Betätigungskraft ($p = .000$ bei der generellen Bewertung bis $p = .001$ bei der Bewertung der Bediensicherheit) als auch für die Wechselwirkung ($p = .025$ bei der Bewertung der Bedienschnelligkeit bis $p = .073$ bei der generellen Bewertung) zum

Teil hochsignifikante Unterschiede. Der Joystick wird generell besser bewertet. Hier sind die Unterschiede zwischen großer und kleiner Betätigungskraft relativ gering, wohingegen beim Schiebester die große Kraft besonders schlecht bewertet wurde.

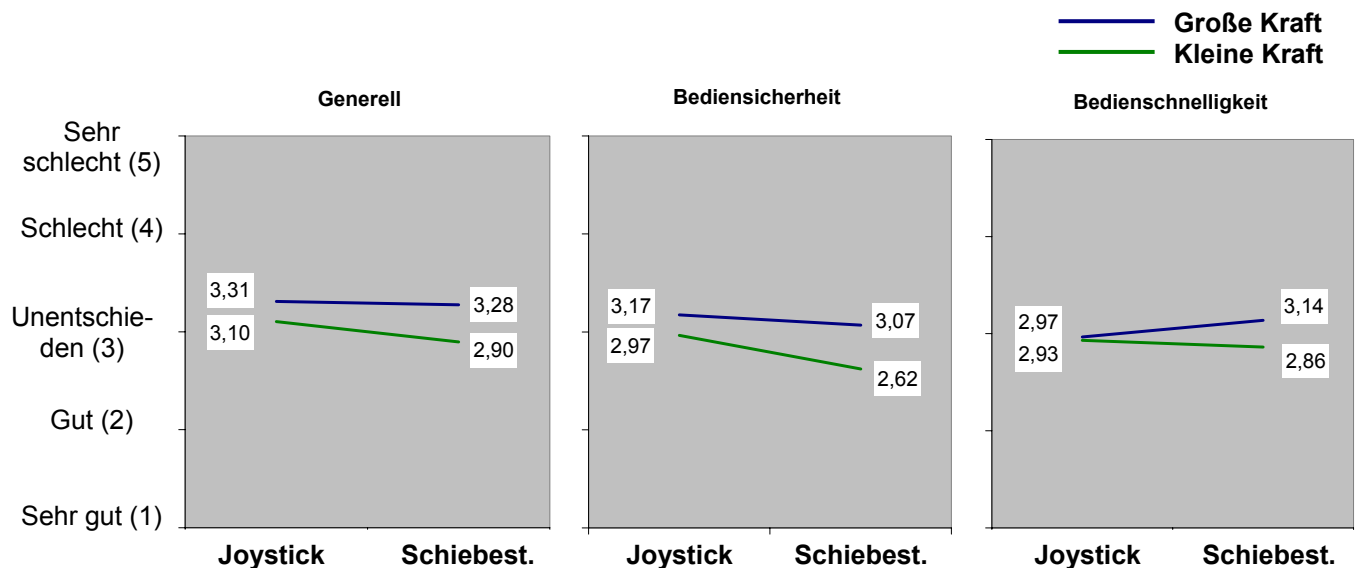


Abbildung 8.23 Listenauswahl

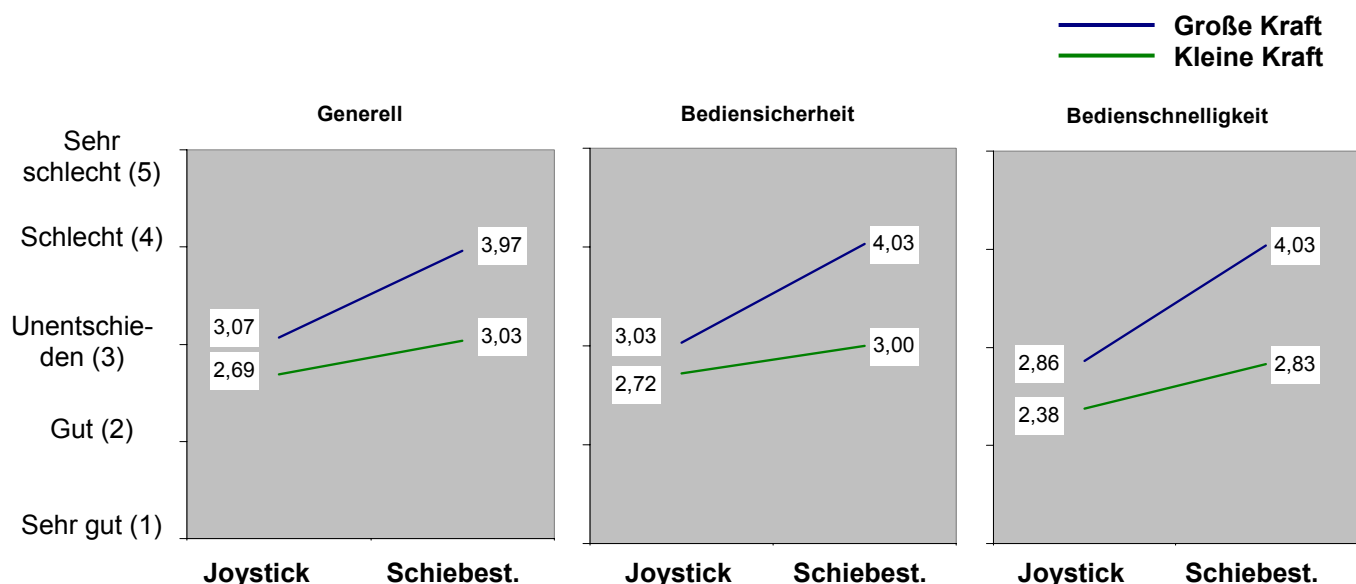


Abbildung 8.24 Alphanumerische Eingabe

8.6.4 Abschließende Gesamtbewertung

Die folgenden Diagramme zeigen, wie die Probanden im Anschluss an die Untersuchung die Varianten bewerteten. Zunächst wurden sie in Form einer Forced-Choice-Abfrage gebeten, sich für eine Bedienart zu entscheiden. Dies erfolgte ebenfalls wieder in Abhängigkeit der drei Interaktionsaufgaben.

Bei der Interaktionsaufgabe Menüauswahl wird der Joystick signifikant bevorzugt. Der Chi-Quadrat-Test ergibt $p = .034$. Des Weiteren wird dabei die große Betätigungskraft ebenfalls signifikant bevorzugt ($p = .003$), wie Abbildung 8.25 zeigt. Tendenziell werden dabei die Haptik-Varianten ohne Druckpunkt bevorzugt ($p = .108$). Beim Schiebester

wird ebenfalls die große Betätigungskraft leicht bevorzugt ($p = .683$), hier ziehen die Vpn jedoch tendenziell Haptik-Varianten mit Druckpunkt vor ($p = .297$).

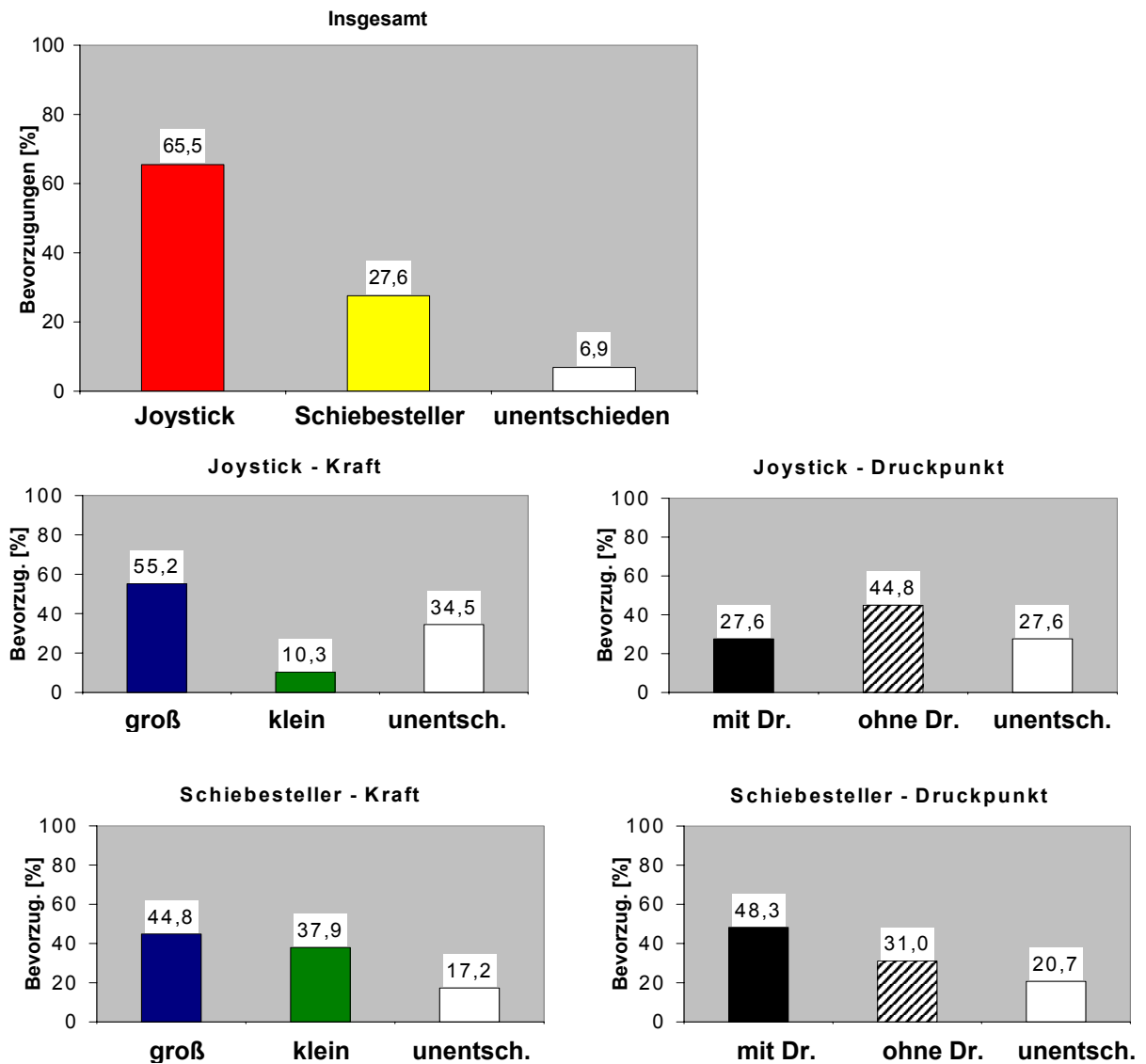


Abbildung 8.25 Menüauswahl

Bei der Interaktionsaufgabe Listenauswahl (vgl. Abbildung 8.26) ergibt sich keine signifikante Bevorzugung. Tendenziell wird der Schiebesteller bevorzugt ($p = .102$). Bezüglich der Betätigungskraft wird beim Joystick tendenziell die große Kraft ($p = .108$), beim Schiebesteller ergibt sich keine Bevorzugung ($p = .513$), wie auf der nächsten Seite zu sehen ist.

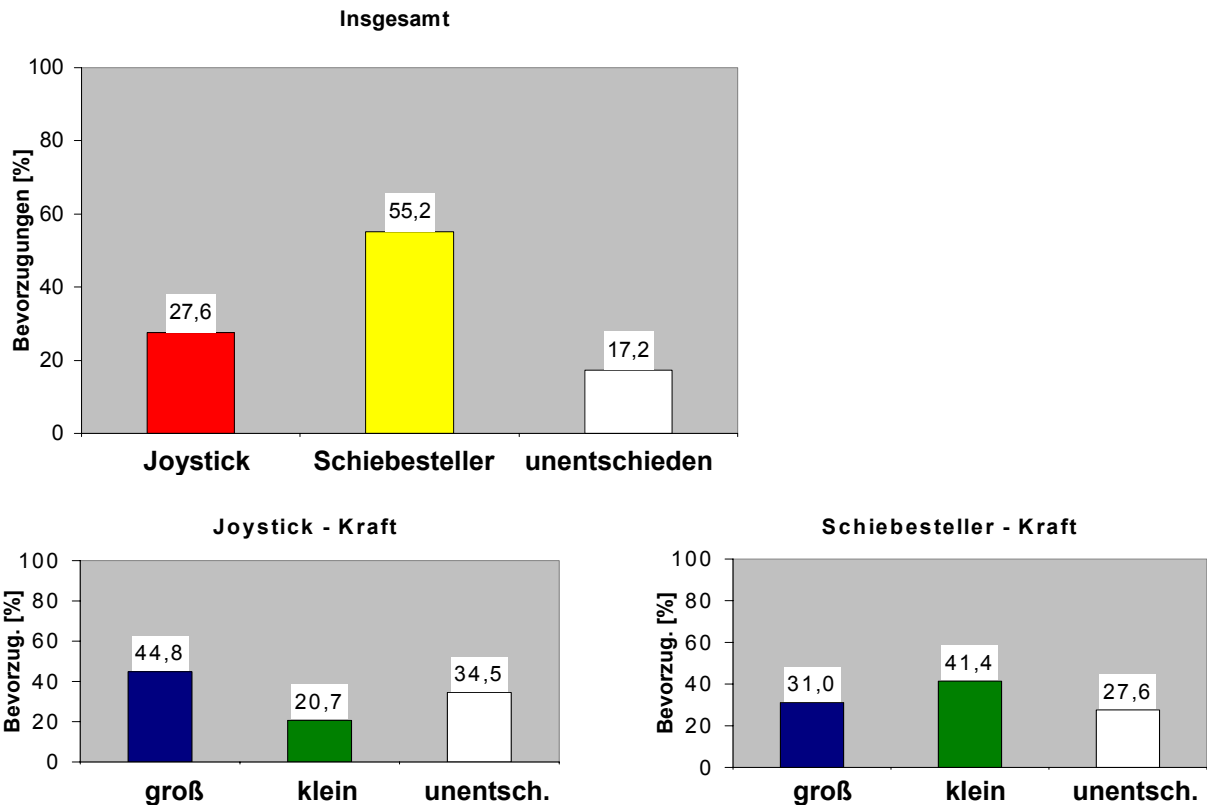


Abbildung 8.26 Listenauswahl

Auch bei der Interaktionsaufgabe Alphanumerische Eingabe gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Bedienarten. Hier wird leicht der Joystick bevorzugt ($p = .695$). Eine Betrachtung der Bewertung der Betätigungskraft ergibt hier beim Joystick nur eine leichte Bevorzugung der kleinen Kraft ($p = .532$), beim Schiebesteller hingegen wird die kleine Kraft signifikant der großen Kraft vorgezogen ($p = .002$).

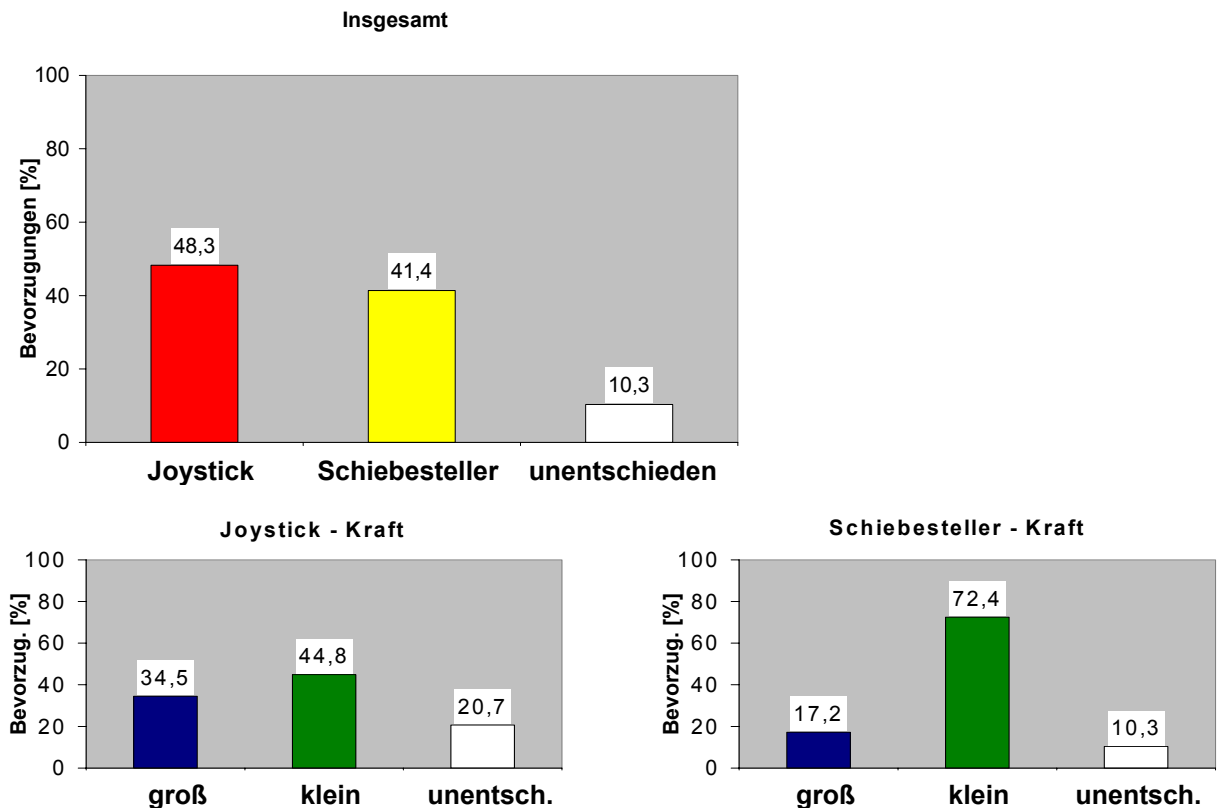


Abbildung 8.27: Alphanumerische Eingabe

8.6.5 Weitere Auswertungen

8.6.5.1 Alphanumerische Eingabe – direkt benachbarte Buchstaben

Wie in Abschnitt 8.4.6 beschrieben, gab es eine Gruppe von Straßennamen mit viel direkt benachbarten und eine mit wenig benachbarten Buchstaben. Im Folgenden sind für diese beiden Gruppen die abhängigen Variablen Bediendauer und Bedienfehler dargestellt. In dieser Auswertung ist nur die große Betätigungskraft berücksichtigt, da sich die Hypothese ausschließlich auf große Kräfte zwischen Buchstabenfeldern bezieht (vgl. Abschnitt 8.2).

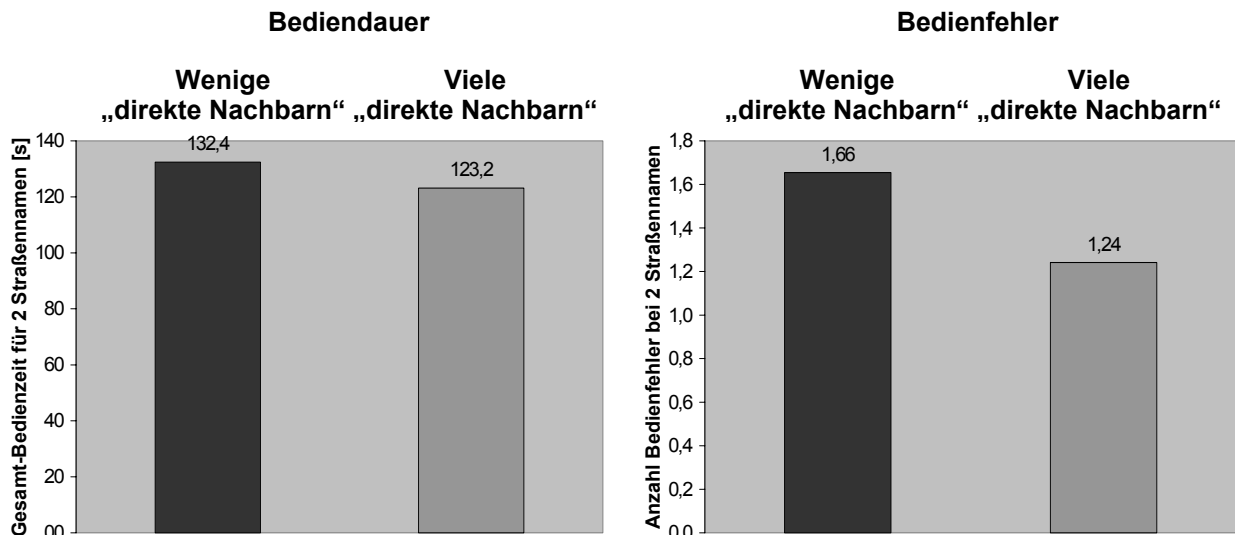


Abbildung 8.28: Alphanumerische Eingabe – direkt benachbarte Buchstaben

Wie die Auswertung zeigt, ergibt sich hier ein gegenüber den Erwartungen gegensätzliches Ergebnis. So war die Bediendauer bei den Straßennamen mit viel direkt benachbarten Buchstaben kürzer, es ereigneten sich bei diesen Straßennamen auch weniger Bedienfehler.

8.6.5.2 Menüauswahl – Hauptrichtungen vs. Diagonalen

Auf den nächsten Diagrammen sind gesondert die Hauptrichtungen den Diagonalen bei der Interaktionsaufgabe Menüauswahl gegenübergestellt. Dabei sind die Bedienarten Joystick und Schiebester zusammen genommen.

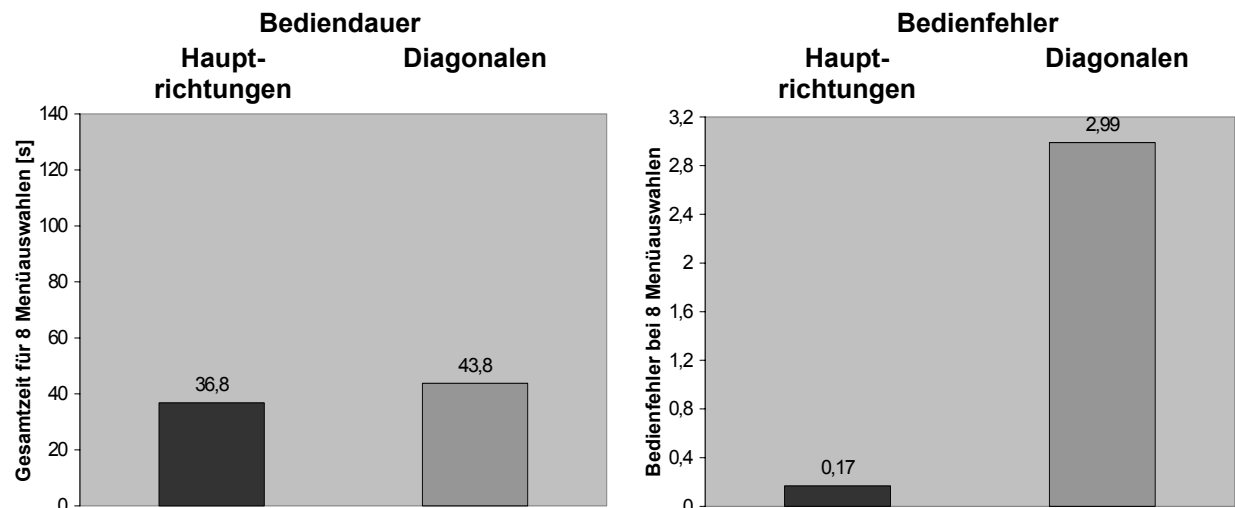


Abbildung 8.29: Menüauswahl – Hauptrichtungen vs. Diagonalen

Ein Vergleich verdeutlicht die extrem schlechte Bedienbarkeit der Diagonalen. Dies zeigt sich im Speziellen bei der Betrachtung der gemachten Bedienfehler. Eine Optimierung muss sicherlich an diesem Problem ansetzen.

8.6.5.3 Menüauswahl – detaillierte Auswertung der Diagonalen

Im Weiteren wurden die vier Diagonalrichtungen noch detailliert betrachtet:

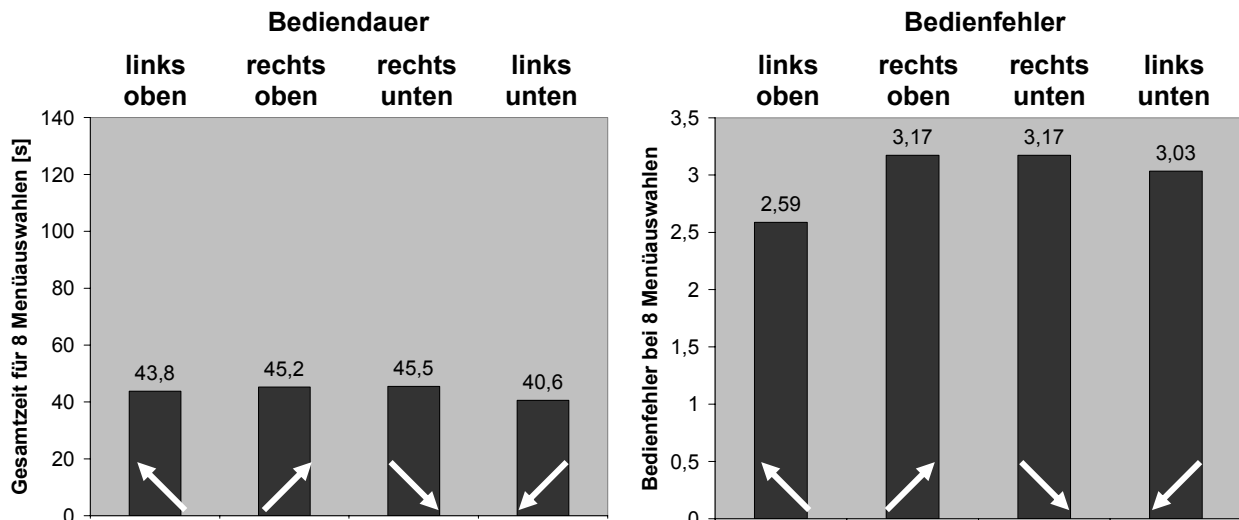


Abbildung 8.30: Menüauswahl – Auswertung der Diagonalen

Die detaillierte Auswertung der Diagonalen zeigt einen signifikanten Unterschied bezüglich der Bediendauer. Die einfaktorielle Varianzanalyse liefert $p = .000$. Offensichtlich lässt sich die Diagonale nach links unten besser bedienen. So ergibt der Scheffé-Test z. B. signifikante Unterschiede zwischen der Diagonale links unten und den Diagonalen rechts unten ($p = .000$) und rechts oben ($p = .001$). Gründe hierfür sind in der Anatomie des Hand-Arm-Systems zu suchen (vgl. Abschnitt 2.1.3). So ist bekannt, dass Bewegungen zum Körper hin (in diesem Fall die Volarflexion) leichter auszuführen sind als Bewegungen weg vom Körper.

8.7 Diskussion

Die vielschichtigen Untersuchungsergebnisse bieten dem Betrachter zunächst ein relativ uneinheitliches Bild. So schneiden je nach Datenquelle und Interaktionsaufgabe unterschiedliche Bedienarten und Betätigungskräfte besser ab. Generell konnten zahlreiche signifikante Unterschiede nachgewiesen werden.

Will man sich für eine **Bedienart** entscheiden, so ist insgesamt die rotatorische Bedienung anhand des Joysticks der translatorischen Bedienung mittels Schiebester vorzuziehen. Signifikant weniger Bedienfehler sowie die subjektive Bevorzugung bei der Interaktionsaufgabe Menüauswahl und vor allem die hochsignifikant bessere Einzelbewertung bei der Interaktionsaufgabe Alphanumerische Eingabe stehen lediglich signifikant weniger Auswahlfehler bei der Interaktionsaufgabe Listenauswahl beim Schiebester gegenüber. Wie kann man sich den Vorteil des Joysticks – etwa auch bei der Interaktionsaufgabe Alphanumerische Eingabe – erklären, obwohl angenommen wurde, dass der Schiebester hierbei deutliche Mapping-Vorteile bietet (vgl. Abschnitt 8.3)? Der Grund dafür ist wohl in der Bedienung selbst zu suchen. So erfolgt die Bedienung des Joysticks hauptsächlich durch Drehen des Handgelenks, wohingegen für

die Bedienung des Schiebestellers mehrere Finger zum Teil erheblich zu bewegen sind. In Abschnitt 2.1.2.3 haben wir aber gesehen, dass die sensorische Auflösung des Handgelenks genauer ist als die der Fingergelenke. Des Weiteren scheint es, als lasse sich der Joystick trotz identischer Bedienaufsätze besser zwischen Finger und Daumen verspannen. Man kann so die Hand besser abstützen, wohingegen man die Abstützung der Hand bei der Bedienung des Schiebestellers aufgibt. Die Drehung des Handgelenks kann motorisch sehr präzise ausgeführt werden (vgl. Abschnitt 2.1.3), was dem Joystick speziell bei motorisch anspruchsvollen Bedienaufgaben Vorteile verschafft. In Analogie zu den hinlänglich bekannten Vorteilen eines Drehstellers gegenüber einem Schieberegler bei Feineinstellungen, hat der Joystick aufgrund der Bedienbewegung bei schwierigen Bedienaufgaben Vorteile gegenüber dem Schiebester. Dies mag auch erklären, weshalb der Joystick speziell bei den Interaktionsaufgaben Menüauswahl und Alphanumerische Eingabe so gut abschnit, da es sich hier um durchaus anspruchsvolle Bedienaufgaben handelt. Die Interaktionsaufgabe Listenauswahl mit nur einer Bedienrichtung und nur fünf Auswahlfeldern pro Seite kann dagegen als relativ einfache Bedienaufgabe angesehen werden. Hier werden die Mapping-Vorteile des Schiebestellers deutlich.

Die Hypothese, wonach aufgrund des Problems des Verschiebens der Cursorposition bei der Auswahl eines Buchstabens bei der rotatorischen Bedienung Nachteile entstehen, konnte jedoch zumindest tendenziell bestätigt werden.

Die Frage, welche **Betätigungskraft** bzw. **haptische Gestaltung** vorzuziehen sei, muss dahingehend beantwortet werden, dass dies in Abhängigkeit von der Interaktionsaufgabe zu geschehen hat. Generell konnte ein Geschwindigkeits-Genauigkeits-Widerspruch eindrucksvoll nachgewiesen werden. So sind die Bedienzeiten bei den Interaktionsaufgaben Listenauswahl und Alphanumerische Eingabe bei der kleinen Betätigungskraft zum Teil signifikant kürzer. Des Weiteren wird sie bei den Einzelbewertungen signifikant besser bewertet. Hinsichtlich der Bedienfehler ist die Situation jedoch genau umgekehrt. Bei der großen Betätigungskraft ereignen sich zum Teil signifikant weniger Bedienfehler.

Die Ergebnisse der „Untersuchung zu den haptischen Eigenschaften eines aktiven haptischen Joysticks in einem Simulatorexperiment“, wonach ein Druckpunkt bei der Interaktionsaufgabe Menüauswahl bevorzugt wird, konnten für den Joystick durch weniger Bedienfehler bestätigt werden. Bei der translatorischen Bedienung verhält sich dieser Sachverhalt wie beschrieben jedoch genau umgekehrt.

8.8 Schlussfolgerung

Die beschriebene Untersuchung zeigt, dass der aktive haptische Joystick gegenüber dem aktiven haptischen Schiebester das bessere Bedienelement zur Interaktion mit einem Fahrerinformationssystem darstellt. Wenngleich die Ergebnisse signifikante Vorteile für beide Bedienelemente liefern, so ist doch insgesamt der Vorteil des Joysticks bei anspruchsvollen Interaktionsaufgaben entscheidend. Zurückzuführen ist dies letztendlich auf die motorischen Eigenheiten der Bedienbewegungen Schwenken und Schieben selbst. Des Weiteren stellten sich für die Interaktionsaufgaben Menüauswahl, Listenauswahl und Alphanumerische Eingabe zu bevorzugende haptische Einstellungen heraus. Somit ist insgesamt der Joystick mit einer relativ großen Krafteinstellung die vorläufig beste Bedienmöglichkeit und wird deshalb für die weitere Arbeit verwendet.

9 Vergleich von Oberflächenvarianten zur Alphanumerischen Eingabe mit einem aktiven haptischen Joystick

9.1 Einleitung

Die in diesem Kapitel beschriebene Untersuchung beschäftigt sich nicht mit der Optimierung haptischer Parameter, sondern mit der Eignung verschiedener Eingabeoberflächen, was jedoch zur Beantwortung der Fragestellung der Arbeit genauso unerlässlich ist. So stellte sich bei der Entwicklung der Interaktionsaufgabe Alphanumerische Eingabe, wie sie im letzten Experiment verwendet wurde, die Frage nach deren optimaler Gestaltung, wenn ein aktiver haptischer Joystick als Eingabemedium dient. Um im darauf folgenden Experiment konstante mit variabler Haptik angemessen vergleichen zu können, liegt es daher nahe, zunächst verschiedene Oberflächenvarianten in Form einer Probandenuntersuchung zu vergleichen.

Typische Formate Alphanumerischer Eingabe bei Fahrerinformationssystemen sind:

Format	Beschreibung
Straßenname, Name	Alphanumerische Eingabe mit Umlauten
Stadtname	Alphanumerische Eingabe mit Umlauten
PLZ	Numerische Eingabe
Telefonnummer	Numerische Eingabe
E-Mail-Adresse	Alphanumerische Eingabe mit Sonderzeichen

Diese Formate sollen über die im Folgenden als Speller (engl. to spell = schreiben, buchstabieren) bezeichneten Eingabeoberflächen mit einem aktiven haptischen Joystick eingegeben werden.

9.2 Zielsetzung und Fragestellung

Die Zielsetzung der Untersuchung ist die Ermittlung jener Eingabeoberfläche, welche bezüglich Effizienz bei der Bearbeitung Alphanumerischer Eingabeaufgaben für die Bedienung eines Fahrerinformationssystems mit einem aktiven haptischen Joystick die besten Eigenschaften aufweist. Des Weiteren wird untersucht, inwieweit demographische oder individuelle persönliche Merkmale (beispielsweise Umgang mit bestimmten Medien) sich auf das Ergebnis bei der Aufgabenerfüllung auswirken können.

Die Eingabeoberflächen sollen sich zum einen darin unterscheiden, in welcher Anordnung die zur Auswahl stehenden Zeichen präsentiert werden. Zum anderen sollen die Eigenschaften der mit ihnen verknüpften haptischen Oberflächen variieren. Ziel dieser Variantenbildung war es also, die Eignung verschiedener Zeichenanordnungen für die Eingabe von alphanumerischen Zeichenfolgen unter Verwendung einer variablen Haptik zu erfassen und zu bewerten.

9.3 Hypothesen

Allgemein besteht die Vermutung, dass es hinsichtlich der Eignung für die vorliegenden Eingabeaufgaben signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Eingabeoberflächen gibt.

Es wird erwartet, dass sich der so genannte „Qwertz-Speller“ (vgl. Abschnitt 9.4.2.1) für jene Eingabeaufgaben als am besten geeignet erweist, da seine Zeichenanordnung auf die am weitesten verbreitete und sich am längsten im Einsatz befindende Anwendung zurückgreifen kann und somit gewissermaßen einen „historischen Vorteil“ (z. B. Übung oder Gewohnheit) hat.

Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass gewisse Sonderfälle bei bestimmten Anwendungen Nachteile bringen und die Aufgabenerfüllung bezüglich Eingabezeit und Fehlerquote behindern. Demnach ließen sich einzelne Spellertypen auch gezielt für bestimmte unterschiedliche Anforderungen einsetzen.

Dass diese Spellertypen mit bestimmten demographischen Merkmalen korrelieren, ist nicht zu erwarten. Zur Überprüfung werden Alter, Beruf sowie Erfahrung mit Fahrerinformationssystemen bzw. elektronischen Medien aller Art erfasst.

Es ist weiterhin davon auszugehen, dass die gewonnenen subjektiven Urteile mit den im Versuch gewonnen objektiven Daten gut korrelieren.

9.4 Methode

9.4.1 Stichprobe

Insgesamt nahmen 28 Probanden an der Untersuchung teil. Die Stichprobe setzte sich wie folgt zusammen:

Vpn	männlich	weiblich	jüngste Vp	älteste Vp	Mittleres Alter
28	27	1	25	61	40

9.4.2 Hardware und Software

9.4.2.1 Eingabeoberfläche 10-Finger-Tastatur („Qwertz-Speller“)

Die älteste und am weitesten verbreitete Tasten- bzw. Zeichenanordnung zur Alphanumerischen Eingabe geht auf das für die Serienproduktion der ersten Schreibmaschine angemeldete Patent von SHOLES & GLIDDEN von 1867 zurück. Die Anordnung der linken oberen Knöpfe brachte dieser Tastatur die Bezeichnung „Qwerty“ (englische Anordnung) bzw. „Qwertz“ (deutsche Anordnung) ein. Der historische Sinn dieser Tastenanordnung liegt in der Betrachtung der mechanischen Abläufe bei den alten mechanischen Schreibmaschinen. Die Tasten bewegen über eine Schubstange einen Typenhebel, an dessen Ende sich der Satzblock befindet – der Stempel mit der Form des Buchstabens. Die Schubstangen nehmen einen möglichst direkten Weg zu den im Halbkreis angeordneten Hebeln. Nebeneinander liegende Hebel gehören deshalb meist zu untereinander liegenden Tasten. Die Schubstangen der unteren Zeilen müssen Platz zwischen denen der oberen Zeilen haben. Deshalb ist jede der Tastenreihen gegenüber der darunter liegenden ein wenig verschoben. Damit sich nacheinander an-

geschlagene Hebel nicht verhaken, müssen sie schnellstens in ihre Ruhelage zurückkehren. Eine weitere Methode zur Vermeidung dieses Verhakens ist die Anordnung der Buchstaben in der Art, dass in typischen Zeichenfolgen keine benachbarten Hebel in Aktion treten.

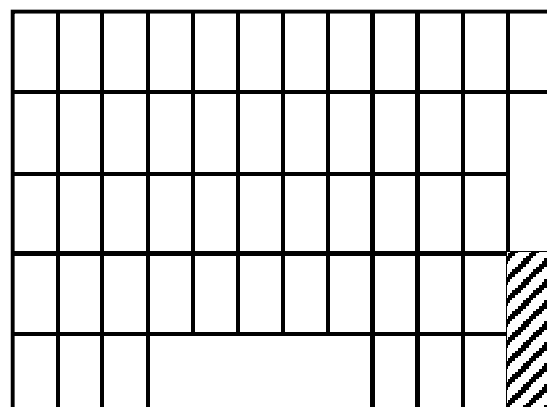
Diese Anordnung lebt in der Computertastatur fort – ohne jeden technischen Grund. Dies liegt nicht zuletzt an der International Standards Organization (ISO), die diese Tastenanordnung 1971 zum Standard für „communications and computer interface keyboards“ erklärte. Der Ziffernblock beweist, dass man Tasten durchaus im quadratischen Raster anordnen kann. Deshalb sollen die hier dargestellten Oberflächen ebenfalls ein quadratisches Raster ohne Versatz erhalten, da durch diese Verschiebung auch die Einsatzbedingungen für ein Haptikraster erschwert würden.

Das wohl bekannteste alternative Tastenlayout für Keyboards wurde 1936 von August DVORAK und William L. DEALEY entwickelt. Die DVORAK-Tastatur sollte die Schreibgeschwindigkeit erhöhen, indem die Tasten für die am häufigsten vorkommenden Buchstaben möglichst leicht zugänglich platziert wurden. So wurden die in der englischen Sprache am meisten benötigten Buchstaben in die mittlere Reihe der Tastatur gelegt. Wegen der fehlenden deutschen Umlaute ist diese Anordnung in Deutschland heutzutage kaum noch von Bedeutung. Sie wurde nicht untersucht.

Die folgende Abbildung zeigt die für diese Untersuchung erstellte Oberfläche mit „Qwertz“-Anordnung:



Darstellungsebene Tastenfeld, 12 x 5



Haptikebene, gestreckt auf 4 x 3

Abbildung 9.1: „Qwertz-Speller“

Die grafische Darstellung (links) zeigt das Haupttastenfeld mit seinen 5 x 11 quadratischen Tastenflächen und den bezüglich Lage- und Farbcodierung abgesetzten Tasten für die Eingabebestätigung und das Löschen des letzten Zeichens. Dabei haben die Buchstabentasten eine üblichen Tastaturen entsprechende quadratische Grundform, das Tastenfeld nimmt den Bildschirm nicht in seiner ganzen Höhe ein.

Die schematisierte Darstellung der haptischen Oberfläche für diesen Rastertyp (rechts) zeigt hingegen ein auf das volle Bildschirmformat von 4 : 3 gestrecktes Haptikraster ohne Anzeigenfeld mit einer Höhe von 5 und einer Breite von 12 Basistasten. Der Unterschied in den Seitenverhältnissen wird hierbei deshalb in Kauf genommen, weil so der ganze zur Verfügung stehende Auslenkbereich des Joysticks genutzt bleibt und eine Differenzierung der einzelnen Felder erleichtert wird. In der Praxis wurde keine subjektiv wahrgenommene Beeinträchtigung des Echtheitsempfindens (Immersion) für den Benutzer festgestellt. Jedes Feld in diesem Raster ist eindeutig einem speziellen Buchstaben zugeordnet. Bei Bewegungen des Cursors über eine Rasterlinie hinweg wird eine Gegenkraft spürbar. Dem Benutzer wird so das Gefühl vermittelt, der Cursor raste leicht in den einzelnen Buchstabenfeldern ein. Dadurch soll die Anwahl von Buchsta-

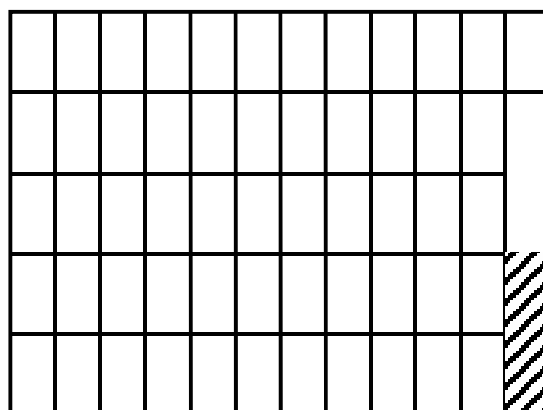
ben erleichtert und gleichzeitig die dadurch entstehende visuelle Ablenkung minimiert werden. Für die Haptikrafterstellung wurde eine möglichst hohe Kraft eingestellt. Diese wird allerdings durch die Eigenschaft des Joysticks begrenzt, schon vor Erreichen der maximalen Sättigung zu instabilen Überschwingern zu neigen und sich bis hin zum unkontrollierten Schlagen aufzuschaukeln. Die Maximalkraft entspricht in etwa der entsprechenden Maximalkraft der letzten Untersuchung (siehe S. 85 ff), musste jedoch entsprechend der Anzahl an Feldern in horizontaler und vertikaler Richtung angepasst werden.

9.4.2.2 Alphabetisch geordnete Eingabeoberfläche („ABC-Speller“)

Der „ABC-Speller“ unterscheidet sich in seinen geometrischen und haptischen Eigenschaften nicht grundlegend von jenem mit „Qwertz“-Anordnung:



Darstellungsebene Tastenfeld, 12 x 5



Haptikebene, gestreckt auf 4 x 3

Abbildung 9.2: „ABC-Speller“

Die Buchstaben, Interpunktionszeichen, Ziffern und Sonderzeichen sind zeilenweise in alphabetischer Reihenfolge angeordnet. Wie beim „Qwertz-Speller“ wurden an das Tastenfeld rechts die Tasten Eingabebestätigung und Löschen angefügt und über eine im Verhältnis zum Tastenfeld höhere Kraft auch haptisch von diesem abgesetzt. Diese Art der Anordnung wird bereits in zahlreichen Fahrerinformationssystemen verwendet, da sie sich für die in diesen Fällen häufig verwendeten Dreh-Druckknopfsteller in speziellem Maße eignet.

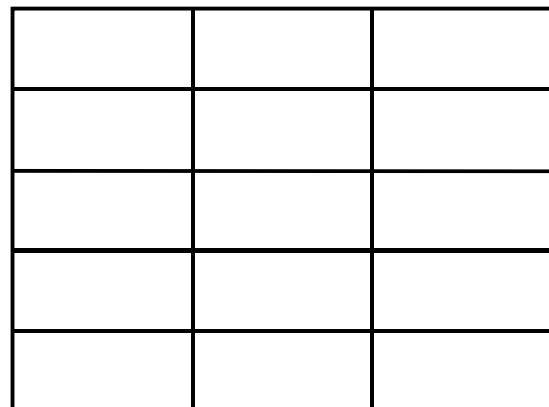
9.4.2.3 Eingabeoberfläche 10er-Block, 1-2-3-System („Handy-Speller“)

Beim Handy-Speller sind die Tasten mehrfach belegt; durch Mehrfachklicken des im Joystick-Aufsatz integrierten Drucktasters werden die Alternativen angewählt. Erfolgt bis 1200 ms nach dem letzten Klick kein weiterer, so wird das zuletzt angewählte Zeichen übernommen. Durch diese für Telefone – speziell aus dem Mobilfunkbereich – typische Methode wird eine Reduzierung der Tastenanzahl auf in diesem Falle 14 erreicht. Diese Anordnung kann leicht durch ein Raster mit 3 x 5 Feldern dargestellt werden, welches für die Haptik den Vorteil bietet, dass die zahlenmäßig reduzierten Felder größer ausfallen und dadurch haptisch besser differenziert werden können. Hier genügt eine geringere Krafterstellung, um die einzelnen Felder hinreichend haptisch differenzieren zu können. Dadurch wird auch instabilem Aufschaukeln vorgebeugt.

Die bei dieser Variante verwendete Grafik und Haptik ist in der folgenden Abbildung dargestellt:



Darstellungsebene



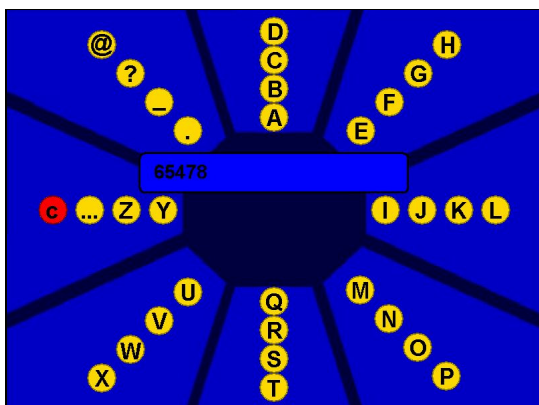
Haptikebene, „Grid“ 3 x 5

Abbildung 9.3: „Handy-Speller“

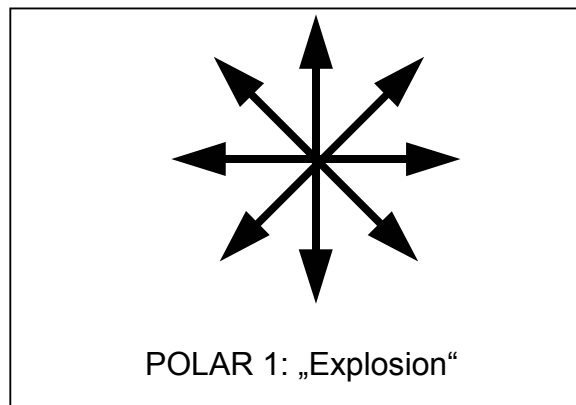
9.4.2.4 Eingabeoberflächen mit polarer Anordnung („Polar-Speller“)

Die beiden als „polar“ bezeichneten Spellertypen sind im Rahmen einer Diplomarbeit entstandene Neuentwicklungen. Hier sollten die Zeichen nicht über ein kartesisches, sondern über ein polar um die Mittelstellung des Joysticks angeordnetes System verwaltet werden. Die acht Bewegungsrichtungen wurden weiter differenziert, indem in jede Richtung vier Druckpunkte gelegt wurden. So ließen sich pro Bildschirmseite mittels Cursorsteuerung 32 Positionen markieren und mit dem Drucktaster auswählen. Hinzu kommt ein zweiter Zeichensatz mit Ziffern, Sonder- und Interpunktionszeichen, der in einer zweiten Version dieser Oberfläche über eines der 32 Felder aufgerufen werden kann. Außerdem wurde die Mittellage des Joysticks bei Betätigung des Druckknopfes als Eingabebestätigung festgelegt. Die Rückwärts- oder Löschtaste (rot) wurde in diesem Fall auch über eine der 32 Alternativen umgesetzt. Die beiden generierten Varianten unterscheiden sich lediglich in der Anordnung der „Zeichenstrahlen“ bezüglich der Mittellage. Die für beide Typen identische Haptik wird daher ausschließlich bei „Polar 1“ beschrieben, die haptischen Parameter von „Polar 2“ sind analog hierzu, lediglich auf der Darstellungsebene müssen Zuordnungen geändert werden.

„POLAR 1-Speller“ („Explosion“)



Darstellungsebene



Prinzip der Zeichenanordnung

Abbildung 9.4: „POLAR 1-Speller“

Bei dem Speller des Typs „Polar 1“ weisen alle Elemente des Zeichensatzes in ihrer Reihenfolge konzentrisch von der Mittellage nach außen. Das Pfeilkreuz verdeutlicht die Bezeichnung mit dem Attribut „Explosion“

Die Haptik dieser Oberfläche besteht im Wesentlichen aus zwei Arten von Grundeffekten (s. Abbildung 9.5):

- den wie Schienen ausgeprägten Führungen, die die Charakteristik eines 8-Wege-Stellers erzeugen sollen, und
- die Felder, die mit Hilfe von Kräften an ihren Begrenzungen die einzelnen Druckpunkte für jede Betätigungsrichtung verwirklichen sollen.

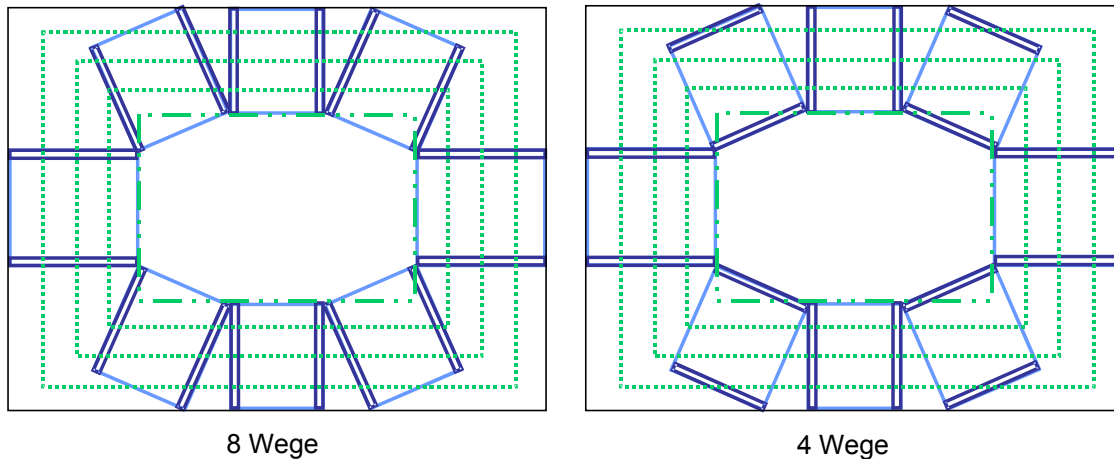
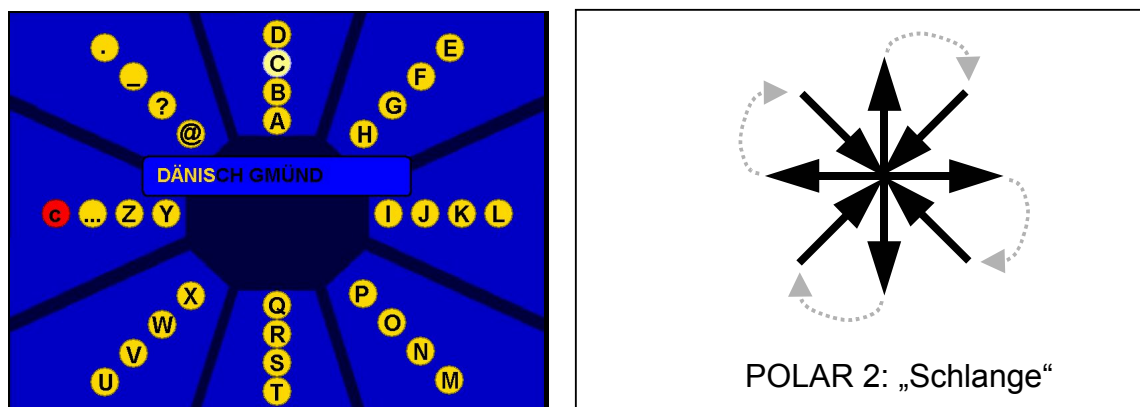


Abbildung 9.5: Haptik der polaren Speller

Den „Schienen“ liegt der haptische Grundeffekt „Enclosure“ zugrunde. Für diesen Effekt besteht die Möglichkeit, für Längs- und Querrichtung getrennt, die Dicke und Steifigkeit der umgebenden Begrenzungen („walls“) zu definieren. In diesem Fall wurde beispielsweise für die horizontalen Begrenzungen der mechanische Widerstand auf null gesetzt, jener der vertikalen Wände erhöht. So lassen sich durch einfachen Parameter-tausch die „Schienen“ von der Längs- zur Querseite tauschen und somit beispielsweise eine Sperrung der vier Diagonalen der 8-Wege-Funktionalität erreichen. Konkrete Anwendung findet dies im erarbeiteten Konzept bei der Eingabe von Ziffernfolgen wie Postleitzahlen. Hier werden der Zeichensatz auf zehn Ziffern- und Funktionstasten reduziert und die Diagonalen gesperrt.

„POLAR 2-Speller“ („Schlange“)

Die Herleitung der Bezeichnung „Schlange“ für diese alternierend gerichtete Anordnung zeigt die folgende Abbildung:



Darstellungsebene

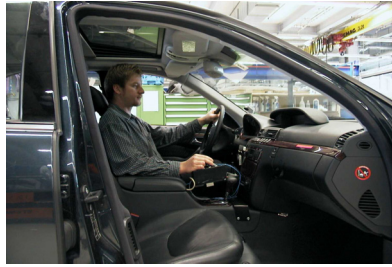
Prinzip der Zeichenanordnung

Abbildung 9.6: „POLAR 2-Speller“

Diese Variante beruht auf derselben geometrischen Anordnung wie „Polar 1“. Lediglich wurden die Felder in den Diagonalen so angeordnet, dass sie in ihrer logischen Reihenfolge nicht von innen nach außen, sondern abwechselnd auch von außen nach innen laufen. Wie bereits erwähnt, liegt dieser Oberfläche die identische haptische Gestaltung wie bei „Polar 1“ zugrunde. Für eine bessere Differenzierbarkeit der einzelnen Druckpunkte in einer Bewegungsrichtung wurden die Kräfte der einzelnen Rechtecke, durch welche diese Druckpunkte dargestellt wurden, individuell so ausgelegt, dass die Kraft zur Überwindung des Druckpunktes nach außen hin immer ein wenig zunahm und ein solcher Druckpunkt nicht einfach bei einer zu starken Betätigung überfahren werden konnte.

9.4.3 Versuchsfahrzeug

Die Durchführung fand in dem in Abschnitt 5.4 beschriebenen Versuchsfahrzeug statt, um für die Abwicklung der Systembedienung ein möglichst realistisches Umfeld zur Verfügung zu haben.



Abbildungen 9.6 – 9.9: Versuchsfahrzeug

9.4.4 Datenaufzeichnung

Zur Beurteilung der Eignung der einzelnen Spellertypen für die verschiedenen Eingabeaufgaben unter Berücksichtigung von Sonderfällen wurden im Probandenversuch die Messgrößen

- benötigte Zeit,
- fehlerhafte Eingaben und
- Anzahl an Klicks

während der Versuchsdurchführung aufgezeichnet. Die benötigte Zeit wurde in der Art erfasst, dass die Zeitnahme zwischen dem Aufruf der Aufgabenstellung und dem Abschluss der korrekten Eingabe mit der Eingabetaste erfolgte. Die Fehlerzahl wurde über die Anzahl der Auslösungen der Löschtaste erfasst. Die Erfassung der Anzahl an Klicks hatte den besonderen Zweck, solche „halben“ Fehler erfassbar zu machen, wie sie bei der Bedienung des „Handy-Spellers“ auftreten können. Hierbei kann der Benutzer durch zu oftmaliges Drücken der jeweiligen Taste am gewünschten Zeichen „vorbeinavigieren“. Sobald er aber die Taste innerhalb von 1200 ms wieder drückt, hat er die Möglichkeit, doch noch das richtige Zeichen einzugeben, ohne dass er die Löschtaste benutzen muss. Diese „halben“ Fehler können also über die Löschtaste nicht erfasst werden. Bei einer Vergleichszählung zwischen benötigten Klicks für die korrekte Eingabe und Anzahl der Klicks bei der tatsächlichen Eingabe sowie der Anzahl der Löschtastenbetätigungen ließe sich also herauslesen, wie oft der Proband über das gewünschte Zeichen hinaus geklickt haben muss.

9.4.5 Versuchsdesign

Die konkrete Aufgabe der Vpn in der Untersuchung war die vergleichbare, möglichst schnelle und fehlerfreie Eingabe von vordefinierten Zeichenfolgen. Diese waren einerseits vom Eingabekontext her bezüglich Art und Format unterschiedlich. Ein weiterer Unterschied lässt sich daraus ableiten, für welche Typen von Zeichenfolgen die einzelnen Spellertypen aufgrund ihrer Organisation und Zeichenanordnung für verschiedene Eingabeaufgaben unterschiedliche Eignung aufweisen. So ließen sich Sonderfälle ableiten, bei denen einzelne Spellertypen eindeutige Nachteile erwarten lassen oder zumindest auf eine unkomfortable Bedienung geschlossen werden kann. Diese Sonderfälle konnten teilweise direkt aus der Darstellung einzelner Spellertypen abgeleitet werden, beispielsweise ein Nachteil, welcher den „Handy-Speller“ betrifft: Hier wurden mehrere Zeichen auf einer Taste abgelegt und durch kurz aufeinander folgende Klicks angewählt. Dies hatte nun zum einen eine erhöhte Zahl an Klicks – also Bedienschritten – zur Folge. Andererseits musste bei Wiederholungen von Zeichen oder bei der sequentiellen Eingabe von Zeichen, die auf derselben Taste liegen, erst die Annahme des angewählten Zeichens durch das System abgewartet werden, was auch einen negativen Effekt auf die benötigte Eingabezeit bedeutet.

So wurden fünf Typen von Sonderfällen gebildet, welche wie folgt eingeteilt wurden:

- *Typ 1:* Wiederholung von Zeichen
- *Typ 2:* Umlaute als Sonderzeichen
- *Typ 3:* Nachbarn: Ziffern (oder Buchstaben), die in ihrer Abfolge oder auf den Tastaturen benachbart sind.
- *Typ 4:* Sprünge: Ziffern, die in ihrer Abfolge oder auf den Tastaturen weit auseinander liegen.
- *Typ 5:* Sonderzeichen wie @ oder Interpunktionen

Für den Versuch wurden nun zwei Gruppen von Eingabeaufgaben aufgestellt. Die erste Gruppe sollte die beschriebenen Sonderfälle vermeiden, um nicht unnötigerweise zu Verfälschungen beim Versuchsergebnis zu führen. In einer zweiten Gruppe wurden diese Sonderfälle explizit gestellt und dazu genutzt, um den Verdacht zu bestätigen, dass durch den Einsatz dieser Sonderfälle einzelne Spellertypen vor- oder nachteilig beeinflusst werden würden. Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick über die fünf erstellten Typen von Zeichenfolgen mit Sonderfällen und ohne:

	Aufgaben ohne Sonderfälle:	Aufgaben mit Sonderfällen:
<i>Typ 1</i>	Buchenweg	Haager Allee
<i>Typ 2</i>	Rosenheim	Dänisch-Gmünd
<i>Typ 3</i>	95274	65478
<i>Typ 4</i>	0852614638	0192830184
<i>Typ 5</i>	Bernhard	wolfram@behr-ag.ch

Tabelle 9.1: Zeichenfolgen ohne und mit Sonderfällen

Jede Vp hatte nun die Aufgabe, die gebildeten zwei Blöcke an Eingabeaufgaben für alle fünf Spellertypen abzuarbeiten. Da jeder Speller mit jeder der Aufgaben getestet werden musste, ergab sich eine Anzahl von 25 Eingabeaufgaben pro Aufgabenblock. Dabei wurden die Aufgaben so permutiert, dass Übungseffekte durch aufeinander fol-

gende identische Aufgabenstellungen oder aufeinander folgende identische Spellertypen vermieden werden sollten.

9.5 Versuchsablauf

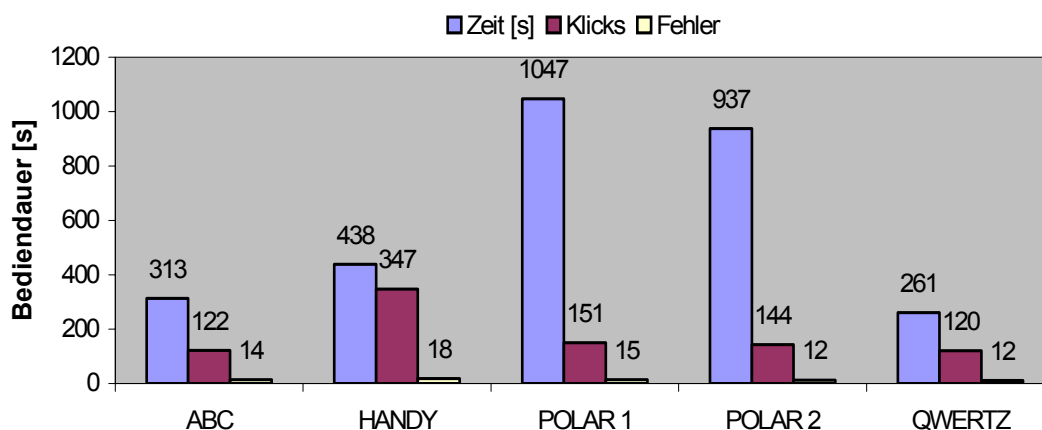
Die Untersuchung wurde standardisiert durchgeführt. Nach der Begrüßung der Probanden wurden sie gebeten, zunächst den demographischen Fragebogen auszufüllen. Erfasst wurden vorab die demographischen Merkmale und Erfahrungen mit den relevanten Medien. Daraufhin wurde die Einweisung als Audiodatei eingespielt. Dies sollte dazu dienen, jeder Vp vom Versuchsleiter unabhängig die gleiche Einweisung zu erteilen.

Nach einer kurzen Vorstellung der fünf Spellertypen über Tafeln wurde der Versuch gestartet. Die insgesamt 50 einzelnen Aufgaben wurden dabei immer von einer neutralen Bildschirmoberfläche (ohne haptische Rückmeldung) aus durch eine Eingabebestätigung aufgerufen. Nach dem Aufruf hatte die Vp eine frei bestimmbare Zeit zur Verfügung, in der sie die Möglichkeit hatte, die Oberfläche mit ihrer Haptik ohne Eingabeaufgabe und ohne Zeitdruck kennen zu lernen. Den Teilnehmern wurde empfohlen, sich hierfür etwa 10-15 sec Zeit zu nehmen. Die eigentliche Aufgabe wurde erst durch Betätigen der Eingabetaste gestartet. Dies hatte den Effekt, dass die Zeitnahme auch wirklich erst dann erfolgte, wenn der Proband bereit war. Die Zeitnahme wurde erst dann beendet, wenn die Zeichenfolge korrekt eingegeben war. Hierzu wurde eine Vorgabe in das Anzeigenfeld eingestellt, die der Teilnehmer nachzutippen hatte. So wurden sukzessiv alle 50 Aufgaben abgearbeitet. Daran schloss sich die Abschlussfrage nach dem subjektiven Gefallensurteil an, in der die Probanden die Aufgabe hatten, die ihnen noch einmal vorgeführten fünf Spellertypen nach persönlichem Gefallen in eine Reihenfolge zu bringen.

9.6 Ergebnisse

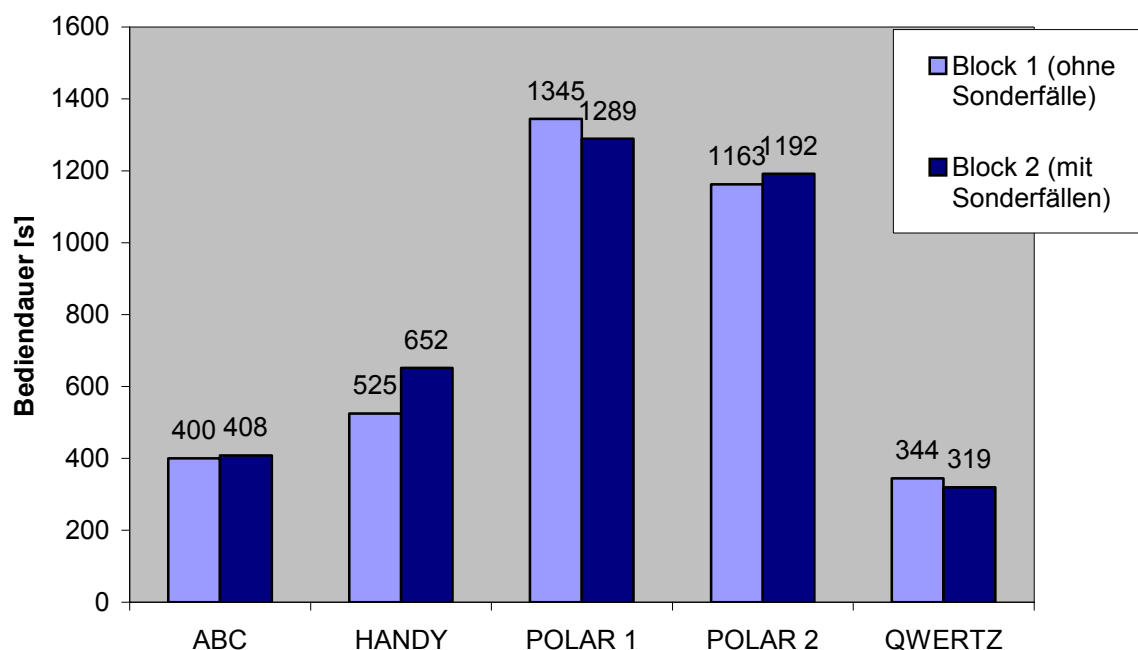
9.6.1 Bediendauer

Die folgende Darstellung zeigt das Gesamtergebnis für die benötigte Bediendauer, die Anzahl Klicks sowie die Fehleingaben für die fünf Spellertypen. Die Angaben entsprechen dabei den über alle Probanden genommenen Mittelwerten.



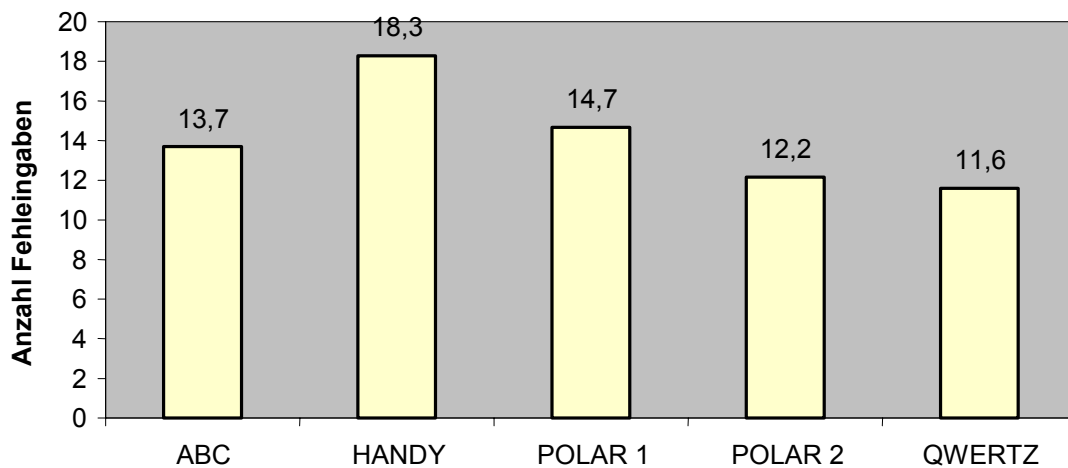
Am deutlichsten sind die Unterschiede hinsichtlich der benötigten Zeit zwischen den als herkömmlich angesehenen Spellertypen und den Neukreationen „Polar 1“ und „Polar 2“. Erwartungsgemäß verzeichnet der klassische, an der 10-Finger-Tastatur orientierte „Qwertz-Speller“ die kürzesten Bearbeitungszeiten für die Eingabeaufgaben. Ihm folgten der „ABC-Speller“ und die vom Telefon bekannte Tastatur. Nach einer einfaktoriel- len Varianzanalyse und anschließend durchgeführten Post-Hoc-Paarvergleichen (Scheffé-Test) lassen sich die fünf Speller in zwei Gruppen unterteilen ($p=.000$). Die beiden polaren Speller sind hierbei hochsignifikant schlechter, was die benötigten Ein- gabezeiten angeht, als die anderen drei Oberflächentypen.

Die folgende Darstellung zeigt den Einfluss der Sonderfälle im zweiten Aufgabenblock auf die Eingabezeiten der fünf Spellertypen. Die größten Veränderungen zeigen sich beim „Handy-Speller“. Durch Einbringen der Sonderfälle, besonders durch die Verwen- dung benachbarter und wiederholter Zeichen, nimmt die Bediendzeit im Mittel um 24 % zu. Über alle Spellertypen ergibt sich ein hochsignifikanter Unterschied bezüglich des Einflusses der veränderten Aufgabenstellung ($p=.000$). Auf die besondere Eignung des „Qwertz-Spellers“ – besonders auch für kompliziertere Zeichenfolgen – weist die Redu- zierung der Eingabezeiten um 7,8 % hin. Der „Qwertz-Speller“, der im Block ohne Son- derfälle bereits die kürzesten Eingabezeiten erzielte, schneidet bei Sonderfällen noch besser ab – „ABC-Speller“ und „Handy-Speller“ verschlechtern sich demgegenüber. Lediglich der „Polar 1“-Speller konnte sich im Vergleich zum ersten Aufgabenblock noch verbessern, während beim „Polar 2“-Speller der Aufgabenblock 2 mit den Sonder- fällen zu einer signifikanten Verschlechterung führte.

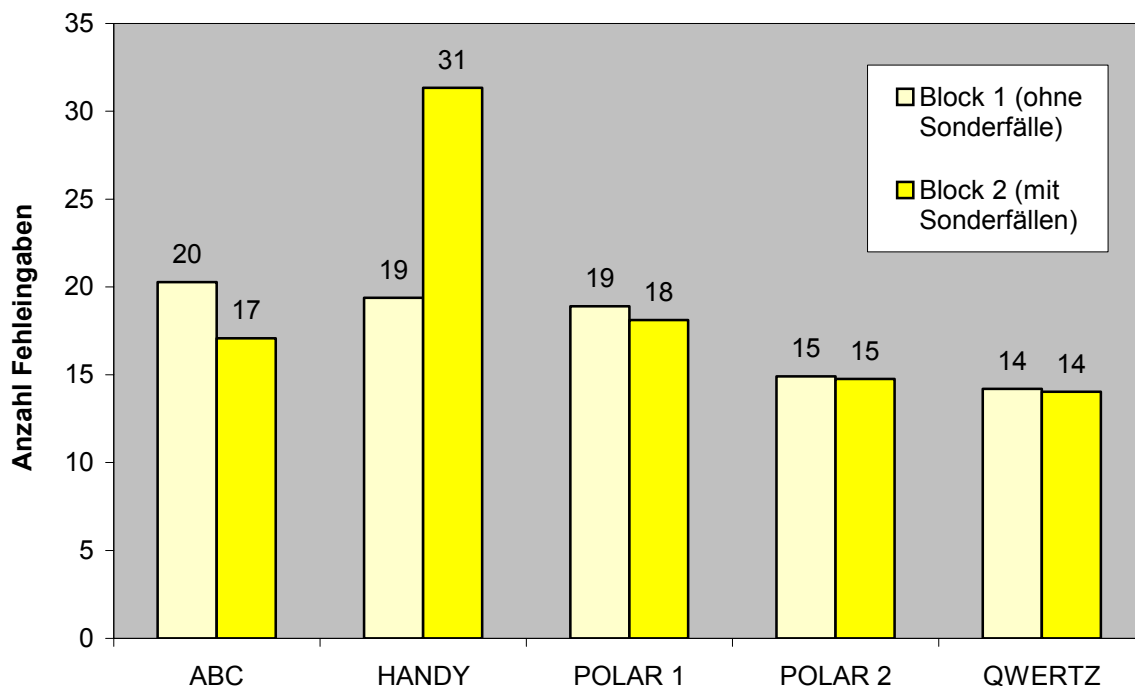


9.6.2 Bedienfehler

Bei der Auswertung der Anzahl von Fehleingaben bildet der „Handy-Speller“ klar das Schlusslicht: Überraschend ist, dass die Zahl der Fehleingaben beim Speller „Polar 2“ mit 11 % unter der des „ABC-Spellers“ liegt und sogar bis auf 5 % an den „Qwertz-Speller“ mit den geringsten Fehleingaben heranreicht. Auch der Speller „Polar 1“ liegt nur 7 % über dem alphabetisch angeordneten. Allerdings waren die Unterschiede der Speller untereinander bezüglich der Fehleranzahl insgesamt nicht signifikant ($p=.052$).



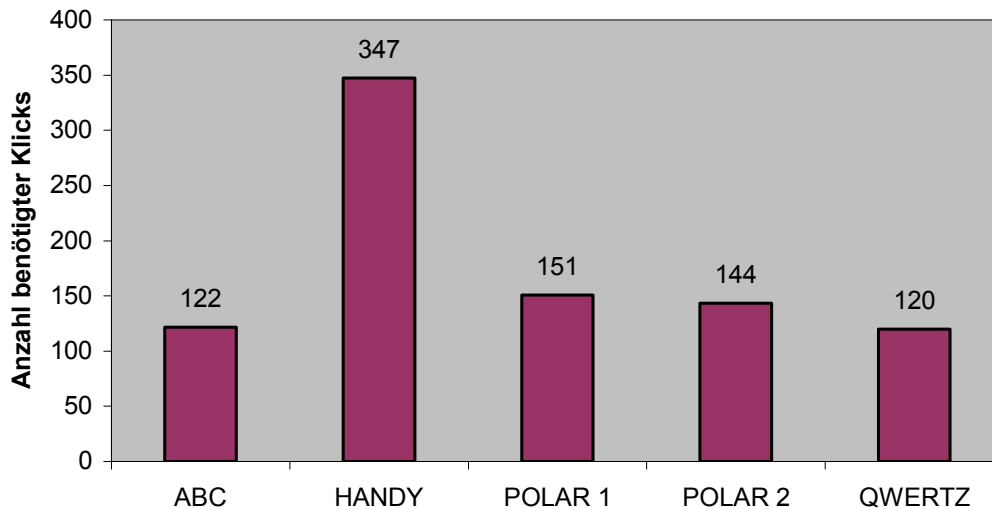
Auch der Einfluss der Sonderfälle auf die Anzahl der Bedienfehler wurde untersucht. Beim „Handy-Speller“ machten sich durch die oben genannten Sonderfälle Verschlechterungen bemerkbar. Ein Unterschied zwischen den beiden Aufgabenblöcken war auch hier nicht signifikant ($p=.247$).



Der Grund für die hohe Zahl an Bedienfehlern beim „Handy-Speller“ ist möglicherweise in der für ihn typischen Art des Umschaltens zwischen den Belegungen einer Taste zu finden. Hier wird speziell bei den Sonderfällen wiederholter und benachbarter Zeichen und Ziffern die Wartezeit des Systems bis zur endgültigen Annahme des eingegebenen Zeichens zum Problem. Werden diese 1,2 sec, in denen das eingegebene Zeichen durch wiederholtes Drücken derselben Taste noch verändert werden kann, nicht abgewartet, so tritt an die Stelle des bis dahin eingegebenen Zeichens ein anderes. Zwar kann man durch „Weiterdrücken“ der Taste vor Ablauf der nächsten Wartezeit das ursprünglich eingegebene Zeichen wiederherstellen und somit einen Fehler (durch Betätigen der Lösch-taste) vermeiden. In der Versuchspraxis wurde diese Option jedoch von den meisten Probanden nicht genutzt, und es wurde eher konventionell (mit der Lösch-taste) vorgegangen. Zur Erfassung jener halben Fehler, die durch „Weiterdrücken“ entstehen, wurde die Messgröße „Klicks“ eingeführt, da die Bedienfehler allein diesen Sachverhalt nicht abzudecken vermögen.

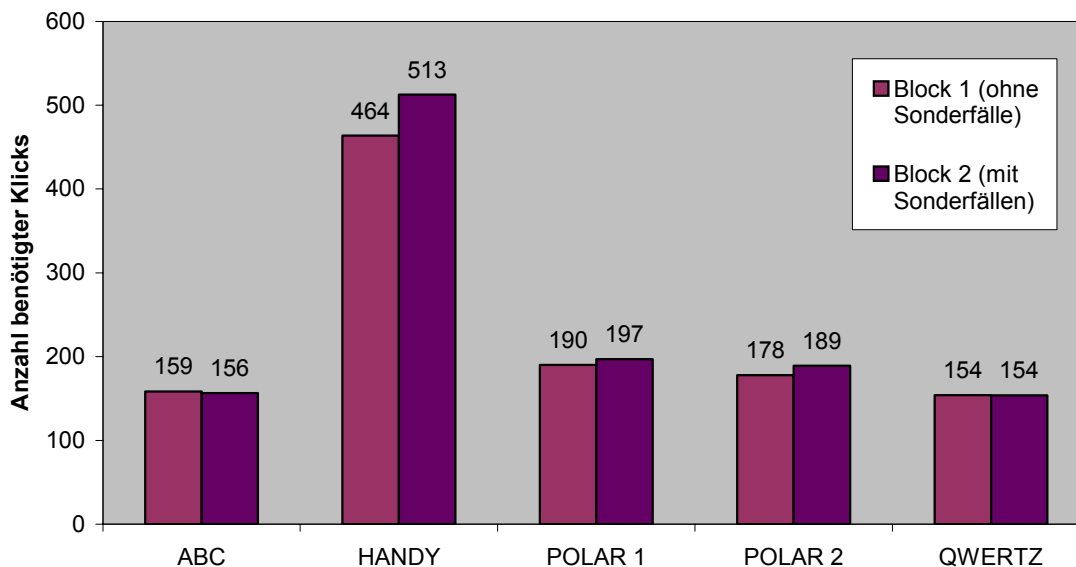
9.6.3 Klicks

Die nächste Abbildung zeigt, wie sich die Spellertypen in der Anzahl der benötigten Klicks zur Aufgabenerfüllung unterscheiden:



Der „Qwertz-Speller“ benötigt die wenigsten Klicks zur Aufgabenbewältigung. Mit nur 1,3 % mehr Klicks folgt ihm der „ABC-Speller“ dicht. Aufgrund seiner speziellen Bedienlogik weist der „Handy-Speller“ wesentlich mehr Klicks auf als die beiden polaren Speller, welche um nur 5 % auseinander liegen. Die einfaktorielle Varianzanalyse und Post-Hoc-Paarvergleiche (Scheffé-Test) zeigen erwartungsgemäß, dass der „Handy-Speller“ signifikant schlechter als die anderen Typen abschneidet ($p=.000$). Zwischen jenen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Ein Grund hierfür ist, wie oben beschrieben, in der Bedienlogik der Telefontastatur zu finden. Die Zahl der Klicks kann sich zudem noch durch das bereits erwähnte „Weiterdrücken“ erhöhen.

Auch der Einfluss der Sonderfälle auf die Anzahl an Klicks wurde untersucht. Beim „Handy-Speller“ machten sich durch die oben genannten Sonderfälle Verschlechterungen bemerkbar, wie die folgende Darstellung zeigt.

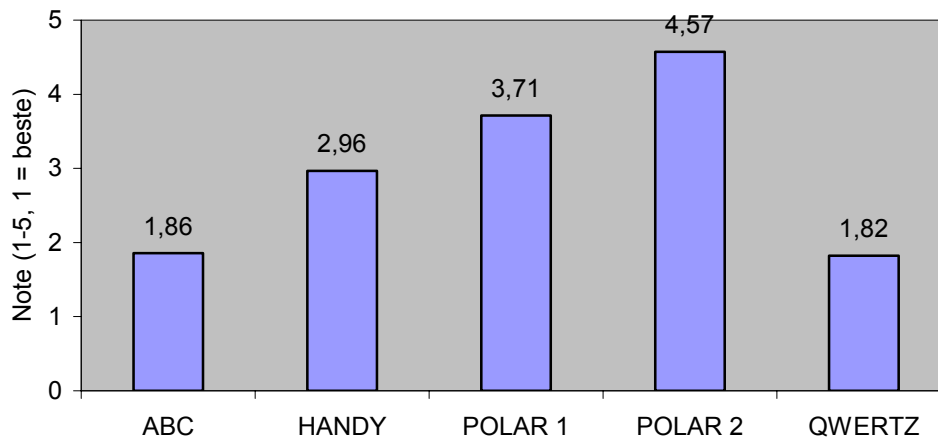


Die Zunahme der Anzahl an Klicks durch den Einsatz des Aufgabenblocks mit den Sonderfällen ist beim „Handy-Speller“ hochsignifikant ($p=.000$). Dies belegt, dass die „Handy“-Oberfläche auf unregelmäßige Zeichenfolge empfindlicher reagiert als die anderen Speller. Für weitere Untersuchungen wäre interessant, ob sich Kriterien finden

lassen, nach denen sich Eingabeaufgaben differenzieren lassen und die in den Messgrößen signifikante Unterschiede bewirken können.

9.6.4 Subjektive Bewertung

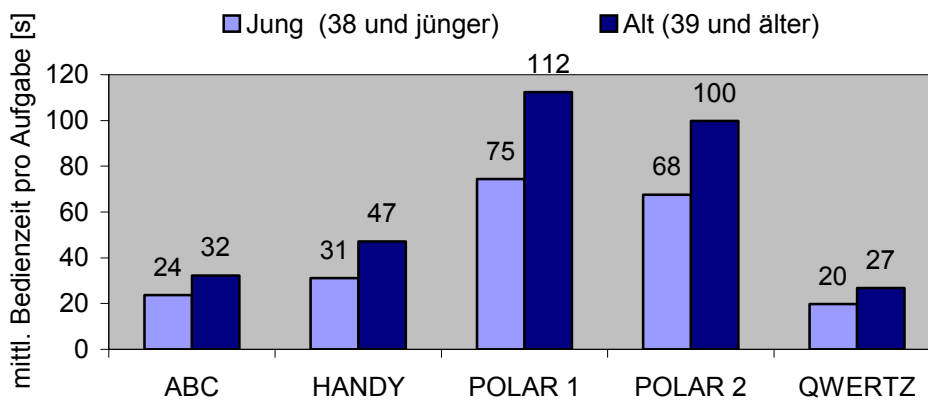
Die folgende Darstellung zeigt das Ergebnis der nach dem Versuch gestellten Frage, welcher Spellertyp subjektiv am besten gefalle:



Man sieht, dass die Ergebnisse für die benötigten Zeiten sich auch im subjektiven Urteil der Versuchsteilnehmer widerspiegeln. Der „Qwertz-Speller“ wurde knapp vor dem „ABC-Speller“ als subjektiv am gefälligsten beurteilt. Deutlicher als bei der Zeitnahme fällt hier der „Handy-Speller“ gegen die beiden Führenden ab. Er liegt etwa in der Mitte des Spektrums und hält die polaren Speller – wenn auch nicht so deutlich wie bei den Eingabezeiten – auf Distanz. Diese sind wie auch bei den gemessenen Zeiten deutlich schwächer bewertet als die herkömmlichen Typen. Hauptgrund hierfür könnte der zeitintensive Zugriff auf den zweiten, alternativen Zeichensatz in einer anderen Ebene sein. Abweichend vom Ergebnis der Zeitnahme im Versuch ist hier, dass in der subjektiven Beurteilung der „Polar 1“-Speller mit der konzentrischen („Explosions-“) Anordnung besser bewertet wurde als „Polar 2“. Dies mag an der konsistenteren Art der Zeichenanordnung als beim Pendant liegen. Die abweichenden Ergebnisse im Versuch vermögen diese These aber nicht zu bestätigen. Die Varianzanalyse ergibt hochsignifikante Unterschiede zwischen den Spellertypen ($p=.000$). Eine genauere Analyse anhand von Post-Hoc-Paarvergleichen (Scheffé-Test) zeigt, dass sich zwei Gruppen von Spellertypen signifikant unterscheiden: Der „Qwertz“- und der „ABC-Speller“ schneiden besser ab als die anderen. Dies mag im Falle der „Handy“-Oberfläche auch am hohen Anteil älterer und solcher Personen liegen, die mit der Alphanumerischen Eingabe über Telefonataturen nicht vertraut sind. Die polaren Speller kommen wegen ihrer unkonventionellen Zeichenanordnung und der geringen Erfahrung der Vpn im Umgang mit diesen Spellern (was in Bezug auf die Alphanumerische Eingabe besonders relevant erscheint), nicht an die beiden Spitzenreiter heran.

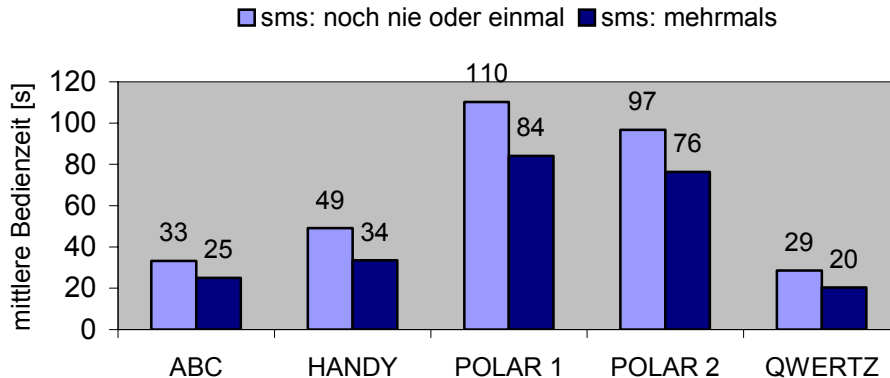
9.6.5 Demographische Merkmale

Die durch den Fragebogen erfassten Daten zu den demographischen Merkmalen wurden auf Unterschiede bei den Bedienzeiten der einzelnen Spellertypen untersucht. Besonders wurden hierbei das Alter und die Erfahrung im Umgang mit der Kommunikation über SMS (Short Message Service) beleuchtet. Die Abbildung auf der nächsten Seite zeigt den Effekt, den das Alter auf die benötigten Eingabezeiten hat.



Hierzu wurden die Vpn nach dem Alter so aufgeteilt, dass sich zwei gleich große Gruppen ergaben. Die Unterscheidung erfolgte anhand des „Grenzalters“ 39, wobei die 39-Jährigen der älteren Gruppe zugeordnet wurden. Es ergaben sich in allen Fällen hochsignifikante Differenzen in den Bedienzeiten ($p=.000$ bzw. $p=.001$). Die mit 36 % geringsten fielen auf die Spellertypen „ABC“ und „Qwertz“. Bei den Varianten „Handy“ und „Polar 1“ benötigte die ältere Gruppe im Mittel 51 % mehr Zeit zur Erfüllung der Eingabeaufgabe. Auch beim Speller „Polar 2“ brauchten die Versuchspersonen über 38 Jahren 48 % länger zur Eingabe.

Die nächste Abbildung zeigt, wie sich die Erfahrung im Umgang mit der SMS-Funktionalität auf die Bedienzeiten bei der Abarbeitung der gestellten Aufgaben auswirkt. Über alle Spellertypen hinweg zeigt sich ein signifikanter Unterschied ($p=.029$ bis $p=.000$). Die erfahrenere Gruppe erledigt die Aufgaben im Mittel um 24,7 % schneller als jene Probanden, die keine Praxis in dieser Eingabemöglichkeit haben. Mit 31,6 % nehmen die Bedienzeiten erwartungsgemäß am deutlichsten beim „Handy-Speller“ ab.



Beim „Handy-Speller“ macht sich die SMS-Erfahrung nicht wesentlich stärker bemerkbar als bei den anderen Spellertypen. Diese Tatsache legt die Vermutung nahe, dass die Erfahrung mit SMS eher allgemein für die Fertigkeit im Umgang mit modernen Benutzerschnittstellen spricht. Diese Fertigkeit erschöpft sich nicht nur in der Bedienung von Modalitäten, die mit dem „Handy-Speller“ oder Telefontastaturen vergleichbar sind, sondern gilt für weiter gesteckte Bereiche von zeitgemäßen Arbeitsumgebungen.

Bezüglich der Fehleranzahl konnte über die fünf Spellertypen weder beim Alter noch bei der SMS-Erfahrung ein signifikanter Effekt notiert werden.

9.7 Diskussion

Wie die vorliegenden Ergebnisse zeigen, konnte ein signifikanter Unterschied bezüglich der Bediendauer zwischen den Spellervarianten nachgewiesen werden. Eine genauere

Betrachtung anhand von Post-Hoc-Paarvergleichen mit dem Scheffé-Test zeigt aber, dass sich letztendlich nur die Eingabeoberflächen mit polarer Anordnung signifikant von den übrigen drei Varianten unterscheiden. Dies scheint zu belegen, dass derart neuartige Ansätze zur Zeichenanordnung in der Praxis kaum mit den gängigen Tastaturtypen mithalten können, auch wenn durch Messwiederholungen im Versuchsablauf versucht wurde, Übungseffekte zu minimieren. Den lange gewachsenen Erfahrungs- und Gewohnheitsvorsprung vermag dieses Vorgehen nicht auszuklammern. Bezüglich Bedienfehlern und benötigten Klicks konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Ein weiteres interessantes Ergebnis stellt das signifikant schlechtere Abschneiden des „Handy-Spellers“ bezüglich Bedienfehler und benötigter Klicks dar. Dies zeigt, dass die hierbei verwendete Bedienlogik mit Mehrfachbelegungen bei vielen Vpn zu Problemen führte.

Eine Auswertung nach demographischen Merkmalen wie Alter und SMS-Erfahrung ergab hochsignifikante Unterschiede bezüglich der Bediendauer. Allerdings konnte hierbei keine Sonderrolle des „Handy-Spellers“ nachgewiesen werden. Vielmehr benötigen sowohl jüngere Vpn als auch Probanden mit SMS-Erfahrung über alle Spellervarianten hinweg signifikant weniger Zeit für die Aufgabenbearbeitung als die übrigen Vpn. Die Hypothese, dass eine Veränderung der Eingabeaufgaben hin zu bestimmten Sonderfällen in den Eingabeaufgaben Nachteile mit sich bringt, konnte mit hochsignifikanten Unterschieden bestätigt werden. Auch hier erwies sich der „Qwertz-Speller“ als resistent, der „ABC-Speller“ dagegen als besonders anfällig.

Die Auswertung der subjektiven Urteile der Vpn zeigt, dass diese sehr gut mit den gemessenen objektiven Daten, im Speziellen der Bediendauer, korrelieren.

9.8 Schlussfolgerung

Wie erwartet, zeigten sich für den „Qwertz-Speller“ bezüglich aller drei abhängigen Variablen sowie der subjektiven Urteile insgesamt die besten Ergebnisse. Zwar ergaben sich keine signifikanten Vorteile etwa gegenüber dem „ABC-Speller“, dennoch kann das Ergebnis dahingehend interpretiert werden, dass es sich beim „Qwertz-Speller“ um diejenige Eingabeoberfläche handelt, die für Alphanumerische Eingaben mit einem aktiven haptischen Joystick am besten geeignet ist. Aus diesem Grund wurde für weitere Entwicklungen im Rahmen dieser Arbeit der „Qwertz-Speller“ als Oberfläche für Alphanumerische Eingaben ausgewählt.

10 Vergleich von variabler Haptik und konstanter Haptik in einem Simulatorexperiment

10.1 Einleitung

Nachdem in den vorangegangenen vier Untersuchungen zahlreiche Vorarbeiten geleistet wurden, soll in diesem Experiment die generelle Fragestellung dieser Arbeit beleuchtet werden. In den bisherigen Untersuchungen konnten zahlreiche Erkenntnisse über die haptische Gestaltung (Kapitel 6 und 7), aber auch über die Bedienoberfläche (Kapitel 9) bei der Verwendung eines aktiven haptischen Joysticks gewonnen werden. Des Weiteren ergab der Vergleich mit einem Schieberegler, dass der Joystick das insgesamt bessere Element für die Bedienung eines Fahrerinformationssystems ist (Kapitel 8). Im folgenden Experiment soll also nun der Joystick mit frei programmierbarer variabler Haptik mit einem Joystick mit konstanter Haptik verglichen werden, um zu überprüfen, ob die stärkere Verwendung des haptischen Sinneskanals bei der Interaktion mit einem Fahrerinformationssystem die erwünschten positiven Effekte mit sich bringt (vgl. Abschnitt 4.3).

Wie in Kapitel 8 schon ausführlich beschrieben wurde, lassen sich für den aktiven haptischen Joystick spezielle Haptiken für einzelne Bedienungsaufgaben programmieren. Es handelt sich hierbei um eine wesentliche Frage dieser Arbeit, ob aus ergonomischer Sicht eine sich verändernde Haptik Vorteile gegenüber einem Bedienelement mit konstanter Haptik hat. So kann man sich durchaus auch vorstellen, dass ein Joystick, der sich immer gleich anfühlt und sich zu jedem Zeitpunkt in gleicher Weise bedienen lässt, Vorteile im Hinblick auf eine Blindbedienung und somit auf die resultierende Ablenkungswirkung hat. Es wird die Frage sein, ob dadurch die vermuteten Vorteile einer an die einzelnen Bedienungsaufgaben angepassten und optimierten Haptik aufgewogen werden. Des Weiteren sind die beiden Bedienelemente aufgrund ihrer Konstruktion und der Art und Weise, wie die Betätigungshaptik erzeugt wird, grundverschiedenen. Somit erhofft man sich durch die folgende Untersuchung auch generelle Aussagen über den Reifegrad und die Einsatzmöglichkeiten aktiver haptischer Bedienelemente für die Interaktion mit Fahrerinformationssystemen.

10.2 Zielsetzung und Fragestellung

Im folgenden Experiment soll ein aktiver haptischer Joystick mit variabler Haptik mit einem passiven konventionellen Joystick mit konstanter Haptik verglichen werden. Dabei soll zunächst im ersten Teil der Untersuchung überprüft werden, ob einzelne Bedienungsaufgaben während der Fahrt mit variabler Haptik schneller und fehlerfreier zu bedienen sind als mit konstanter Haptik. Die einzelnen Bedienungsaufgaben sind Menüauswahl, Buchstabeneingabe mit Listenauswahl und Zieleingabe über Karte.

Im zweiten Teil der Untersuchung soll die Ablenkungswirkung der beiden Bedienarten erfasst und verglichen werden. Dies soll dadurch geschehen, dass mit beiden Joysticks umfassende Bedienungsaufgaben innerhalb eines Navigationssystems während der Fahrt bearbeitet werden sollen. Des Weiteren soll geklärt werden, ob bei der Bedienart mit geringerer Ablenkung zusätzlich eine höhere Anzahl Bedienungsaufgaben bearbeitet werden kann oder ob ein Vorteil auf Kosten eines anderen geht.

Es soll dabei die Frage überprüft werden, ob bei der Bearbeitung mit variabler Haptik die Blickabwendung geringer und die Fahrzeugführung besser ist als mit konstanter Haptik. Die Fahrzeugführung erfordert die ständige Erfüllung der Teilaufgaben der Spurhaltung und der Geschwindigkeitsregulierung. Sie sind somit auch die Leistungsindikatoren für die Güte der Fahrzeugführung. Neben der Geschwindigkeitsregulierung stellt die Spurhaltung aufgrund ihres hohen zeitlichen Anteils und ihrer Kontinuität eine Handlung dar, die die Güte des Tätigkeitskomplexes Fahrzeugführung widerspiegelt [SCHATTENBERG, 2002]. Die Güte der Spurhaltung wurde in empirischen Untersuchungen bisher über unterschiedliche Parameter operationalisiert. REED ET AL. (1999) liefern eine Zusammenfassung unterschiedlicher Parametrisierungsmöglichkeiten. Als Gütemaß für die Spurhalteleistung wurden sowohl Spurpositionsgrößen als auch Lenkwinkelgrößen in die Analyse miteinbezogen.

10.3 Hypothesen

Entsprechend den für die zwei Versuchsteile getrennt formulierten Fragestellungen werden auch die Hypothesen separat aufgestellt. So wird für den ersten Teil der Untersuchung angenommen, dass die zwei Bedienarten sich im Hinblick auf die abhängigen Variablen Bediendauer und –fehler sowie auf deren subjektive Bewertungen durch die Probanden in Abhängigkeit von den drei Bedienaufgaben unterscheiden. Für die einzelnen Bedienaufgaben wird Folgendes vermutet:

- **Menüauswahl:** Wahrscheinlich wird der Joystick mit konstanter Haptik bei dieser Bedienaufgabe deutliche Vorteile gegenüber dem Joystick mit variabler Haptik haben. So verfügt der passive konventionelle Joystick über eine präzise Führungskulisse und einen langen Bedienweg (vgl. Abschnitt 10.4.2.2), was eine Differenzierung der Bedienrichtungen sehr gut ermöglicht. Bei dem aktiven haptischen Joystick werden die Kräfte zur Differenzierung der Bedienrichtungen über Elektromotoren aufgebracht. Die daraus resultierenden Kulissenkräfte können – zumindest beim heutigen Stand der Technik – nur von begrenzter Qualität sein.
- **Buchstabeneingabe mit Listenauswahl:** Bei dieser Bedienaufgabe müsste der Joystick mit variabler Haptik durch die mit ihm realisierte direkte Cursorpositionierung Vorteile gegenüber sequentiellm Auslenken bezüglich der benötigten Bediendauer haben. Andererseits ist eine positionsabhängige Buchstabeneingabe motorisch anspruchsvoller. Somit kann es zu einer höheren Zahl an Bedienfehlern gegenüber der sequentiellen Bedienung bei konstanter Haptik kommen.
- **Zieleingabe über Karte:** Es wird angenommen, dass der Joystick mit variabler Haptik bei dieser Bedienaufgabe eindeutige Vorteile gegenüber konstanter Haptik besitzt. So müsste es weit schneller gehen, mittels direkter Cursorpositionierung einen gewünschten Kartenpunkt auszuwählen, als den Cursor durch konstantes Auslenken zu verfahren.

Wie bereits erwähnt, liegt der Fokus im zweiten Teil der Untersuchung auf der Erfassung der Ablenkungswirkung. Hierzu werden mittels eines Blickerfassungsgeräts die Blickhäufigkeit und –dauer aufgezeichnet. Es wird vermutet, dass die Probanden bei Bedienung mit variabler Haptik weniger häufig und lang auf das Zentraldisplay schauen als bei konstanter Haptik. Als Erklärung für diese Hypothese dient folgender Sachverhalt: Die wesentliche Eigenschaft variabler Haptik ist, dass hierbei die Haptik des Bedienelements sich ändert und sich automatisch an einzelne Bedienaufgaben anpasst. Es wird vermutet, dass dies eine insgesamt schnellere Bedienung ermöglicht. Des Weiteren wird angenommen, dass durch die zusätzliche haptische Informationsrückmel-

dung der Blickzuwendungsbedarf auf das Zentraldisplay sich reduziert und dadurch der optische Sinneskanal entlastet wird.

Ein ähnliches Ergebnis wird auch für die Fahrdaten erwartet. Durch die geringere Ablenkungswirkung wird vermutet, dass das Spurhaltevermögen der Probanden bei Bedienung mit variabler Haptik besser ist als bei konstanter Haptik. Die Messgrößen Geschwindigkeit und Standardabweichung des Lenkwinkels und der Querabweichung sollen diese Hypothese bestätigen.

Des Weiteren wird angenommen, dass aufgrund der vermuteten schnelleren Bedienung mit variabler Haptik dort auch die Anzahl bearbeiteter Aufgaben größer ist.

Andererseits ist der Joystick mit variabler Haptik ein unbekanntes Bedienelement. Wohl kaum eine Vp wird bereits Erfahrung mit einem Bedienelement mit veränderlicher Haptik haben. Trotz Instruktionen und Eingewöhnung im ersten Versuchsteil könnte dies auf die Vpn irritierend wirken, was zu einer höheren Ablenkungswirkung führen könnte.

Spannend wird zu sehen sein, inwieweit die subjektiven Bewertungen der Vpn mit den objektiven Messgrößen übereinstimmen. Es ist die Frage, ob es - wie in den letzten Untersuchungen - zu einer relativ guten Übereinstimmung kommt oder ob der unterschiedliche Bekanntheitsgrad der beiden Bedienarten zu gegenläufigen Ergebnissen führt.

10.4 Methode

10.4.1 Stichprobe

Die Stichprobe bestand aus 30 Personen. Sowohl das mittlere Alter als auch die Spannweite des Alters ist relativ groß. Dies führt dazu, dass die Stichprobe die Grundgesamtheit gut repräsentiert. Bezüglich Geschlecht und Alter setzte sich die Stichprobe wie folgt zusammen:

Vpn	Männlich	Weiblich	Jüngste Vp	Älteste Vp	Mittleres Alter
30	18	12	21	52	36

Um sicherzustellen, dass den Vpn der Joystick mit variabler Haptik vor dem Versuch noch gänzlich unbekannt war, wurden bei dieser Untersuchung ausschließlich externe Vpn akquiriert.

Auf die Frage, wie oft sie ein Navigationssystem im Fahrzeug nutzen, antworteten 20 Vpn, dass sie noch nie ein Navigationssystem benutzt haben. 8 Personen benutzen selten ein Navigationssystem, nur 2 Vpn benutzen es mehrmals in der Woche. Die Stichprobe ist also insgesamt sehr unerfahren im Umgang mit Navigationssystemen, was aber momentan sicherlich noch relativ gut dem Durchschnitt der Bevölkerung entspricht.

12 Personen hatten schon einmal an einem Experiment im Fahrsimulator teilgenommen, 4 Vpn schon mehrmals. 14 Personen hatten dagegen noch überhaupt keine Erfahrung mit Fahrsimulatoren. Dadurch ist gewährleistet, dass die Stichprobe keine zu große Erfahrung mit dem Fahren im Simulator aufweist. Bei Personen, die schon oft in einem Fahrsimulator gefahren sind, ist die Beanspruchung durch die Hauptaufgabe häufig so gering, dass sie sich zu stark auf die Nebenaufgabe konzentrieren können.

10.4.2 Hardware

10.4.2.1 Joystick mit variabler Haptik

Der in der Untersuchung verwendete aktive haptische Joystick wurde bereits in den vorangegangenen Experimenten verwendet und dort ausführlich beschrieben. Als Bedieneinsatz wurde der in dem Experiment „Vergleich eines aktiven haptischen Joysticks und eines aktiven haptischen Schiebepfeilers“ bekannte achteckige Bedieneinsatz mit integriertem Drucktaster verwendet.

Gegenüber der letzten Untersuchung neu hinzugekommen ist eine Zurück-Taste (schwarze Taste auf dem Joystickgehäuse). Diese Taste wird benötigt, um in dem Navigationssystem einfach und bequem einen Schritt zurückzukommen.



Abbildung 10.1: Haptischer Joystick mit Zurück-Taste

10.4.2.2 Joystick mit konstanter Haptik

Der Joystick mit konstanter Haptik basiert auf einem speziell von der Fa. Grayhill angefertigten Prototyp (s. Abbildung rechts). Der Joystick zeichnet sich dadurch aus, dass sowohl die Geometrie als auch die Auswahl der Bauteile so erfolgte, dass die resultierenden haptischen Eigenschaften den Werten entsprechen, welche in der „Untersuchung zu den haptischen Eigenschaften eines aktiven haptischen Joysticks“ am besten abschnitten. Dies resultiert in einem maximalen Auslenkwinkel von $17,5^\circ$, einer Joysticklänge von 58 mm sowie in der entsprechenden Position eingebauten Drucktaster von 4,5N. Die Kulisse des Joysticks wurde so gestaltet, dass die Differenzierung von acht Betätigungsrichtungen möglichst gut unterstützt wird.

Der Joystick wurde in ein schwarzes Gehäuse eingebaut, das den Abmessungen des Joysticks mit variabler Haptik entspricht. Wie die rechte Abbildung zeigt, sind die zwei Joysticks somit rein äußerlich nahezu identisch. Die Box war groß genug, um den benötigten Mikrocontroller im Gehäuse unterzubringen. Die Datenübertragung zum Versuchsrechner erfolgt über ein serielles Kabel. Ebenfalls wie beim Joystick mit variabler Haptik wurde hier auch eine zusätzliche Zurück-Taste integriert.

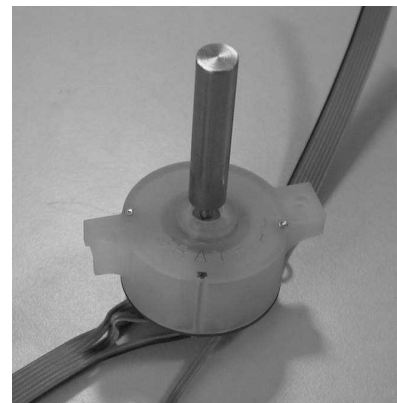


Abbildung 10.2: Joystick mit konstanter Haptik

10.4.3 Software

Die in dieser Untersuchung verwendeten Anwendungen wurden wieder in einer offenen C++-Umgebung programmiert. Die für die Erzeugung der variablen Haptik verwendeten Force-Feedback-Effekte wurden ebenfalls wieder durch die Immersion Foundation Classes der Fa. Immersion erzeugt. Durch die Programmierung der Haptikeffekte als dynamische Zeiger konnte eine sich in Abhängigkeit der Bildschirmoberfläche verändernde Haptik realisiert werden. Dadurch werden zunächst alle im Hardwarespeicher des Joysticks geladenen Haptikeffekte gelöscht. Bei der bis dahin praktizierten Programmierweise kam es zu einem Überlaufen des Hardwarespeichers, was sich am Joystick in einer undefinierbaren Überlagerung mehrerer Haptikeffekte bemerkbar machte.

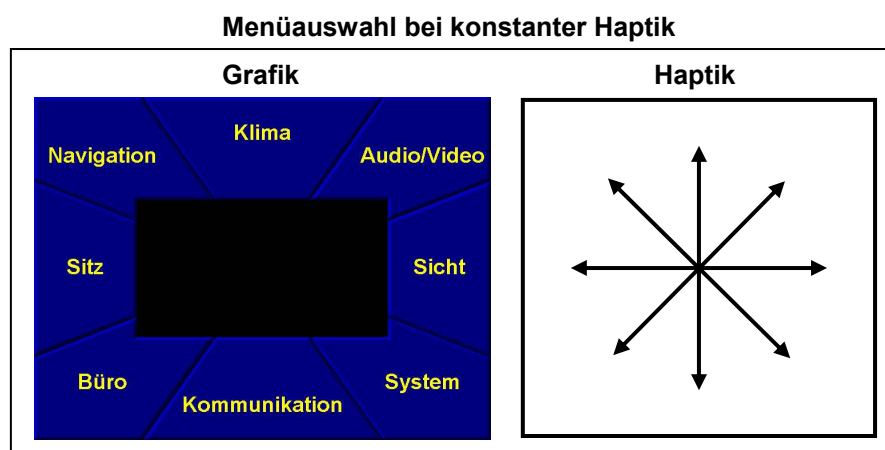
Eine Beschreibung der in der Untersuchung verwendeten Software soll anhand der zwei Versuchsteile erfolgen.

10.4.3.1 Teil 1: Separate Analyse einzelner Bedienungsaufgaben

Neben den drei Interaktionsaufgaben Menüauswahl, Listenauswahl und Alphanumerische Eingabe aus der letzten Untersuchung kommt noch die Interaktionsaufgabe Zieleingabe über Karte hinzu. Um den Realitätsgrad zu steigern, wird die Listenauswahl mit der Alphanumerischen Eingabe verknüpft. Die zwei Bedienarten werden somit wieder anhand von drei Bedienungsaufgaben verglichen, welche im Folgenden beschrieben werden:

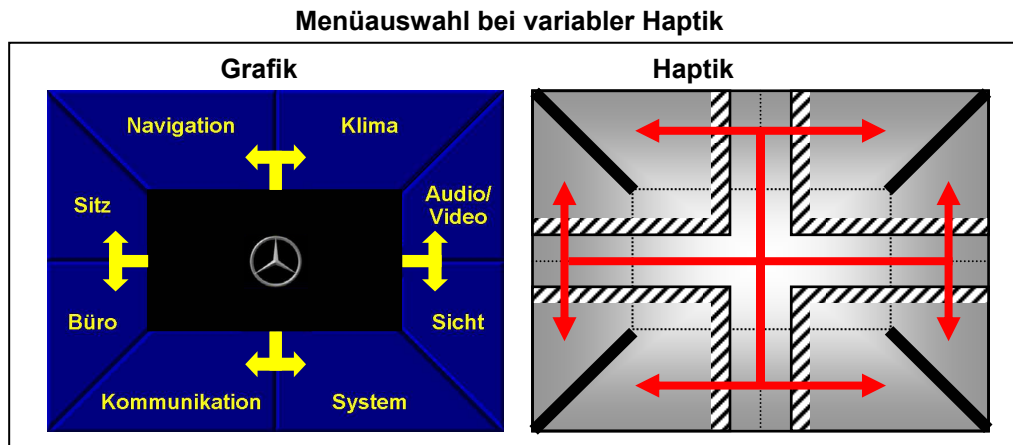
Menüauswahl

Diese Bedienungsaufgabe unterscheidet sich leicht für die zwei Bedienarten. Wie in Abschnitt 10.4.2.2 beschrieben, lässt sich der Joystick mit konstanter Haptik in acht Richtungen auslenken. Es bietet sich also an, für diese Bedienart die schon aus der vorangegangenen Untersuchung bekannte Bildschirmoberfläche zu verwenden, bei der die acht Menüfelder konzentrisch angeordnet sind. Durch Auslenken in eine der acht Richtungen kann das entsprechende Feld ausgewählt werden:



Bei der Bedienart variable Haptik entschied man sich im Rahmen einer Expertenbewertung für die Variante, die auf der nächsten Seite abgebildet ist. Sie erlaubt die Auswahl von acht Menüfeldern auf Basis der vier Grundrichtungen. Um bei dieser Variante ein Menüfeld auszuwählen, muss der Joystick also zunächst in eine der vier Grundrichtungen ausgelenkt werden. Die zwei entsprechenden Menüfelder sind dann gehighlightet

dargestellt. In einem weiteren Schritt muss man dann den Stick noch kurz nach links/rechts bzw. oben/unten drücken, um das gewünschte Feld auszuwählen. Anschließend zentriert eine auf dem gesamten Auslenkbereich wirkende Federkraft den Stick wieder. Die Kulissenkräfte zur Differenzierung der vier Grundrichtungen (schraffierte Balken in der Abbildung) sind dabei so programmiert, dass zwar bei Überschreiten von innen nach außen eine starke Gegenkraft gespürt wird (als Führungskräfte bzw. als Druckpunkt während des zweiten Interaktionsschrittes), dass aber in der Gegenrichtung, d. h. bei der Rückstellung, keine Kraft aktiv ist.



Die Variante hat u. a. den Vorteil, dass auf die Bedienung in Richtung der Diagonalen verzichtet werden kann. Dies hatte sich in der vorletzten Untersuchung als schwer bedienbar herausgestellt. Der Nachteil dieser Lösung liegt u. a. in dem zusätzlichen Bedienschritt.

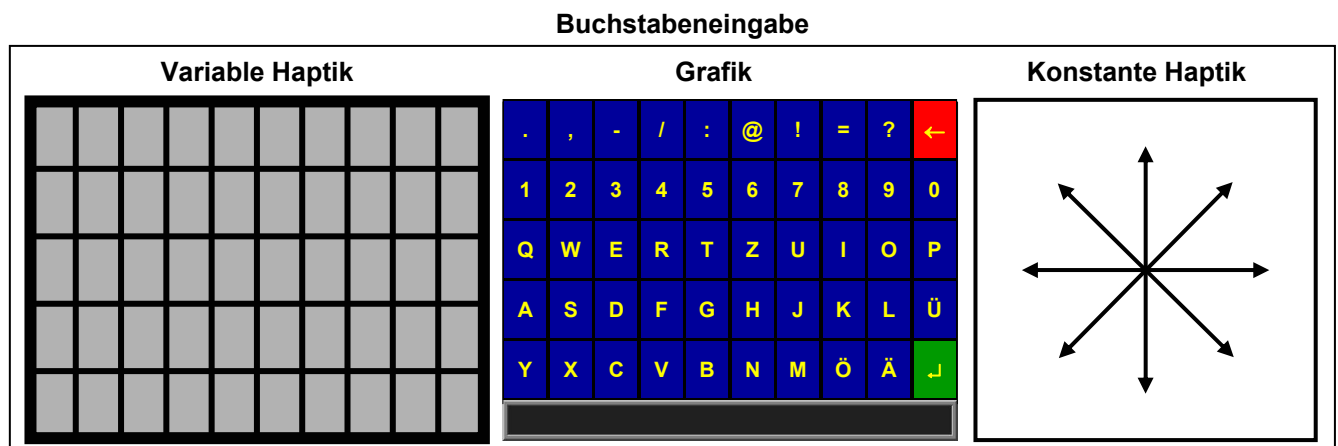
Wie in der vorletzten Untersuchung erfolgte die Ansage, welches Menüfeld auszuwählen ist, wieder über Sprachausgabe. Nach erfolgter Auslenkung bekamen die Vpn wieder eine visuelle Rückmeldung, welches Menüfeld sie tatsächlich ausgewählt hatten.

Buchstabeneingabe mit Listenauswahl

Die Bildschirmoberfläche für die Buchstabeneingabe wurde aufgrund der Ergebnisse des experimentellen Vergleichs von Oberflächenvarianten zur Alphanumerischen Eingabe mit einem aktiven haptischen Joystick umgestaltet. Der Buchstabenanordnung liegt nun eine „Qwertz“-Anordnung zugrunde. In den unteren drei Zeilen sind die Buchstaben angeordnet, darüber befinden sich die Ziffern, in der obersten Zeile sind die Satzzeichen platziert. Des Weiteren wurden die Zurück-Taste (Korrektur eines eingegebenen Zeichens) in der rechten oberen Ecke und die Return-Taste (Sprung in die Liste) in der rechten unteren Ecke angeordnet. Dies ermöglicht ein direktes Anfahren der Tasten auf Anschlag bei variabler Haptik. Die Bildschirmoberfläche ist für beide Bedienarten identisch.

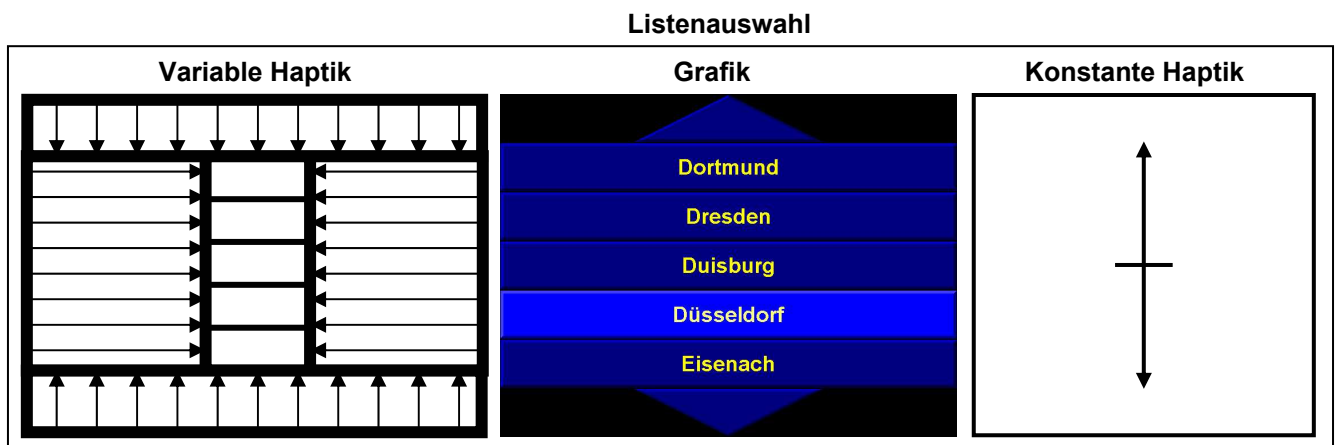
Wie wird nun bei den beiden Bedienarten der Cursor bewegt? Mit dem Joystick mit konstanter Haptik kann durch Auslenken in eine der acht Richtungen der Cursor um jeweils ein Feld verschoben werden. Um den Cursor um mehrere Felder zu verfahren, muss der Joystick entweder mehrfach sequentiell ausgelenkt werden, oder man kann ihn in die entsprechende Richtung gedrückt halten, um ihn kontinuierlich zu verfahren. Der Joystick mit variabler Haptik ermöglicht eine direkte Cursorpositionierung, d. h. das gewünschte Buchstabenfeld ist direkt anwählbar (die Funktionsweise wurde bereits in den letzten Untersuchungen beschrieben). Das haptische Raster wurde entsprechend der neuen grafischen Oberfläche auf fünf Zeilen und zehn Spalten angepasst. Die

Auswahl eines Buchstabens erfolgt schließlich wieder durch Drücken des Drucktasters. Die folgende Abbildung verdeutlicht die grafische und haptische Gestaltung der Buchstabeneingabe bei beiden Bedienarten:



Als wesentliche Weiterentwicklung gegenüber der Version in den letzten Untersuchungen werden nun nach einer erfolgten Buchstabenauswahl automatisch diejenigen Zeichen ausgeblendet, die für die Eingabe nicht mehr zur Verfügung stehen, d. h. es sind nur noch diejenigen Buchstaben aktiv, für die ein Eintrag in der zugrunde liegenden Orts-/Straßenliste vorhanden ist. Diese Weiterentwicklung wird für beide Bedienarten verwendet und stellt eine grundlegende Verbesserung der Alphanumerischen Eingabe dar.

Wie bereits erwähnt, erfolgt durch Auswahl der Return-Taste der Sprung in die Orts-/Straßenliste. Die Bildschirmoberfläche mit fünf Einträgen pro Bildschirmseite wurde aus der vorletzten Untersuchung übernommen und ist ebenfalls für beide Bedienarten gleich:

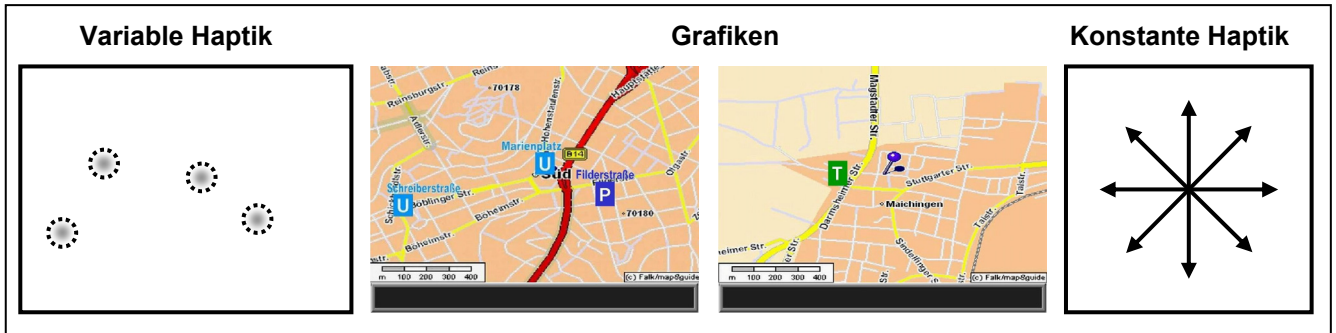


Die Bedienung erfolgt analog. Mit dem Joystick mit konstanter Haptik kann durch Drücken nach oben oder unten der Cursor um jeweils einen Eintrag verschoben werden. Bei dem Joystick mit variabler Haptik existieren fünf Rasterpunkte, die direkt angefahren werden können. Die dabei verwendete Haptik wurde bereits im Rahmen der vorletzten Untersuchung beschrieben. Sie wurde jedoch speziell dahingehend optimiert, dass das Blättern auf die nächste Listenseite über den oberen und unteren Pfeil sowie die Stabilität der Rasterstellungen deutlich verbessert wurde. Die abschließende Auswahl eines Eintrags erfolgt ebenfalls bei beiden Bedienarten durch Drücken des Drucktasters.

Zieleingabe über Karte

Die Bildschirmoberfläche bei dieser BediENAufgabe, die für beide Bedienarten dieselbe ist, besteht im Wesentlichen aus einem dargestellten Kartenausschnitt und einem Anzeigefeld. Dort wird der Straßennamen angezeigt, auf welcher sich der Cursor momentan befindet. Dies erfolgt über die Definition sensitiver Flächen auf der Karte. Für die Untersuchung wurden dazu zwei Beispiel-Anwendungen realisiert:

Zieleingabe über Karte



Die Auswahl eines Zielpunkts auf der Karte erfolgt mit den beiden Bedienarten nun folgendermaßen: Mit dem Joystick mit konstanter Haptik kann durch Gedrückt-Halten des Sticks in eine Richtung der Cursor kontinuierlich verfahren werden. Bei variabler Haptik ist dagegen eine direkte Cursorpositionierung, d. h. eine direkte Auswahl der gewünschten Kartenposition, möglich. Das Auffinden spezieller Punkte auf der Karte wird dadurch unterstützt, dass diese durch eine lokal begrenzte Anziehungskraft haptisch markiert sind. Der Cursor „rastet“ sozusagen von selbst in einem solchen Punkt ein. Die Auswahl einer Position erfolgt schließlich wieder bei beiden Bedienarten durch Drücken des Drucktasters.

10.4.3.2 Teil 2: Untersuchung der Ablenkungswirkung bei der Bedienung eines Navigationssystems

Im zweiten Teil der Untersuchung wurde für die Bearbeitung von BediENAufgaben eine Anwendung programmiert, die in vereinfachter Form ein Navigationssystem darstellt. Es können damit unterschiedliche Formen der Zieleingabe durchgeführt werden. Die Abbildung auf der nächsten Seite gibt einen Überblick über das System.

Man sieht, dass dieses Navigationssystem aus den Einzelanwendungen des ersten Untersuchungsteils entwickelt wurde. Diese wurden bei der Programmierung wie oben dargestellt miteinander vernetzt. Bei der Definition der variablen Haptik mussten, wie bereits beschrieben, diverse Speicher-/Programmier-Probleme gelöst werden, um eine sich beliebig oft veränderliche Haptik realisieren zu können. Die Haptik der einzelnen Bildschirmoberflächen entspricht der Haptik der Einzelanwendungen. Die Bedienung des Systems mit konstanter Haptik erfolgt ebenfalls jeweils über das Auslenken des Sticks in eine der acht Richtungen.

Zur besseren Bedienbarkeit des Gesamtsystems wurde ein zusätzlicher Drucktaster auf den beiden Joystick-Gehäusen angebracht (vgl. Abschnitt 10.4.2). Diese Zurück-Taste garantiert den Rücksprung zu jedem Zeitpunkt zur vorherigen Bildschirmoberfläche. Somit werden Bedienfehler wie das Auswählen eines falschen Menüpunkts oder das zu frühe Springen von der Buchstabeneingabe in die Ortsliste in ihrer Folgeschwere entschärft.

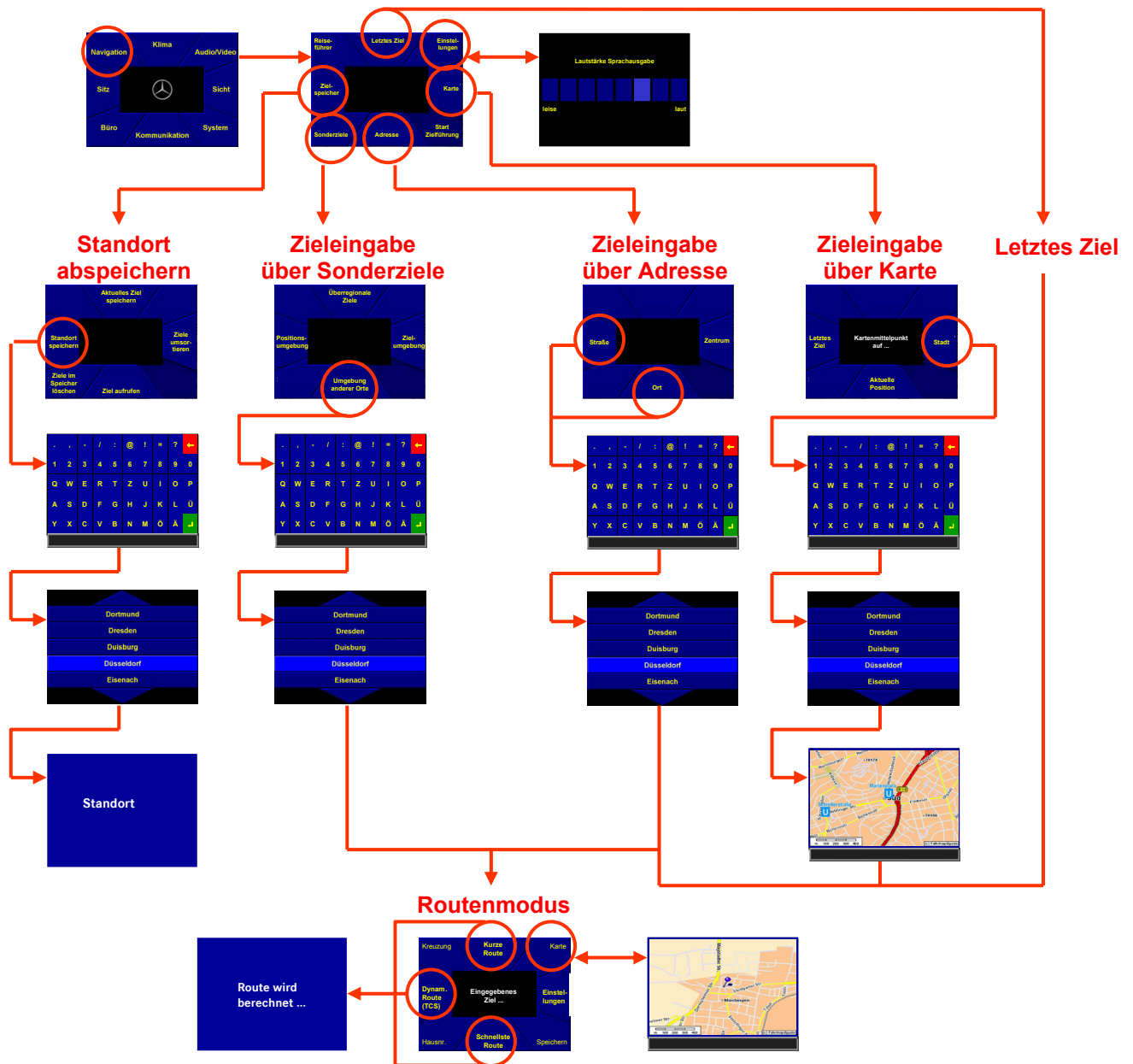


Abbildung 9.3: Übersicht Navigationssystem-Anwendung

Ausgehend von dem Navigations-Grundmenü sind sechs Menüfelder weiter ausgestaltet, die folgende Bedienabläufe zulassen (vgl. Abbildung 9.3):

- Zieleingabe über Adresse
- Zieleingabe über Karte
- Zieleingabe über Sonderziele
- Kontinuierliche Einstellung + Letztes Ziel
- Ziel speichern

Die fünf Bedienabläufe werden in Abschnitt 10.4.6.2 detailliert beschrieben. Abgeschlossen werden die Bedienabläufe immer durch die Auswahl eines Routenmodus. Nach der Rückmeldung „Die Route wird berechnet ...“ geht das System wieder in das Navigations-Grundmenü zurück.

10.4.4 Fahrsimulator

Auch die vorliegende Untersuchung fand wieder im MMI-Fahrsimulator der Daimler-Chrysler-Fahrzeufforschung in Untertürkheim statt. Er wurde bereits in Abschnitt 5.3 ausführlich beschrieben. Bei der Fahrstrecke handelte es sich wieder um eine Landstraße mit lang gezogenen Kurven. Die Vp hatte während des Versuchs die Aufgabe, einem Führungsfahrzeug, welches mit einer konstanten Geschwindigkeit von 60 km/h fuhr, in angenehmem Abstand zu folgen.

10.4.5 Datenaufzeichnung

Auch bezüglich der Datenaufzeichnung gab es Unterschiede zwischen den zwei Versuchsabschnitten. Im ersten Teil wurden wieder ähnlich wie in der in Kapitel 8 beschriebenen Untersuchung Bediendaten automatisch mitprotokolliert. Abhängig von der Bedienaufgabe waren dies hauptsächlich Bediendauer und –fehler. Von einer Erfassung der Blickbewegungen wurde aus ähnlichen Gründen abgesehen. Ein weiterer Grund liegt darin, dass die Daten im ersten Versuchsteil aufgabenabhängig ausgewertet werden sollen. Da die Vpn unterschiedlich lang für die Bearbeitung der Bedienaufgaben benötigen, würde man unterschiedlich lange Blickdatenfiles erhalten, und diese zu vergleichen ist wenig aussagekräftig.

Dahingegen stand im zweiten Versuchsteil explizit die Erfassung von Blick- und Fahrdaten zur Messung der Ablenkungswirkung der zwei Bedienarten im Vordergrund. Die Blickbewegungsmessung erfolgte mit dem System iView von der Firma SensoMotoric Instruments. Hierbei definiert man Objekte im Blickfeld des Probanden. Es wird also erfasst, wie lang und wie oft die Vp auf das Objekt Zentraldisplay und das Objekt Fahrbahn schaut. Die restlichen Blicke werden der Kategorie Hintergrund zugeschlagen. Konkret aufgezeichnet wurden

- ein streckenabhängiges Datenfile mit den Messgrößen benötigte Zeit pro Streckenabschnitt, Blickdauer, Blickhäufigkeit und Bremsreaktionszeit
- und ein zeitabhängiges Datenfile, bei dem alle 1/50 s der Lenkwinkel, die Querabweichung, die Geschwindigkeit und die Nummer der momentan bearbeiteten Bedienaufgabe aufgezeichnet wurden.

Die Befragung der Probanden erfolgte diesmal mittels eines elektronischen Fragebogens direkt am Notebook. Der elektronische Fragebogen selbst wurde mit der Software Sphinx erstellt. In diesem Programm kann im Anschluss an den Versuch ein Datenfile erzeugt werden, das direkt mit der Statistiksoftware SPSS ausgewertet werden kann. Neben der Erhebung demographischer Daten hatten die Vpn im Anschluss an den ersten Teil die einzelnen Bedienaufgaben zu bewerten sowie eine Gesamtbewertung nach dem zweiten Versuchsteil abzugeben.

10.4.6 Versuchsdesign

Wie bereits mehrfach angesprochen, gibt es in der vorliegenden Untersuchung nur eine unabhängige Variable Bedienart. Es handelt sich hierbei um die zwei alternativen Bedienarten

- **Variable Haptik (aktiver haptischer Joystick)** und
- **Konstante Haptik (passiver gewöhnlicher Joystick).**

Die zwei Bedienelemente sind in Abschnitt 10.4.2 beschrieben. Die zwei Bedienarten sollen anhand unterschiedlicher Fragestellungen verglichen werden.

10.4.6.1 Teil 1: Separate Analyse einzelner Bedienaufgaben

Mit variabler und konstanter Haptik sollen in permutierter Reihenfolge die einzelnen Bedienaufgaben

- **Menüauswahl,**
- **Buchstabeneingabe mit Listenauswahl** und
- **Zieleingabe über Karte**

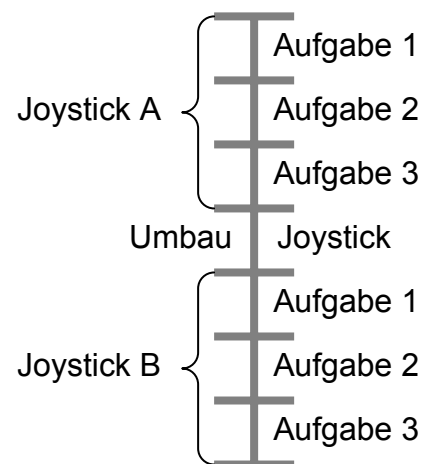
bedient werden. Dabei soll folgende Frage beantwortet werden:

Fragestellung im ersten Versuchsteil:

Sind einzelne Bedienaufgaben mit variabler Haptik während der Fahrt schneller und fehlerfreier zu bedienen als mit konstanter Haptik?

Wie auch in der vorletzten Untersuchung, handelt es sich bei den drei Bedienaufgaben nicht um eine unabhängige Variable, da sie aufgrund ihrer Unterschiedlichkeit keine vergleichbaren Faktorstufen darstellen. Es handelt sich hierbei vielmehr um drei voneinander unabhängige Bestandteile der Untersuchung.

Bezüglich der Haptik gibt es in der Untersuchung keine unterschiedlichen Einstellungen. Es wurde diejenigen Einstellungen ausgewählt, die sich in den vorangegangenen Untersuchungen als die besten herausgestellt hatten.



Wie bereits auf S. 123f beschrieben, wird in dieser Untersuchung eine etwas umgestaltete Menüauswahlvariante verwendet. Die Haptik dieser Variante wird wieder maßgeblich durch die Betätigungskraft (= zentrierende Federkraft) bestimmt. Hier wurde der Wert der großen Betätigungskraft aus der vorletzten Untersuchung verwendet. Die Kraft erreicht ein Maximum von 0,5 N. Für die haptische Unterstützung der vier Grundrichtungen sowie für die diagonalen Barrieren, die verhindern sollen, dass fälschlicherweise das benachbarte Feld ausgewählt wird, wurden die maximal einstellbaren Kräfte verwendet.

Das bestimmende Maß der Haptik der Buchstabeneingabe ist die Größe der Rasterkraft. Wie weiter oben beschrieben, gelang es, die Rasterungen den momentan aktiven Buchstaben automatisch anzupassen. Hierfür mussten aber auch die Rasterkräfte in x- und y-Richtung über die Definition zweier Parameter in Abhängigkeit der aktuellen aktiven Buchstabenanzahl definiert werden, da die empfundene Kraft maßgeblich von der Größe des mit der Kraft beaufschlagten Feldes beeinflusst wird. Für die Rasterkraft bei der Listenauswahl wurde die große Betätigungskraft (0,3 N) aus der vorletzten Untersuchung übernommen. Wie bereits erwähnt, wurde die haptische Gestaltung in Bezug auf die Geometrie der mit Kräften beaufschlagten Flächen optimiert.

Bei der Zieleingabe über Karte sind lediglich Kräfte aktiv, die das haptische Auffinden markanter Punkte unterstützen sollen. Hier tritt wieder verschärft das Problem aktiver Haptik auf, dass es sehr schwer ist, eine große Kraft auf einer kleinen Fläche zu erzeugen. Es wurde ein Kompromiss in der Hinsicht definiert, dass die Kräfte auf der einen Seite geometrisch möglichst scharf begrenzt sind und auf der anderen Seite möglichst stark wahrnehmbar sind.

Für den Joystick mit konstanter Haptik erübrigt sich eine Beschreibung der haptischen Einstellungen. Der Joystick, der ebenfalls aufgrund der Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen spezifiziert wurde, ist mit seiner Charakteristik in Abschnitt 10.4.2.2 beschrieben.

10.4.6.2 Teil 2: Untersuchung der Ablenkungswirkung bei der Bedienung eines Navigationssystems

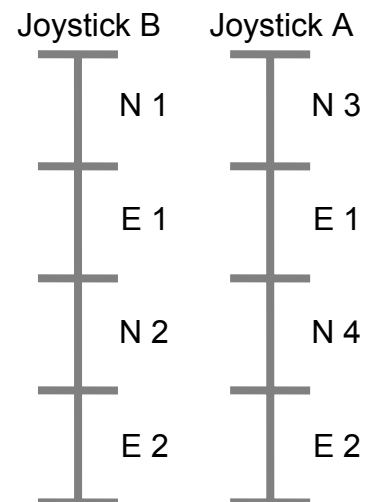
Mit variabler und konstanter Haptik sollen Bedienaufgaben bearbeitet werden, wie sie beim täglichen Gebrauch eines Navigationssystems vorkommen.

Fragestellung im zweiten Versuchsteil:

- Ist bei der Bedienung mit variabler Haptik die Blickabwendung geringer und die Spurhaltung besser als mit konstanter Haptik?
- Ist zusätzlich die Anzahl bearbeiteter Aufgaben höher oder geht ein Vorteil auf Kosten eines anderen?

Es wird überprüft, ob sich bei der Art und Anzahl der Blickbewegungen sowie beim Fahrverhalten Unterschiede ergeben. Im Einzelnen werden pro Streckenabschnitt folgende abhängige Variablen aufgezeichnet:

- Anzahl angefangener Aufgaben
- Bremsreaktionszeit
- Anzahl der Blicke auf das Zentraldisplay und auf die Fahrbahn
- Kumulierte Blickdauer auf das Zentraldisplay und auf die Fahrbahn
- Geschwindigkeit
- Lenkwinkel
- Querabweichung
- Subjektive Bewertung durch die Vpn



N = Normstrecke

E = Experimentalstrecke

Allen Vpn wurden alle Varianten dargeboten, so dass es sich hierbei wiederum um ein vollständiges within-Design handelt.

Im Folgenden werden die fünf typischen Bedienabläufe beschrieben, wie sie die Vpn in der Untersuchung bedienen sollten. Bei der Darstellung der Menüauswahl wird die Bildschirmoberfläche der Variante für konstante Haptik verwendet.

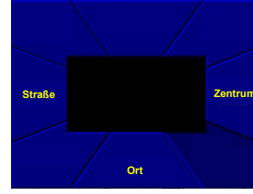
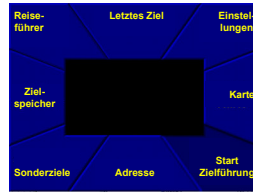
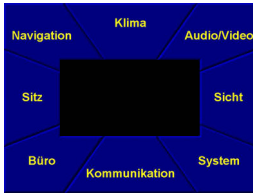
Die Bedienaufgaben beginnen jeweils im Grundmenü und werden mit der Routenberechnung abgeschlossen. Die zwei Bedienarten können so anwendungsorientiert verglichen werden, denn erst in der Kombination mehrerer Einzelanwendungen wird die Eigenart einer variablen Haptik deutlich.

Zieleingabe über Adresse

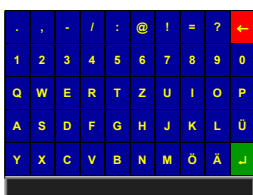
Die Vp erhält dabei folgende Anweisungen:

„Bitte geben Sie die Eichstraße in Sindelfingen als Navigationsziel ein. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:“

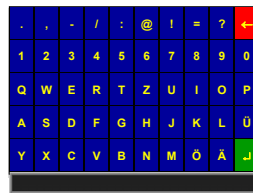
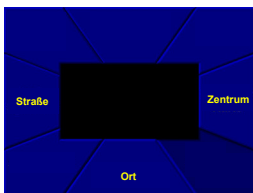
- „Wählen Sie ‚Adresse‘ und dort die Option ‚Ort‘ aus.“



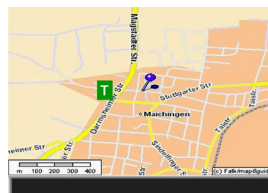
- „Geben Sie die ersten 3 Buchstaben von Sindelfingen ein und gehen Sie dann in die Ortsliste.“
- „Wählen Sie in der Ortsliste Sindelfingen aus.“



- „Wählen Sie die Option ‚Straße‘ aus.“
- „Geben Sie die ersten 4 Buchstaben von Eichholzstraße ein und gehen Sie dann in die Straßenliste.“
- „Wählen Sie in der Straßenliste Eichholzstraße aus.“



- „Wählen Sie die Option ‚Karte‘ aus.“
- „Positionieren Sie das Fadenkreuz auf der Kreuzung der Eichstraße mit der Darmsheimer Straße und lassen Sie die kürzeste Route berechnen.“

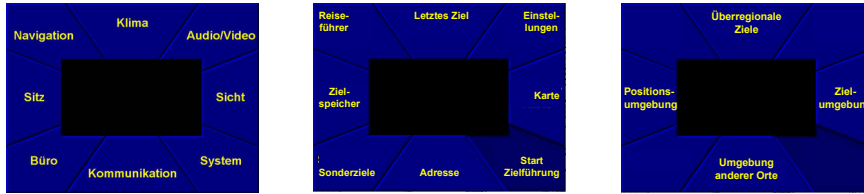


Zieleingabe über Sonderziele

Die Vp erhält dabei folgende Anweisungen:

„Bitte geben Sie das Parkhaus in der Jahnstraße in Schorndorf als Navigationsziel ein. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:“

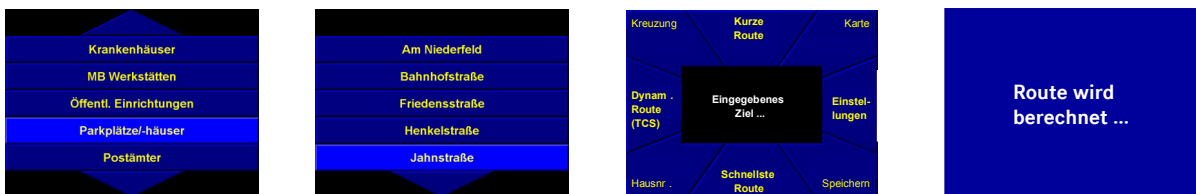
- „Wählen Sie Zieleingabe über Sonderziele und dort die Option ‚Umgebung anderer Orte‘ aus.“



- „Geben Sie die ersten 5 Buchstaben von Schorndorf ein und gehen Sie dann in die Ortsliste.“
- „Wählen Sie in der Ortsliste Schorndorf aus.“
- „Wählen Sie Schorndorf im Rems-Murr-Kreis aus.“



- „Wählen Sie ‚Parkplätze/-häuser‘ aus.“
- „Wählen Sie das Parkhaus in der Jahnstraße als Navigationsziel aus und lassen Sie die dynamische Route berechnen.“

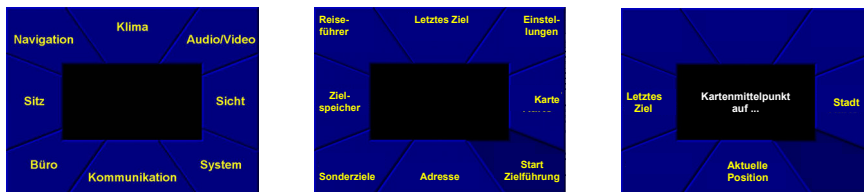


Zieleingabe über Karte

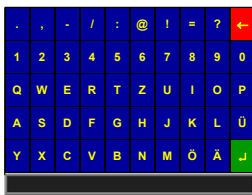
Die Vp erhält dabei folgende Anweisungen:

„Bitte wählen Sie die U-Bahn-Station Schreiberstraße in Stuttgart als Navigationsziel aus. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:“

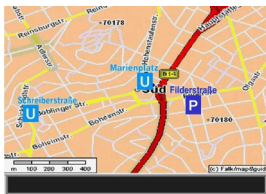
- „Wählen Sie ‚Zieleingabe über Karte‘ und dort die Option ‚Stadt‘ aus.“



- „Geben Sie die ersten 5 Buchstaben von Stuttgart ein und gehen Sie dann in die Ortsliste.“
- „Wählen Sie in der Ortsliste Stuttgart-Süd aus.“



- „Positionieren Sie das Fadenkreuz auf der U-Bahn-Station Schreiberstraße und lassen Sie die schnellste Route berechnen.“

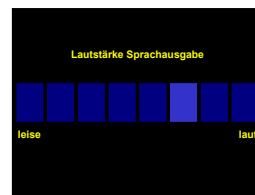


Letztes Ziel + Einstellungen

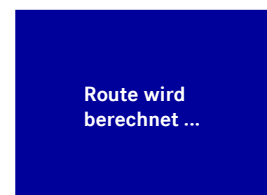
Die Vp erhält dabei folgende Anweisungen:

„Bitte verändern Sie die Lautstärke der Sprachausgabe und wählen Sie das letzte Ziel als Navigationsziel aus. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:“

- „Wählen Sie ‚Einstellungen‘ aus und stellen Sie die Lautstärke der Sprachausgabe um zwei Stufen leiser.“



- „Wählen Sie ‚Letztes Ziel‘ aus und lassen Sie die kürzeste Route berechnen.“

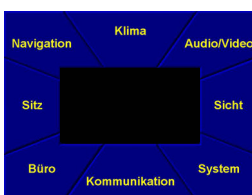


Standort speichern

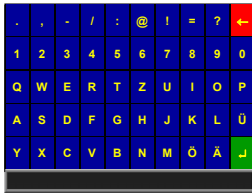
Die Vp erhält dabei folgende Anweisungen:

„Bitte speichern Sie die aktuelle Position unter dem Namen Nordbahnhofstraße 173. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:“

- „Wählen Sie Zielspeicher und dort die Option ‚Standort speichern‘ aus.“



- „Speichern Sie die aktuelle Position unter dem Namen Nordbahnhofstraße 173 ab.“



10.5 Versuchsablauf

Die Untersuchung wurde standardisiert durchgeführt. Nach der Begrüßung und der Befragung bezüglich demographischer Daten hatte die Vp zunächst Gelegenheit für eine kurze Eingewöhnungsfahrt im Fahr Simulator. Es folgten die Versuchsinstruktionen.

Wie bereits beschrieben, war die Untersuchung in zwei Abschnitte aufgeteilt:

Teil 1: Separate Analyse einzelner Bedienaufgaben

Die Vpn wurden hierbei angewiesen, mit beiden Bedienelementen folgende Bedienaufgaben während der Fahrt zu bearbeiten:

- **Menüauswahl:** Hierbei mussten in zufälliger Reihenfolge die acht Menüfelder ausgewählt werden.
- **Buchstabeneingabe mit Listenauswahl:** Bei dieser Aufgabe mussten zunächst mehrere Buchstaben eines Ortsnamen im sich ausdünnenden Speller ausgewählt werden, dann in die Ortsliste gewechselt werden, um dort schließlich den entsprechenden Ort auszuwählen. Dieser Ablauf sollte für zwei Ortsnamen durchgeführt werden.
- **Zieleingabe über Karte:** Hierbei musste als Erstes die entsprechende Position auf der Karte angefahren und anschließend durch Drücken des Drucktasters ausgewählt werden.

Die verwendeten Softwareapplikationen sind in Abschnitt 10.4.3.1 ausführlich beschrieben. Auf die Haptik wurde in Abschnitt 10.4.6.1 eingegangen. Abschließend fand eine Befragung zur subjektiven Bewertung der Einzelaufgaben statt.

Teil 2: Untersuchung der Ablenkungswirkung bei der Bedienung eines Navigationssystems

Die Vpn sollten in diesem Untersuchungsteil die in Abschnitt 10.4.6.2 beschriebenen Bedienaufgaben bearbeiten. Die Reihenfolge der einzelnen Norm- und Experimentalabschnitte wurde ebenfalls bereits in diesem Kapitel beschrieben. Das Durchfahren eines Streckenabschnitts dauerte ca. 4 Minuten.

Die Reihenfolge der Bedienelemente, welcher die zwei Teile der Untersuchung entsprechen, wurde von Vp zu Vp abgewechselt. Innerhalb eines Versuchsteils wurde die Reihenfolge der drei Interaktionsaufgaben ebenfalls vollständig permutiert dargeboten. Die genaue Bedienaufgabe, d. h. welches Menüfeld oder Stadt auszuwählen war bzw. welche Straße eingegeben werden sollte, wurde dem Probanden über eine Audiodatei mitgeteilt. Es ergab sich eine Versuchsgesamtdauer von ca. 100 Minuten pro Vp.

10.6 Ergebnisse

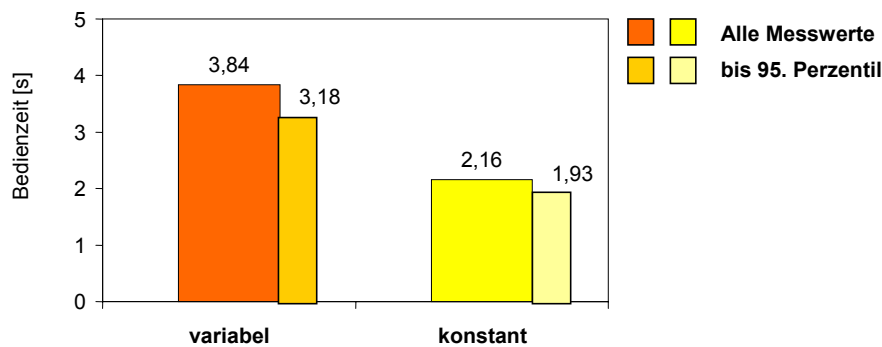
Die statistische Auswertung erfolgte anhand von t-Tests für abhängige Stichproben.

10.6.1 Erster Versuchsteil

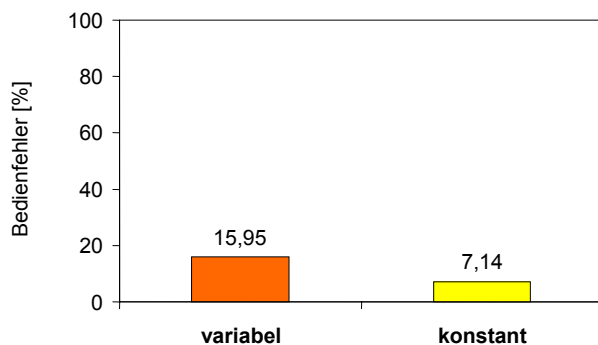
Bei den Bedienzeiten wurde wie in der vorletzten Untersuchung neben der Betrachtung aller Messwerte zusätzlich nur das 0. bis 95. Perzentil der Messwerte ausgewertet. Einige Vpn waren dermaßen durch die Hauptaufgabe beansprucht, dass sie die Nebenaufgabe z. T. für einige Sekunden unterbrachen, um sich ausschließlich auf das Fahren zu konzentrieren. Dieses Verhalten entspricht jedoch voll und ganz den Instruktionen. Hierbei wurden die Vpn ausdrücklich darauf hingewiesen, dass das sichere Bewegen des Fahrzeugs zu jedem Zeitpunkt Vorrang vor dem Bedienen hat. Z. T. führte dies aber zu sehr langen Bedienzeiten (z. B. 24 s für eine Menüauswahl), so dass es legitim ist, diese Werte bei einer Variante der Auswertung auszublenden.

10.6.1.1 Menüauswahl

Die folgende Tabelle zeigt die **durchschnittliche Bedienzeit für eine Menüauswahl**:



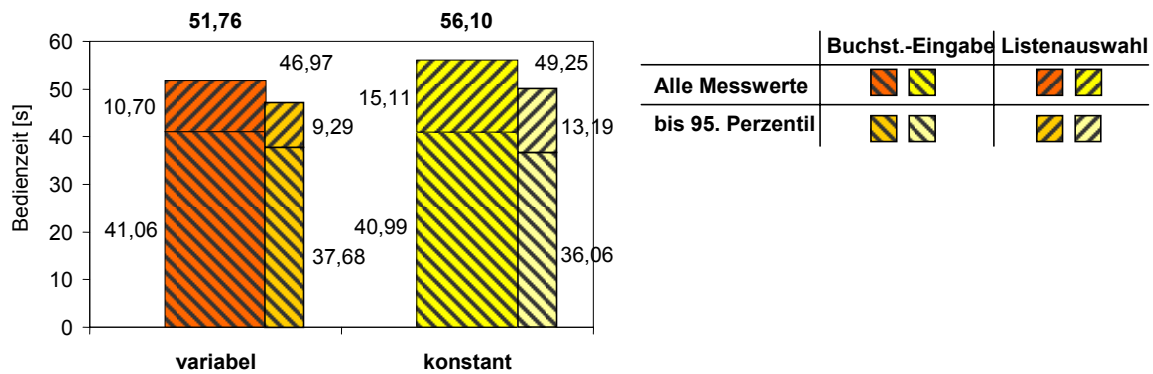
Der t-Test bei gepaarten Stichproben ($n = 29$) ergibt $p = .000$ (bis 95. Perzentil $p = .000$). Die durchschnittliche Bedienzeit für eine Menüauswahl war also bei konstanter Haptik hochsignifikant kürzer als bei variabler Haptik. Ein entsprechendes Bild ergibt sich für den **prozentualen Anteil fehlerhafter Menüauswahl**:



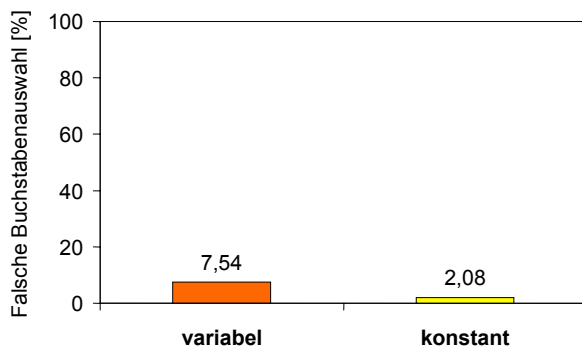
Der t-Test bei gepaarten Stichproben ($n = 29$) ergibt hier $p = .002$. Aufgrund hochsignifikant geringerer Bedienzeiten und -fehler ist für diese Bedienungsaufgabe aus objektiver Sicht der Joystick mit konstanter Haptik also das eindeutig bessere Bedienelement.

10.6.1.2 Buchstabeneingabe mit Listenauswahl

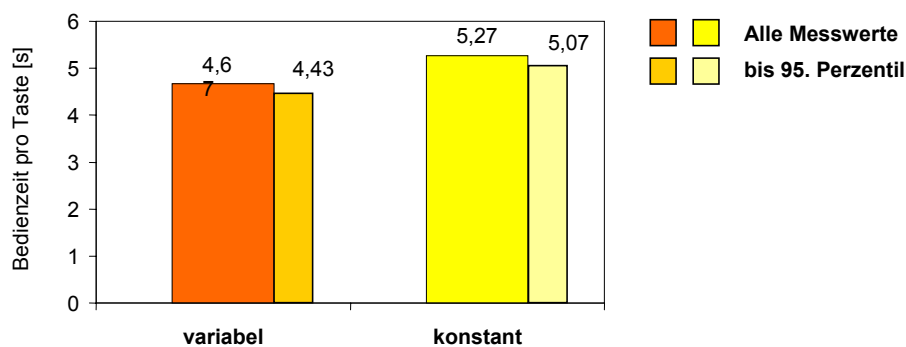
Zunächst ist wieder die **durchschnittliche Bedienzeit für eine Bedienaufgabe** dargestellt:



Der t-Test bei gepaarten Stichproben ($n = 29$) ergibt beim Vergleich insgesamt $p = .480$ (bis 95. Perzentil $p = .709$), beim Vergleich der Buchstabeneingabe $p = .984$ ($p = .709$) und beim Vergleich der Listenauswahl $p = .058$ ($p = .009$), d. h. bei Betrachtung des 0. bis 95. Perzentils der Messwerte erfolgte die Listenauswahl mit variabler Haptik signifikant schneller als mit konstanter Haptik. Die **prozentuale falsche Buchstabenauswahl pro Bedienaufgabe** ergibt folgendes Bild:

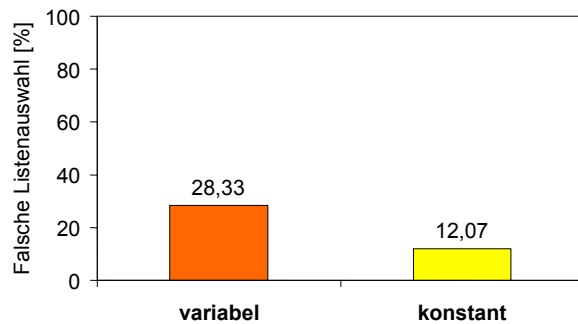


Mit variabler Haptik werden hochsignifikant mehr falsche Buchstaben ausgewählt als mit konstanter Haptik. Der t-Test bei gepaarten Stichproben ($n = 29$) ergibt $p = .003$. Über die Anzahl insgesamt ausgewählter Buchstaben lässt sich die **durchschnittliche Bedienzeit für eine Buchstabenauswahl** berechnen:



Der t-Test bei gepaarten Stichproben ($n = 29$) ergibt hier $p = .141$ (bis 95. Perzentil $p = .054$). Wie man sieht, erfolgt die Buchstabeneingabe mit beiden Joysticks insgesamt nahezu gleich schnell. Zwar werden bei variabler Haptik mehr falsche Buchstaben

ausgewählt, die geringere Bedienzeit pro Buchstabenauswahl gleicht dies jedoch wieder aus. Bei der Listenauswahl wird mit variabler Haptik signifikant öfter ein falsches Item ausgewählt als bei konstanter Haptik, wie die Darstellung der **prozentual falschen Listenauswahl** zeigt:

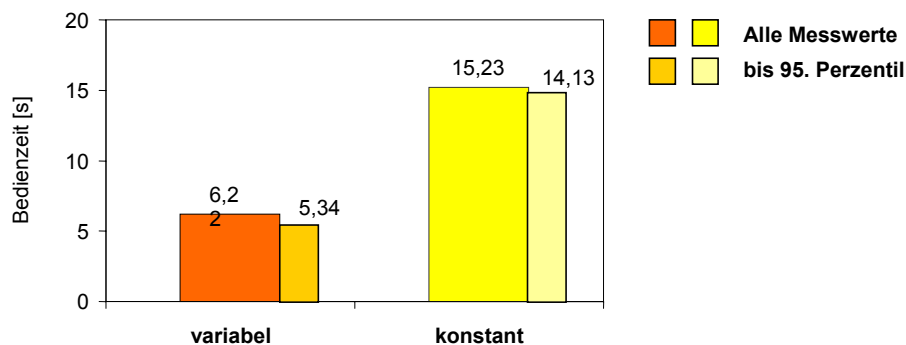


Der t-Test bei gepaarten Stichproben ($n = 29$) ergibt hier $p = .039$. Trotzdem erfolgt die Listenauswahl mit variabler Haptik deutlich schneller, wie oben zu sehen war.

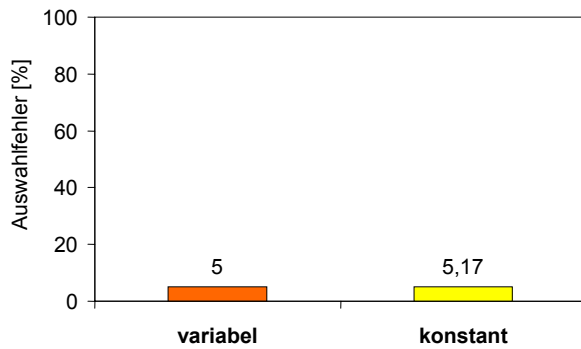
Bei der Bedienaufgabe Buchstabeneingabe mit Listenauswahl zeichnet sich also ein uneinheitliches Bild ab. Zwar werden bei variabler Haptik hochsignifikant mehr falsche Buchstaben ausgewählt, durch die geringere Bedienzeit pro Buchstabeneingabe ist die resultierende Gesamtbedienzeit aber nahezu gleich groß wie bei konstanter Haptik. Die Listenauswahl dauert bei variabler Haptik bei Ausblenden der Extremwerte signifikant weniger lang, dafür ereignen sich signifikant mehr Auswahlfehler.

10.6.1.3 Zieleingabe über Karte

Die untenstehende Darstellung zeigt die **durchschnittliche Bedienzeit für eine Zieleingabe**:



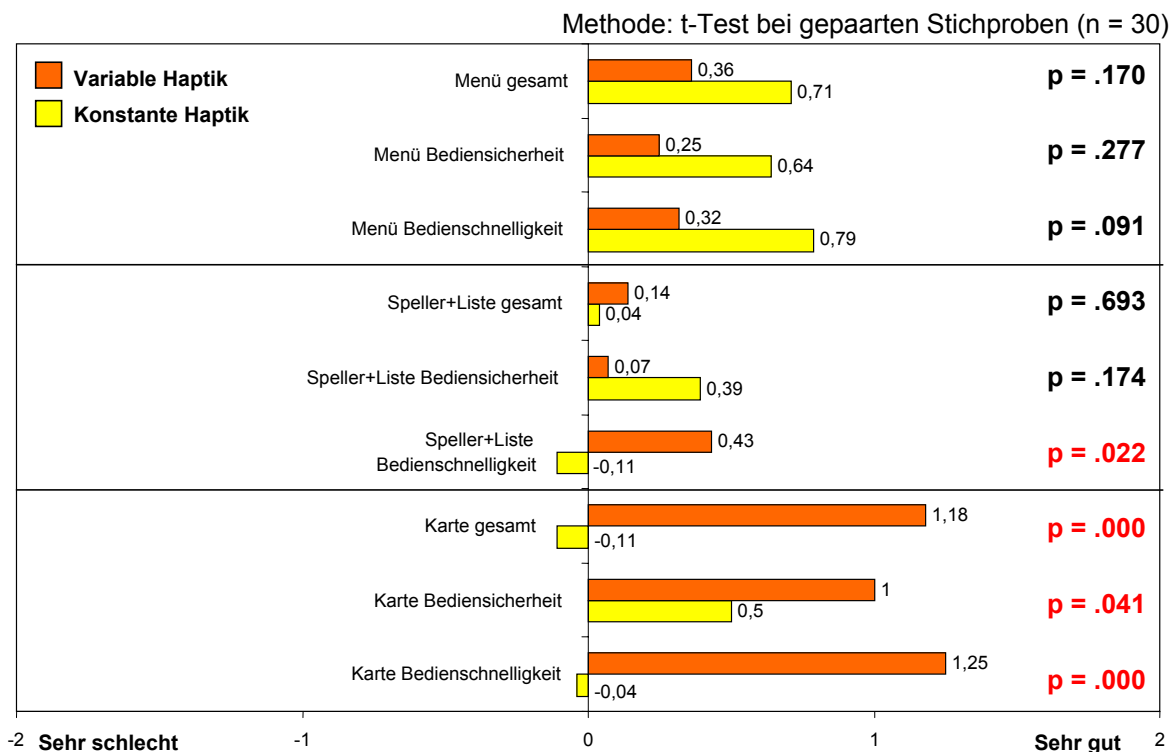
Es zeigt sich, dass sich diese Bedienaufgabe mit variabler Haptik sehr viel schneller bedienen lässt. Der t-Test bei gepaarten Stichproben ($n = 29$) ergibt einen hochsignifikanten Unterschied: $p = .000$ (bis 95. Perzentil $p = .000$). Dabei ereignen sich mit beiden Joysticks praktisch gleichviel Bedienfehler (s. Darstellung auf der nächsten Seite).



Für die Bedienaufgabe Zieleingabe über Karte ist der Joystick mit variabler Haptik somit eindeutig das bessere Bedienelement, wenngleich es sich im Versuch nur um zwei Beispiele handelte.

10.6.1.4 Subjektive Bewertung

Die folgende Darstellung gibt einen Überblick über die subjektive Bewertung der einzelnen Bedienaufgaben durch die Vpn mit den beiden Bedienarten. Dabei wurde auf einer fünfstufigen Skala jeweils die Bedienbarkeit insgesamt sowie speziell in Bezug auf Bedienschnelligkeit und –sicherheit bewertet (vgl. auch Abschnitt 8.5). Dargestellt sind der Bewertungsmittelwert der 30 Vpn und die Irrtumswahrscheinlichkeit p des t-Tests für gepaarte Stichproben.



Bei der Menüauswahl wird die konstante Haptik durchgehend tendenziell besser bewertet als die variable Haptik. Die subjektiven Bewertungen der Vpn bestätigen somit die objektiven Messdaten darin, dass für diese Bedienaufgabe der Joystick mit konstanter Haptik das bessere Bedienelement ist.

Die Buchstabeneingabe mit Listenauswahl wird mit beiden Joysticks ähnlich durchschnittlich bewertet. Dabei wird die konstante Haptik als sicherer, die variable Haptik

signifikant als schneller bewertet, was ebenfalls gut den objektiven Messgrößen entspricht.

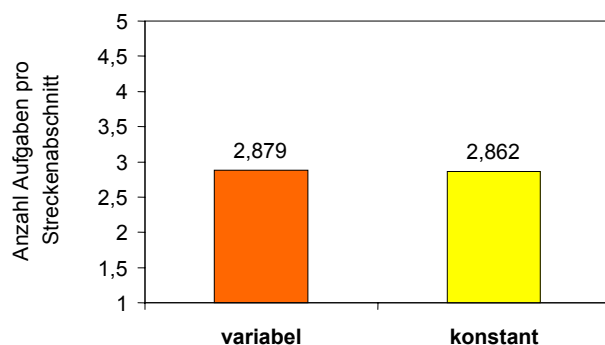
Bei der Zieleingabe über Karte wird die variable Haptik durchgehend sehr positiv und signifikant besser als die konstante Haptik bewertet. Hier ist der Joystick mit variabler Haptik also eindeutig das bessere Bedienelement. Höchstsignifikant kürzere Bedienzeiten und signifikant bessere subjektive Bewertungen in allen Kategorien zeigen die Vorteile variabler Haptik bei dieser Bedienaufgabe auf.

Nebenbei zeigt sich in dieser, genau wie in der letzten Untersuchung, dass es in der Tendenz keinen Unterschied macht, ob man alle Messwerte oder nur die Messwerte bis zum 95. Perzentil betrachtet.

10.6.2 Zweiter Versuchsteil

10.6.2.1 Anzahl bearbeiteter Bedienaufgaben

Bei beiden Varianten wurden während den Experimentalstrecken nahezu gleichviel Aufgaben bearbeitet:



Der t-Test bei gepaarten Stichproben ($n = 30$) ergibt $p = .873$. Diese abhängige Variable liefert für sich also keine weitere Aussage zugunsten einer Bedienart.

10.6.2.2 Bremsreaktionszeit

Die Reaktionszeit auf eine Bremsung des Führungsfahrzeugs erwies sich als unbrauchbare abhängige Variable.

Die Vpn vergrößerten während den Experimentalstrecken den Abstand zum Führungsfahrzeug. Oftmals war als Reaktion auf die Bremsung des Führungsfahrzeugs keine Bremsung mehr notwendig. Es reichte aus, lediglich für einen gewissen Zeitraum vom Gas zu gehen. Die durchschnittliche Reaktionszeit während der Normstrecken betrug 3,503 s.

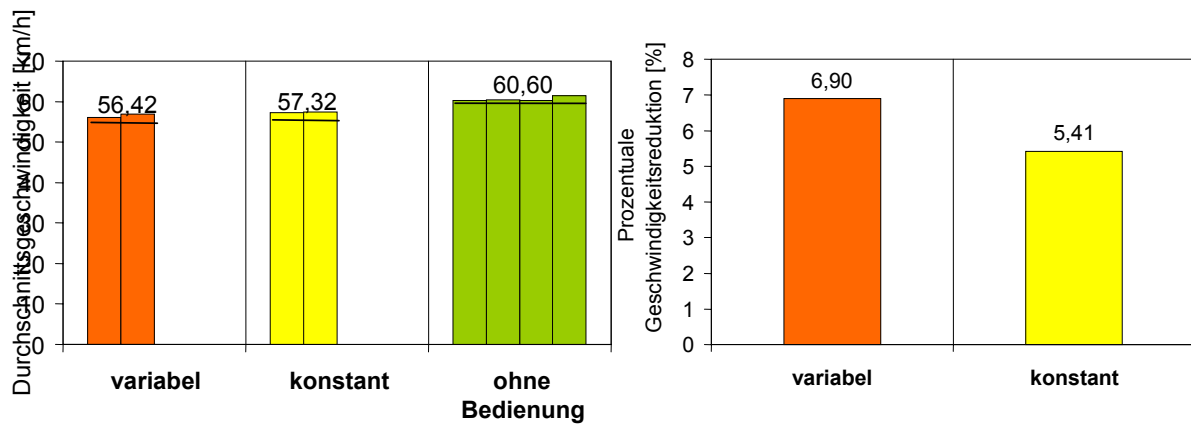
Als geeignetes Maß für die Messung des Reaktionsvermögens erscheint der Zeitpunkt, zu dem die Vp den Fuß vom Gaspedal nimmt. Noch besser wäre ein zwingendes Ereignis, etwa ein auf die Straße rollender Ball.

10.6.2.3 Fahrdaten

Im Folgenden sind die Ergebnisse der einzelnen abhängigen Variablen aufgelistet.

Geschwindigkeit

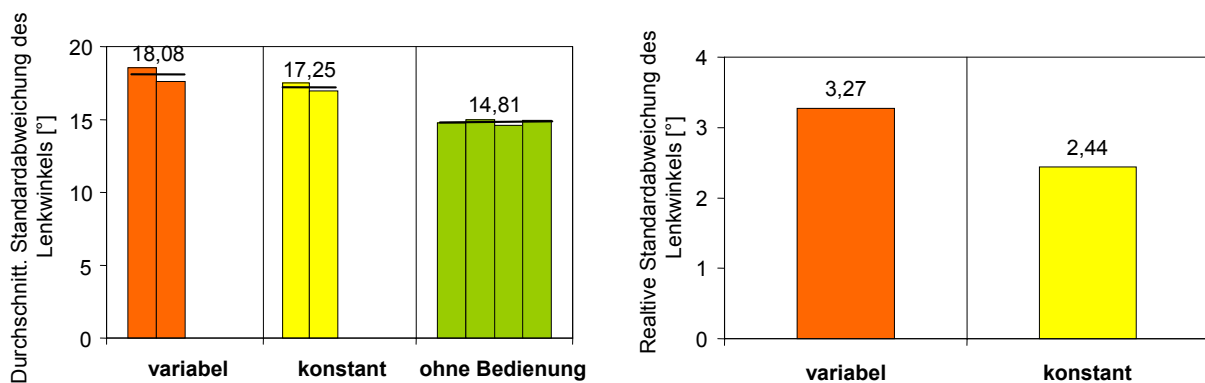
Auf dem unteren linken Diagramm ist die **durchschnittliche Geschwindigkeit pro Streckenabschnitt** dargestellt. Die Balken entsprechen dabei einem Streckenabschnitt. Rechts daneben sind die Ergebnisse normiert auf die Versuchsumgebung dargestellt:



Zunächst ist festzustellen, dass die Vpn während den Experimentalstrecken hochsignifikant langsamer fahren als während den Normstrecken ($p = .001$). Wie weiter zu sehen ist, fahren die Vpn bei Bedienung mit variabler Haptik tendenziell langsamer als bei Bedienung mit konstanter Haptik. Der t-Test zwischen variabler und konstanter Haptik bei gepaarten Stichproben ($n = 22$) ergibt $p = .082$.

Lenkwinkel

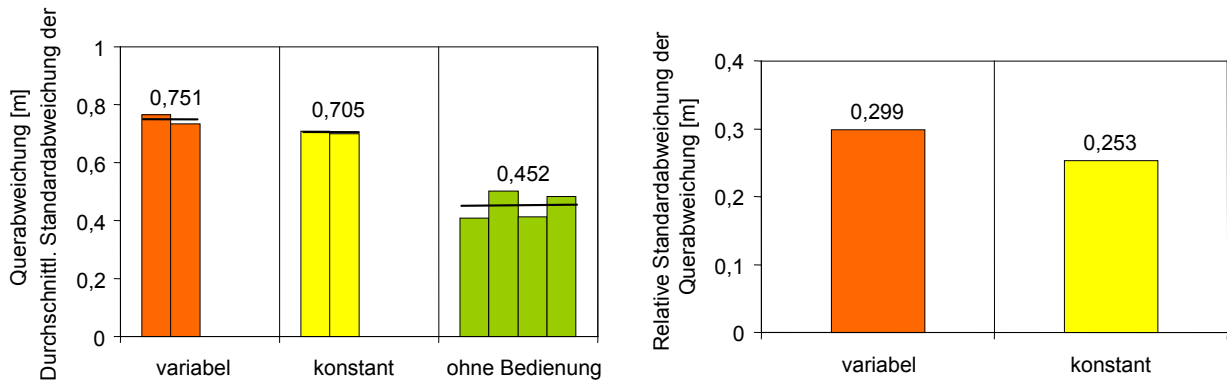
Als weitere abhängige Variable wurde wie bereits besprochen die **durchschnittliche Standardabweichung des Lenkwinkels** erfasst. Auf der rechten Seite ist wieder die Normierung auf die Versuchsumgebung dargestellt:



Qualitativ ergibt sich das gleiche Bild. Die Werte der Normstrecken sind deutlich kleiner als die der Experimentalstrecken, die relative Standardabweichung des Lenkwinkels ist bei Bedienung mit konstanter Haptik tendenziell kleiner als bei Bedienung mit variabler Haptik. Der t-Test bei gepaarten Stichproben ($n = 22$) ergibt hier $p = .051$.

Querabweichung

Die dritte abhängige Variable der Fahrdaten ist die **durchschnittliche Standardabweichung der Querabweichung**. Auch hier ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei Geschwindigkeit und Lenkwinkel. Die relative Standardabweichung der Querabweichung ist bei den Streckenabschnitten ohne Bedienung wesentlich geringer als bei denen mit Bedienung. Zwischen der Bedienung mit konstanter Haptik und der Bedienung mit variabler Haptik kann kein nennenswerter Unterschied festgestellt werden. Der t-Test bei gepaarten Stichproben ($n = 22$) ergibt hier $p = .258$.



Zusammenfassend ist zu den ermittelten Fahrdaten zu sagen, dass die Vpn bei Bedienung mit variabler Haptik tendenziell langsamer fahren als bei konstanter Haptik. Auch hinsichtlich der Standardabweichungen des Lenkwinkels und der Querabweichung schneidet der Joystick mit konstanter Haptik tendenziell besser ab. Es scheint also so zu sein, dass die Bedienung mit konstanter Haptik die Hauptaufgabe Fahren etwas weniger beeinflusst als die Bedienung mit variabler Haptik.

10.6.2.4 Blickdaten

An Blickdaten wurden die Blickhäufigkeit, die kumulierte und die durchschnittliche Blickdauer ausgewertet.

Blickhäufigkeit

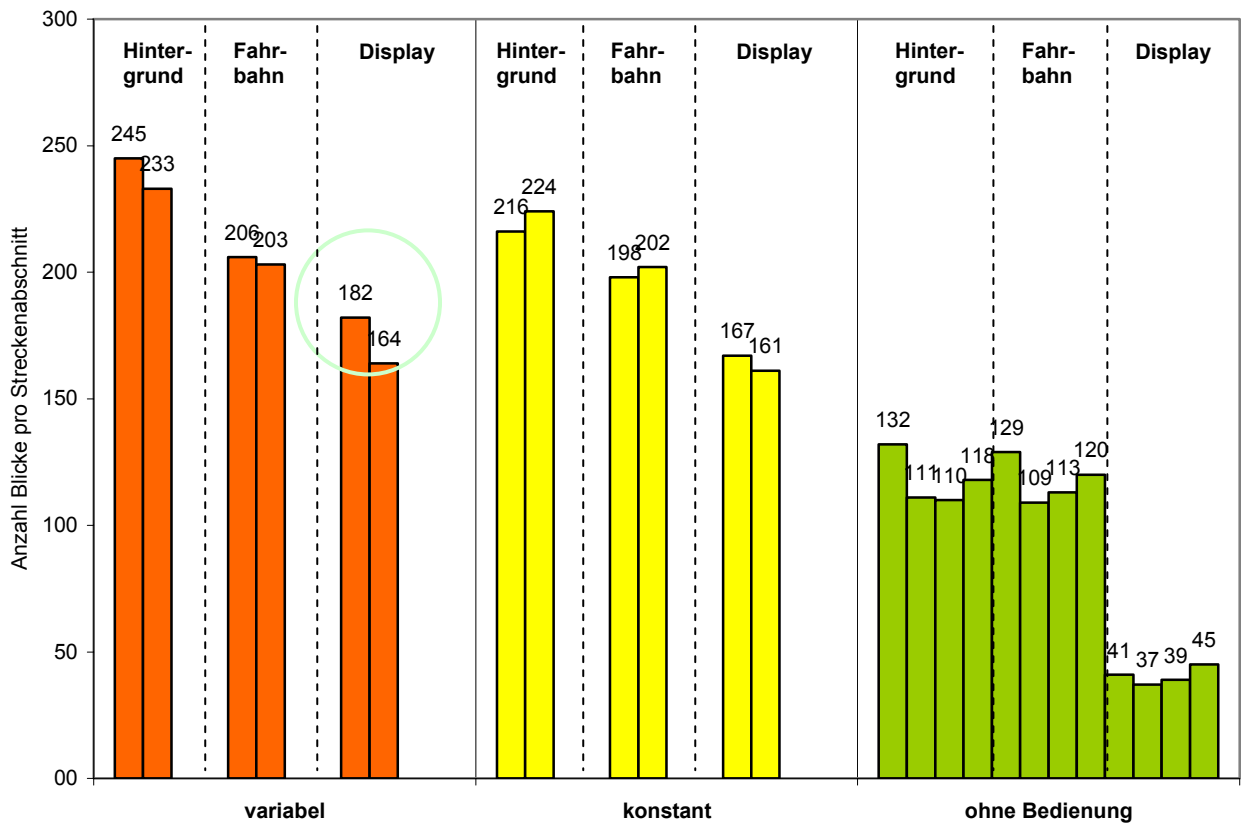
Auf dem Diagramm auf der folgenden Seite ist die Anzahl der Blicke dargestellt, wie oft die Vpn im Durchschnitt

- auf das Informationsdisplay,
- auf die Fahrbahn
- oder auf den Hintergrund

schauen. Der Hintergrund ist dabei all das, was nicht zu den Bereichen Display und Fahrbahn gehört. Der Grund, warum nun z. B. bei Streckenabschnitten ohne Bedienung es zu weniger Blickzuwendungen auf die Fahrbahn kommt, liegt daran, dass hierbei die Blicke auf die Straße länger sind. Eine Blickzuwendung ist definiert als das Eintreten des Blickvektors in einen entsprechenden Bereich.

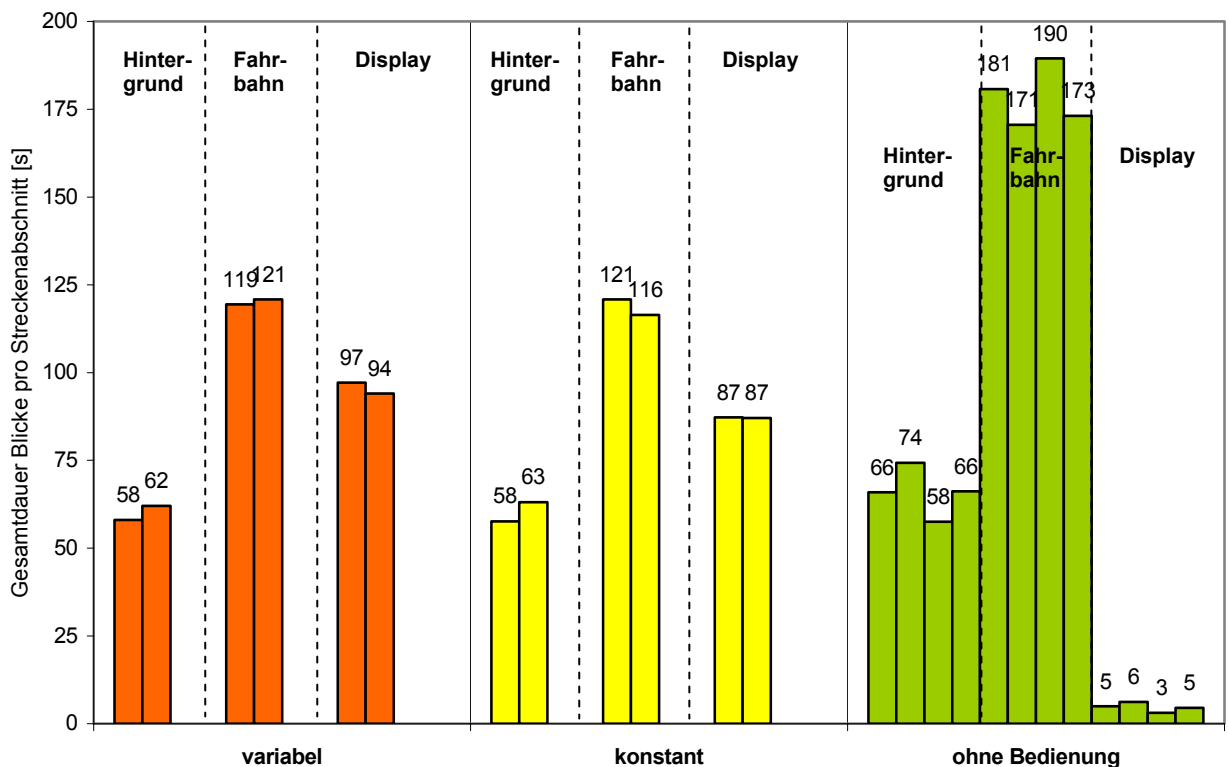
Von vorrangigem Interesse ist der Vergleich der Blickhäufigkeiten bei konstanter und bei variabler Haptik. Wie man sieht, schauten die Vpn bei Bedienung mit konstanter Haptik etwas weniger häufig auf das Display als bei variabler Haptik. Der t-Test bei gepaarten Stichproben ($n = 19$) ergibt $p = .372$, die Blickhäufigkeiten sind also statistisch

gleich. Bei variabler Haptik kam es allerdings zu einer hochsignifikanten Abnahme der Blickhäufigkeit vom ersten zum zweiten Versuchsdurchgang ($p = .001$).



Kumulierte Blickdauer

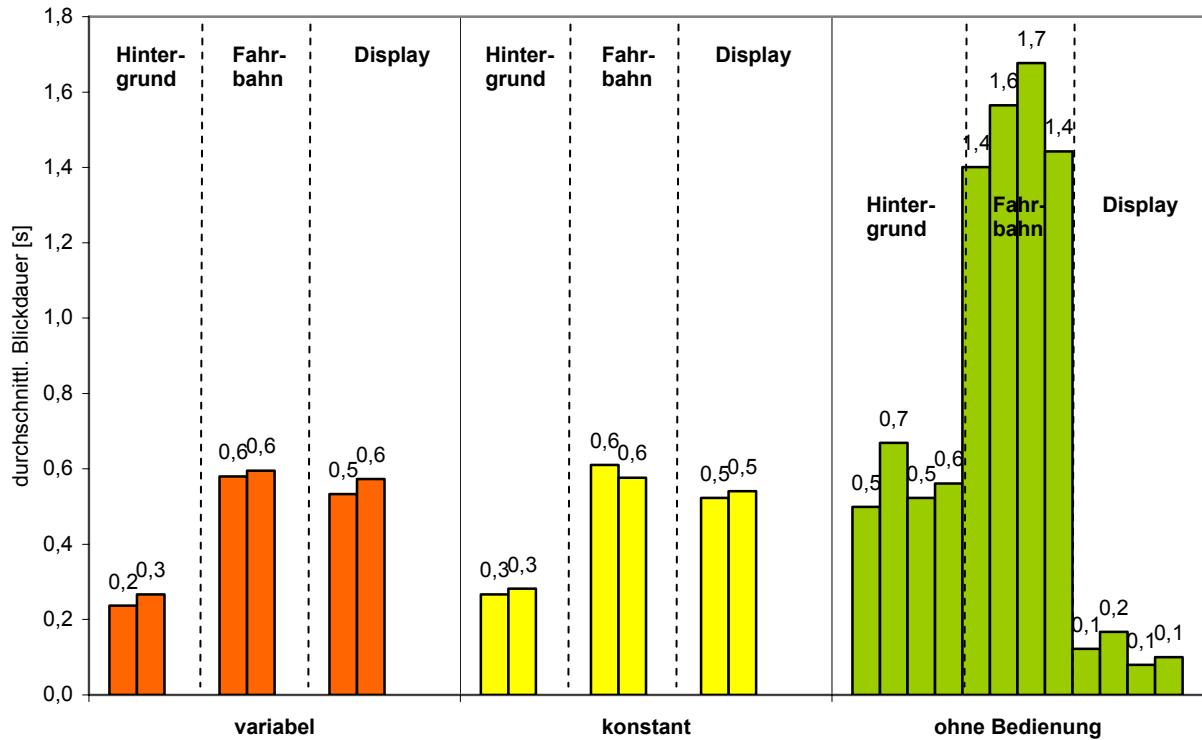
Das folgende Schaubild zeigt die Gesamtdauer der Blicke auf das jeweilige Objekt:



Auch hier liegt der Fokus wieder auf den Blickzeiten auf das Informationsdisplay während der Bedienung mit konstanter versus variabler Haptik. Ähnlich wie bei der Anzahl der Blickabwendungen ist bei Bedienung mit konstanter Haptik die kumulierte Blickdauer auf das Display geringer als bei variabler Haptik. Der Unterschied ist aber wiederum nicht signifikant ($p = .281$). Zwischen den zwei Versuchsdurchgängen sind bezüglich der Gesamtblickdauer keine nennenswerten Veränderungen feststellbar.

Durchschnittliche Blickdauer

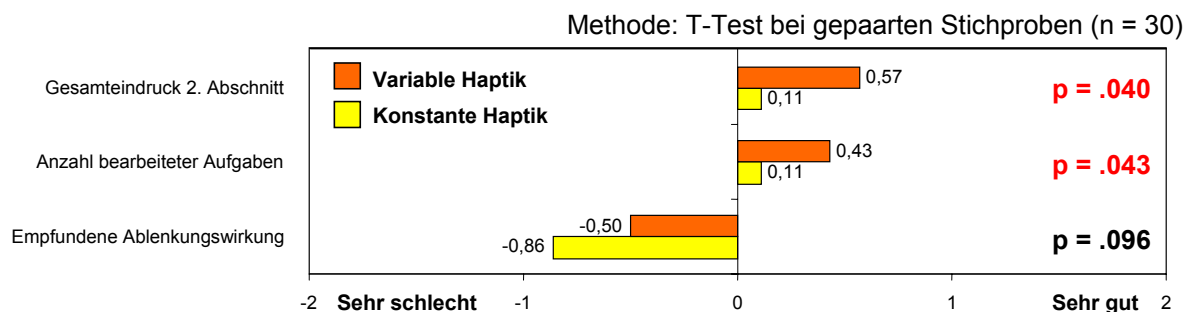
Abschließend ist noch die durchschnittliche Blickdauer dargestellt:



Die durchschnittliche Blickdauer auf das Display ist sowohl für variable und konstante Haptik als auch zwischen den Versuchsdurchgängen nahezu identisch.

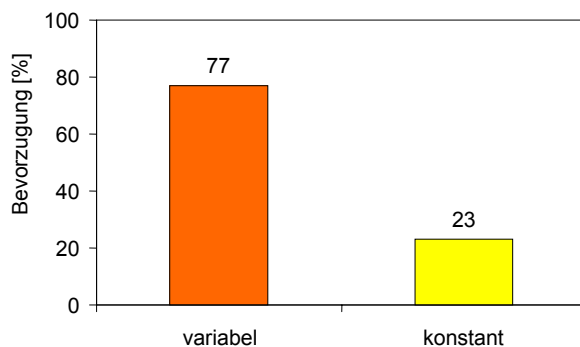
10.6.2.5 Subjektive Bewertung

Nach dem zweiten Versuchsdurchgang wurden den Vpn drei weitere Fragen gestellt. Die folgende Darstellung zeigt die Ergebnisse:



Man sieht, dass in der subjektiven Bewertung die Bedienung mit variabler Haptik signifikant besser abschneidet. Die Vpn sind darüber hinaus der Meinung, mit variabler Haptik signifikant mehr Bedienungsaufgaben bearbeitet zu haben. Auch bei der subjektiv empfundenen Ablenkungswirkung wird die variable Haptik besser bewertet, auch wenn der Unterschied hierbei nicht signifikant ist.

Abschließend wurden die Probanden gefragt: „Welches Bedienelement fanden Sie als insgesamt während der Fahrt besser zu bedienen?“ Das Ergebnis war eindeutig. Der Chi²-Test (n = 30) ergibt p = .003. Signifikant mehr Vpn entscheiden sich für das Bedienelement mit variabler Haptik:



Der Joystick mit variabler Haptik schneidet somit sowohl bei der Skalenbewertung als auch bei der Abschlussfrage signifikant besser ab als der Joystick mit konstanter Haptik.

Im Weiteren wurde überprüft, ob gewisse demographische Gruppen besonders große Unterschiede zwischen den beiden Bedienarten hinsichtlich der Ablenkungswirkung aufweisen. Es stellte sich heraus, dass diejenige Gruppe von Vpn, die durch die Bedienung mit variabler Haptik weniger abgelenkt wurde als mit konstanter Haptik, keine speziellen Merkmale aufweist. Es war lediglich festzustellen, dass bei Personen mit niedrigerem Bildungsabschluss die Ablenkung durch die Bedienung mit variabler Haptik überproportional größer war.

Generell war festzustellen, dass große individuelle Unterschiede bezüglich Blickabwendung und Spurhaltung vorliegen.

10.7 Diskussion

Die Diskussion der Versuchsergebnisse soll im Wesentlichen eine Antwort auf die Frage geben, wie man sich den offensichtlichen Widerspruch zwischen stärkerer Ablenkungswirkung und höherer Beanspruchung auf der einen, und der subjektiven Bewertung auf der anderen Seite erklären kann, denn hierbei ist der Joystick mit variabler Haptik eindeutig das bessere Bedienelement.

Wir wollen versuchen, das Verhalten der Vpn nachzuvollziehen, indem wir uns zunächst in ihre Lage hineinversetzen. Hier gibt es zwei Ansätze, die die Einstellungen der Vpn zu Versuchsbeginn erläutern können:

- Es ist bekannt, dass Personen in einer Probandenuntersuchung dazu neigen, sich so zu verhalten und das zu antworten, wovon sie der Meinung sind, dies solle das Ergebnis des Experiments sein (Aufforderungscharakter des Versuchs, Effekt der guten Versuchsperson).

- Es ist ein natürliches Bedürfnis des Menschen (zumindest von Personen, die an einer Probandenuntersuchung in der Forschung teilnehmen), eine neue Technologie zu erleben und zu verstehen, wenn er mit einer solchen konfrontiert wird.

Wie äußert sich diese Einstellung im Versuch? Man kann annehmen, dass die Vpn während der Bedienung mit variabler Haptik sich stärker auf das Bedienen, auf das sich ungewohnt anfühlende Bedienelement konzentrierten. Sei es, weil sie sich dafür interessierten oder weil sie sich dazu aufgefordert fühlten. Dies resultierte a priori in einer stärkeren Ablenkung.

Sie waren darüber hinaus bestrebt, die Bedienaufgaben mit variabler Haptik schneller abzuarbeiten. Betrachtet man z. B. die Zieleingabe über Karte oder die Listenauswahl, so war dies auch tatsächlich der Fall. Es wurde auch in weniger einzelnen Interaktionsschritten und kürzerer Zeit ein Buchstabe eingegeben. Dies erweckte bei den Vpn den Eindruck, die Bedienaufgaben mit variabler Haptik schneller bedienen und somit mehr Bedienaufgaben während den Experimentalstrecken abarbeiten zu können.

Die Probanden nahmen dabei offensichtlich nicht in dem Maße wahr, dass ihnen dabei zusätzliche Bedienfehler unterliefen. Um diese zu korrigieren, wurden aber weitere Blickabwendungen benötigt. Dadurch ergibt sich die festgestellte stärkere Ablenkungswirkung bei variabler Haptik. Das Fahrverhalten kann letztendlich als eine Auswirkung davon angesehen werden. Die Korrekturen benötigten aber auch zusätzliche Zeit, was dazu führte, dass objektiv bei beiden Bedienarten gleich viele Aufgaben bearbeitet wurden.

Es bleibt also festzustellen, dass die Qualität der haptischen Gestaltung der Bedienaufgaben bei variabler Haptik nicht so gut war, dass zusätzliche Bedienfehler bei der höheren Bediengeschwindigkeit hätten vermieden werden können. Somit ergibt sich objektiv nicht das gleiche Ergebnis wie bei der subjektiven Bewertung.

Ein weiterer Aspekt bei der Erklärung der hochsignifikanten Bevorzugung des Joysticks mit variabler Haptik im Anschluss an den Versuch kann in einem Übungsverhalten der Vpn gesehen werden. Darauf deuten einige tendenzielle und eine signifikante Verbesserung im zweiten gegenüber dem ersten Durchgang hin. Des Weiteren scheinen die Übungseffekte bei variabler Haptik größer zu sein als bei konstanter Haptik. Dies lässt folgende Rückschlüsse zu:

- Die subjektive Bewertung erfolgte im Anschluss an das Experiment. Aufgrund der Freude über das neu Gelernte und den Lernfortschritt entschieden sich die Vpn für den Joystick mit variabler Haptik. Die objektiven Messgrößen stellen aber einen Durchschnitt des Versuchszeitraums dar.
- Variable Haptik war den Vpn so wenig bekannt, dass sie zur Bedienung eine gewisse Übungsphase benötigten. Es könnte sein, dass der Joystick mit variabler Haptik nach einer etwas längeren Gewöhnung das bessere Bedienelement ist.

10.8 Schlussfolgerung

Hinsichtlich des Potentials variabler Haptik für die Bedienung von Fahrerinformationssystemen bleibt festzuhalten, dass es hierbei große Unterschiede zwischen einzelnen Bedienaufgaben gibt. Im Einzelnen gilt:

- **Menüauswahl:** Zumindest beim heutigen Stand der Technik ist die Qualität einer programmierten Haptik der Haptik einer mechanischen Kulissee eindeutig unterlegen.

- **Buchstabeneingabe:** Die direkte Cursorpositionierung ist schneller, aber auch motorisch anspruchsvoller als ein sequentielles Auslenken. Durch die zusätzlichen Bedienfehler ergibt sich insgesamt bei ungeübten Benutzern kein Vorteil für eine variable Haptik.
- **Listenauswahl:** Für diese motorisch einfache, eindimensionale Interaktionsaufgabe besitzt der Joystick mit variabler Haptik eindeutige Vorteile hinsichtlich der Bediendauer, nicht aber in Bezug auf die Bediensicherheit.
- **Zieleingabe über Karte:** Eindeutig zweidimensionale Bedienaufgaben und freie Cursorpositionierungen mit variablen haptischen Effekten scheinen das entscheidende Potential eines Joysticks mit variabler Haptik zu sein.

Bei speziellen Aufgaben und Funktionen, wie sie im dritten Punkt beschrieben wurden, besitzt variable Haptik generell große Vorteile. Als weitere Anwendungen kann man sich Internet-Applikationen und Office-Funktionen sehr gut vorstellen (Beispiel: Haptisch markierte Hyperlinks auf einer Internet-Seite).

Des Weiteren bestätigen die Ergebnisse die Vermutung, dass der geübte Benutzer mit variabler Haptik ein Fahrerinformationssystem schneller bedienen kann. Dazu wird jedoch eine Lernphase benötigt.

Bezüglich weiteren Entwicklungs- und Untersuchungsbedarfs ist zu sagen, dass technische Verbesserungen vor allem auf eine Verbesserung der Kräfte zur Definition einer Schaltkulisse abzielen sollten. Hierfür werden hohe und gegenüber Vibrieren stabile Kräfte und Kraft-Gradienten benötigt.

Die vorliegende Untersuchung fand in einem Simulator statt, von dem angenommen wird, dass dort die Beanspruchung durch das Fahren selbst relativ groß ist. Interessant wäre zu untersuchen, wie sich variable Haptik in anderen Versuchsumgebungen verhält (z. B. im realen Straßenverkehr, im Stand), bei denen die Beanspruchung durch die Hauptaufgabe verschieden ist. Dies soll im folgenden Feldexperiment geschehen. Darüber hinaus kann dabei die Frage geklärt werden, welchen Einfluss fahrdynamische Schwingung auf die Bedienung eines Navigationssystems mit variabler Haptik im Vergleich zu konstanter Haptik hat.

11 Vergleich von variabler und konstanter Haptik in einem Feldexperiment

11.1 Einleitung

Das folgende Feldexperiment stellt den Abschluss des experimentellen Teils dieser Arbeit dar. In Abschnitt 10.8 wurde bereits auf die Notwendigkeit der Überprüfung der Ergebnisse des Simulatorexperiments in realer Umgebung eingegangen. So hat die Durchführung von Simulatorexperimenten zahlreiche Vorteile wie etwa der guten Reproduzier- und Kontrollierbarkeit der Versuchssituation, ein Feldexperiment hat demgegenüber aber eine weitaus größere ökologische Validität [FÄRBER, 1987]. Es ist leicht ersichtlich, dass die Aufgabe, in einem realen Fahrzeug auf einer realen Straße zu fahren, einen wesentlich höheren Aufforderungscharakter besitzt als das Fahren in einem Simulator. Dies kann zu einer Umverteilung der individuellen Ressourcen führen.

Für die Durchführung des Feldversuchs sprechen folgende Gründe:

- Die Beanspruchung durch die Fahraufgabe bei einem Feldexperiment unterscheidet sich wesentlich von der bei einem Simulatorexperiment. Somit sollte der Vergleich variabler mit konstanter Haptik unter variiertem Beanspruchung durch die Fahraufgabe und gleichzeitig unter realitätsnäheren Bedingungen wiederholt werden.
- Des Weiteren kommt bei einem Feldexperiment der im Fahrsimulator keine Verwendung findende kinästhetische Sinneskanal hinzu. Es kann der Einfluss fahrdynamischer Schwingungen auf die Bedienung mit variabler und konstanter Haptik überprüft werden.

Gegenstand der Untersuchung ist also wieder der Vergleich des Joysticks mit variabler Haptik mit dem Joystick mit konstanter Haptik, wie sie bereits im letzten Experiment verwendet wurden. Damit soll ein zweites Mal die generelle Fragestellung dieser Arbeit experimentell überprüft werden, ob die Bedienung eines Fahrerinformationssystems unter stärkerer Berücksichtigung des haptischen Sinneskanals zu einer Reduzierung der visuellen Ablenkung und der kognitiven Beanspruchung des Fahrers führt. Es wird spannend sein zu sehen, ob die genannten Unterschiede in den Randbedingungen zu Unterschieden in den Ergebnissen im Vergleich zum Fahrsimulator führen.

11.2 Zielsetzung und Fragestellung

Das Feldexperiment hat das Ziel, in realer Umgebung die Bedienung eines Navigationssystems mit variabler Haptik zu vergleichen mit der Bedienung mit konstanter Haptik. Es soll dabei ein sehr ähnliches Versuchsdesign wie im zweiten Teil des Simulatorexperiments verwendet werden. Die Probanden sollen wieder umfassende Bedienungsaufgaben mit beiden Joysticks bearbeiten. Dies hat folgende Gründe:

- Die Fragestellung hat sich im Wesentlichen nicht verändert. Der Fokus liegt weiterhin auf der Quantifizierung der Ablenkungswirkung.
- Ein Vergleich der Versuchsergebnisse ermöglicht Aussagen zu den einzelnen Versuchsumgebungen

Das Experiment soll in zwei verschiedenen Umgebungen durchgeführt werden. Zum einen auf der Einfahrbahn von DaimlerChrysler in Untertürkheim, zum anderen auf einer vierspurigen Schnellstraße. Die zwei Versuchsumgebungen sind durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- Auf der **Einfahrbahn** kann der Vp ein exakt definierter Rundkurs vorgegeben werden, was die Aussagekraft der Spurhaltemessgrößen erhöht. Die Vp hat dennoch auf den z. T. regen Verkehr um sich herum zu achten. Es ist sicherlich so, dass das reale Fahren einen wesentlich höheren Aufforderungscharakter ausstrahlt, ausreichend Aufmerksamkeit auf die Fahraufgabe zu richten, als das Fahren im Simulator. Darüber hinaus besteht auf der Einfahrbahn die Möglichkeit, einen definiert schlechten Fahrbahnbelag („Schlechtwegstrecke“) als Versuchsstrecke zu verwenden. Somit kann der Einfluss von fahrdynamischen Schwingungen kontrolliert untersucht werden.
- Die reine Fahraufgabe auf der ausgewählten vierspurigen **Schnellstraße** ist sicherlich wesentlich einfacher als im Simulator. Auf den ausgewählten Streckenabschnitten mussten die Vpn fast nur geradeaus fahren, im Simulator war es eine Landstraße mit ständig aufeinander folgenden lang gezogenen Kurven. Des Weiteren erleichtert die zusätzliche kinästhetische Rückmeldung natürlich das Fahren. Auf der anderen Seite hat die Schnellstraße mit dem dort meist vorherrschenden dichten Verkehr einen noch höheren Aufforderungscharakter, ausreichend Aufmerksamkeit auf die Fahraufgabe zu richten. Nicht genügende Aufmerksamkeit kann hier im Gegensatz zum Fahrsimulator enorme Folgen haben.

Als weiterer Teilaspekt des Vergleichs variabler und konstanter Haptik soll in dem Experiment die Frage geklärt werden, welchen Einfluss fahrdynamische Schwingungen auf die Bedienung eines Navigationssystems mit variabler Haptik im Vergleich zu konstanter Haptik haben. So ist zu klären, ob etwa die Beeinträchtigung bei variabler Haptik größer ist als bei konstanter Haptik.

Parallel dazu stellt sich die Frage, wie groß die gemessene sowie die subjektive Ablenkungswirkung im realen Straßenverkehr im Vergleich zum Fahrsimulator ist. Es wird ebenfalls spannend sein zu sehen, wie aussagekräftig die einzelnen erhobenen Fahrdaten generell und im Vergleich zum Fahrsimulator sind.

11.3 Hypothesen

Die zwei Versuchsumgebungen wurden bereits in Abschnitt 11.2 in ihren Eigenschaften beschrieben. Dementsprechend sollen die Hypothesen auch getrennt für die zwei Versuchsumgebungen formuliert werden:

- **Einfahrbahn:** Wie später noch ausführlicher beschrieben wird, werden die Probanden instruiert, auf der Einfahrbahn mit Tempomat zu fahren. Somit wird als einzige abhängige Variable der Fahrdaten der Lenkwinkel erhoben. Da eine Geschwindigkeitsreduktion nicht möglich ist, müssen sich sämtliche Unterschiede in der Fahrleistung in dieser Variable zeigen. Es kann angenommen werden, dass Norm- und Experimentalbedingungen sich deutlich unterscheiden. Des Weiteren könnte dies zu einem verdeutlichten Unterschied zwischen variabler und konstanter Haptik führen. Es könnte aber auch sein, dass sich kaum Unterschiede in der Fahrleistung zeigen und sich dafür mögliche Unterschiede konzentriert in den Bediendaten bemerkbar machen.

Bezüglich der subjektiven Bewertungen wird erwartet, dass die Vpn sich ähnlich äußern wie im Fahrsimulator.

Vermutlicherweise wird sich der Einfluss der Fahrbahnunebenheiten eher objektiv als subjektiv bemerkbar machen. Es besteht die Hypothese, dass die Vpn den Einfluss subjektiv als eher gering bewerten, er sich jedoch in den Bediendaten bemerkbar macht.

- **Schnellstraße:** Von den zahlreichen erhobenen Fahrdaten wird erwartet, dass sie ein sehr detailliertes Bild des Fahrverhaltens wiedergeben. Zunächst müsste sich ein deutlicher Einfluss der parallelen Bedienaufgabe in nahezu allen abhängigen Variablen bemerkbar machen, d. h. es sind deutlich Unterschiede zwischen Norm- und Experimentalbedingungen zu erwarten. Der bereits beschriebene höhere Anforderungscharakter der Versuchsumgebung Schnellstraße kann dazu führen, dass sich Unterschiede zwischen variabler und konstanter Haptik weniger in den Fahrdaten widerspiegeln als in den Bediendaten.

Auch für die Versuchsumgebung Schnellstraße wird ein ähnliches Verhalten in den subjektiven Bewertungen der Vpn erwartet wie bei den anderen Versuchsumgebungen.

Generell besteht die Hypothese, dass das Feldexperiment im Wesentlichen die Ergebnisse des Simulatorversuchs bestätigt. Die beschriebenen Unterschiede in den resultierenden Beanspruchungen durch die Fahraufgaben der einzelnen Versuchsumgebungen könnten jedoch auch zu Veränderungen führen. Nicht zuletzt deshalb ist die Überprüfung der Ergebnisse im Feldexperiment sinnvoll.

Bezüglich demographischer Merkmale werden keine Hypothesen formuliert. Vielmehr soll wieder auf eine möglichst ausgeglichene und möglichst große Stichprobe geachtet werden.

11.4 Methode

11.4.1 Stichprobe

An der Untersuchung nahmen insgesamt 32 Personen teil. Diese relativ große Stichprobe gewährleistet es, statistisch bedeutsame Aussagen zu bekommen.

Vpn	Männlich	Weiblich	Jüngste Vp	Älteste Vp	Mittleres Alter
32	20	12	22	59	30

18 von ihnen fuhren neben der Schnellstraße zusätzlich auf der Einfahrbahn. Diese setzten sich bezüglich Alter und Geschlecht wie folgt zusammen.

Vpn	Männlich	Weiblich	Jüngste Vp	Älteste Vp	Mittleres Alter
18	12	6	23	59	32

11.4.2 Hard- und Software

Der verwendete Joystick mit variabler Haptik wie auch der Joystick mit konstanter Haptik waren die Gleichen wie in der vorangegangenen Untersuchung und wurden in vorangegangenen Abschnitten der Arbeit bereits beschrieben.

Auch die verwendete Software wurde bereits im vorangegangenen Versuch verwendet und in Abschnitt 10.4.3.2 beschrieben. Es handelt sich hierbei um die Simulation eines Navigationssystems in vereinfachter Form.

11.4.3 Versuchsfahrzeug

Das in diesem Feldexperiment Verwendung findende Versuchsfahrzeug ist in Abschnitt 5.4 bereits beschrieben. Es beinhaltet für diesen Versuch folgende Rechner-Peripherie:

- Die Navigationssystem-Simulation lief über den Industrie-PC im Kofferraum des Fahrzeugs.
- Die Datenaufzeichnung erfolgte über einen Laptop mit CAN-Karte, den der Versuchsleiter bei sich im Fond des Fahrzeugs hatte. Über diesen Laptop erfolgte auch die Versuchssteuerung, d. h. die Ausgabe der Anweisungen über Lautsprecher.



Abbildung 11.1: Versuchsfahrzeug

11.4.4 Datenaufzeichnung

Über eine geeignete Schnittstelle wurden aus dem Innenraum-CAN-Bus der Mercedes-Benz S-Klasse die Größen Geschwindigkeit, Lenkwinkel und Gaspedalstellung alle 20 ms ausgelesen. Der Versuchsleiter hatte darüber hinaus die Möglichkeit, während der laufenden Datenaufzeichnung die Messwerte mit dem Parameter Streckenabschnitt zu codieren. Des Weiteren konnte er zeitaktuell mitprotokollieren, ob die aufgezeichneten Daten aufgrund einer ungünstigen Verkehrssituation (z. B. stockender Verkehr) nicht brauchbar waren. Von einer Erfassung der Blickdaten wurde abgesehen. Zum einen wäre der technische Aufwand unverhältnismäßig gewesen, zum anderen war in der letzten Untersuchung festgestellt worden, dass die Blickdaten hoch mit den Fahrdaten korrelierten, sodass angenommen werden kann, dass aus der zusätzlichen Erfassung der Blickdaten kein zusätzlicher Erkenntnisgewinn hervorginge.

Der Versuchsleiter hatte die Aufgabe, während der Fahrt die akustischen Anweisungen für die jeweilige Bedienungsaufgabe manuell zu starten. Diese Betätigungen wurden aufgezeichnet, sodass darüber die Bediendauer für die einzelnen Bedienungsaufgaben berechnet werden konnte. Daneben wurde im Anschluss an die einzelnen Streckenabschnitte die Befragung der Probanden durch den Versuchsleiter handschriftlich mitprotokolliert.

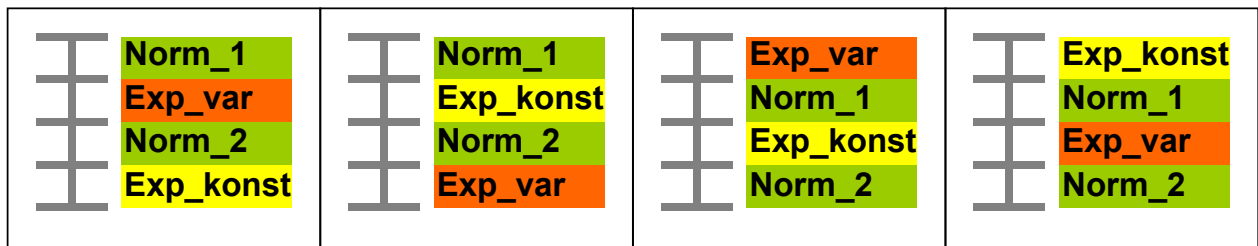
11.4.5 Versuchsdesign

Wie bereits beschrieben, gab es bei diesem Versuch die zwei verschiedenen Versuchsumgebungen Einfahrbahn und Schnellstraße. Sie werden im folgenden Kapitel näher erläutert. Bei Vpn, die sowohl auf der Einfahrbahn als auch auf der Schnellstraße fuhren, war die Reihenfolge der Versuchsumgebungen permutiert.

Für jede Versuchsumgebung beinhaltet der Versuch folgende Teile:

- **zwei Streckenabschnitte unter Normbedingung:** Hierbei mussten die Vpn keine Bedienungsaufgaben bearbeiten und konnten sich ausschließlich auf das Fahren konzentrieren.
- **ein Streckenabschnitt mit Experimentalbedingung „variable Haptik“:** Hierbei wurden die Vpn angewiesen, Aufgaben mit dem Joystick mit variabler Haptik zu bearbeiten.
- **ein Streckenabschnitt mit Experimentalbedingung „konstante Haptik“:** Hierbei wurden die Vpn angewiesen, Aufgaben mit dem Joystick mit konstanter Haptik zu bearbeiten.

Die vollständige Permutation ergibt folgende Reihenfolgen:



Ein Streckenabschnitt entspricht dabei auf der Einfahrbahn einer Runde des Versuchskurses und auf der Schnellstraße einem Streckenabschnitt.

11.5 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf entspricht prinzipiell dem zweiten Teil des vorangegangenen Simulatorexperiments. Die Vpn hatten wieder die Aufgabe, typische Bedienabläufe, wie sie beim täglichen Gebrauch eines Navigationssystems auftreten, in permutierter Reihenfolge zu bearbeiten.

Im Folgenden werden die zwei Versuchsstrecken noch näher erläutert:

- **Einfahrbahn:** Wie bereits beschrieben, hatten die Vpn hier die Aufgabe, einen Rundkurs mit schlechtem Fahrbelag mit 40 km/h unter Zuhilfenahme des Tempomats zu fahren. Zuvor wurde ihnen der genaue Streckenablauf gezeigt und auf spezielle Gefahrenquellen der Einfahrbahn hingewiesen. Eine Runde entsprach dann einer Norm- bzw. Experimentalstrecke, wobei die Reihenfolgen permutiert waren.

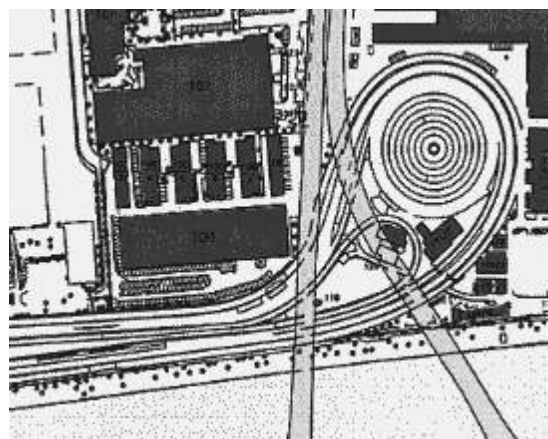


Abbildung 11.2: Einfahrbahn

- **Schnellstraße:** Auf der Schnellstraße entsprach ein Durchgang dem Streckenabschnitt der B10 zwischen Stuttgart-Untertürkheim und Esslingen-Mettingen bzw. in umgekehrter Richtung. Da es sich hierbei um einen sehr geraden Streckenabschnitt handelt, sind die beiden Fahrtrichtungen auch in Bezug auf den Lenkwinkel problemlos vergleichbar, wie Voruntersuchungen zeigten. Die Reihenfolge der Norm- und Experimentalstrecken sowie der Bedienung mit variabler und konstanter Haptik war wiederum permutiert.

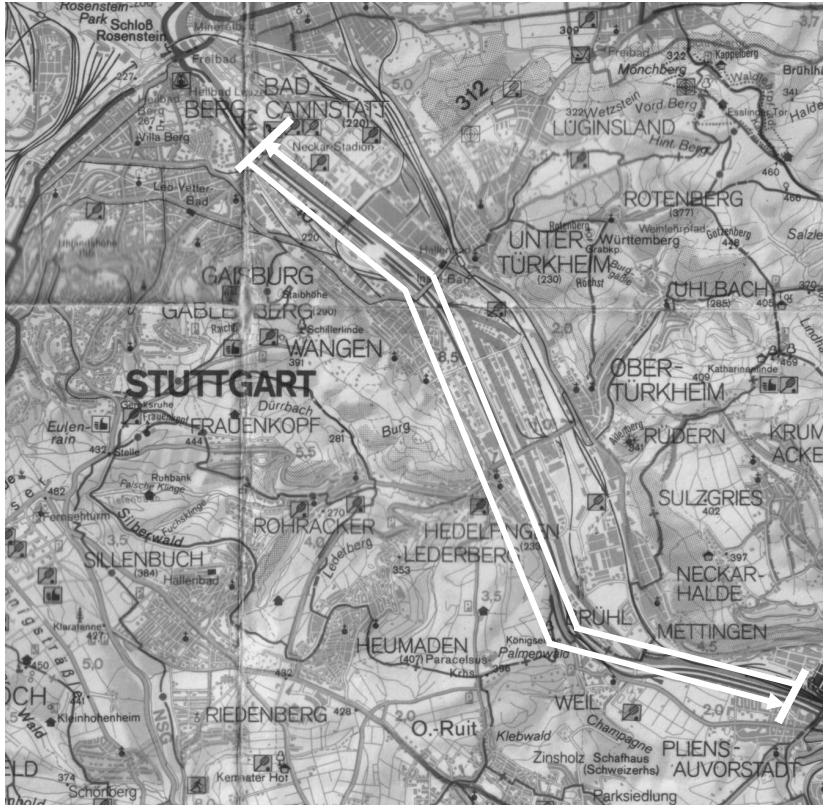


Abbildung 11.3: Versuchsumgebung Schnellstraße

11.6 Ergebnisse

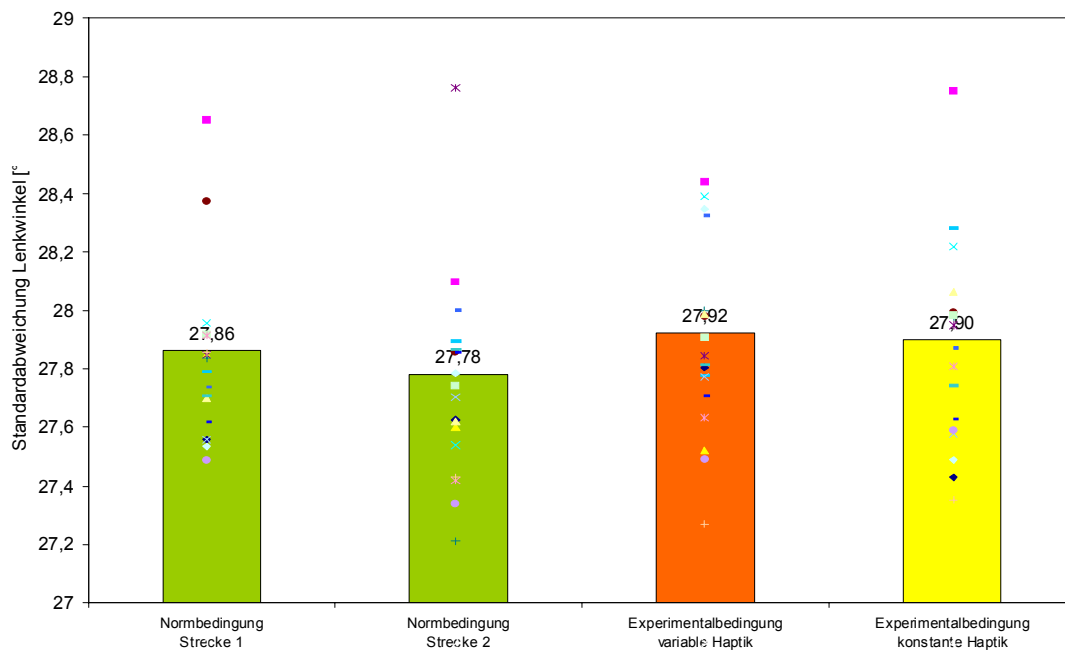
Zur Ergebnisdarstellung ist anzumerken, dass die Balken immer den Durchschnitt darstellen und die Punkte die einzelnen Messwerte zur Verdeutlichung der Streuung zeigen.

11.6.1 Einfahrbahn

Die Ergebnisse sind anhand der einzelnen abhängigen Variablen dargestellt.

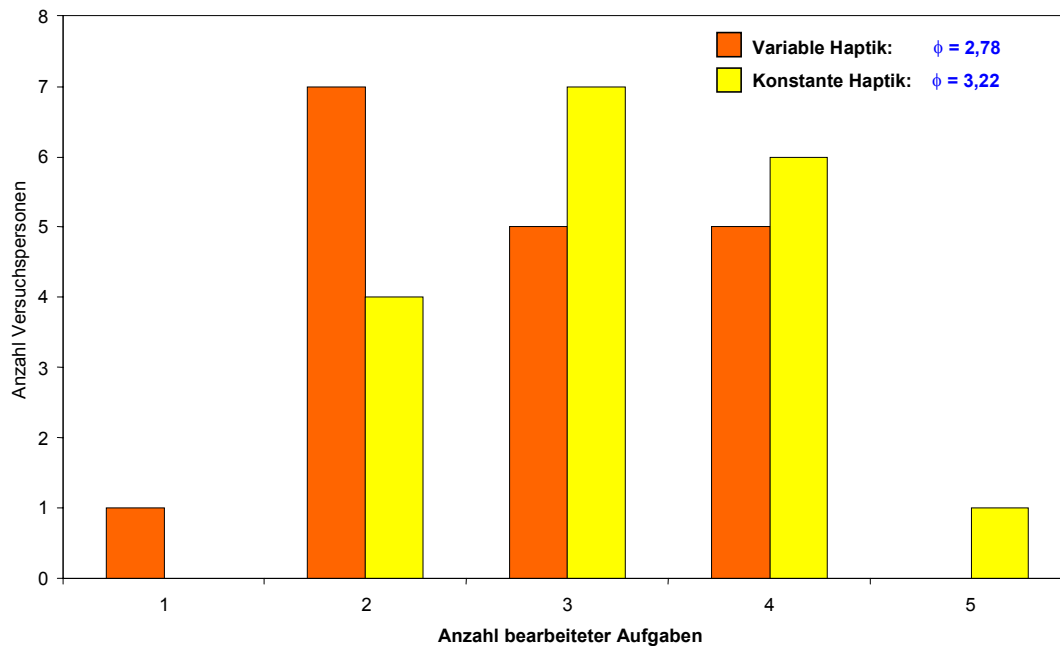
Standardabweichung Lenkwinkel:

Die Werte sind unter Experimental- und Normbedingungen nahezu gleich, auch zwischen variabler und konstanter Haptik besteht nahezu kein Unterschied (vgl. Abbildung auf der nächsten Seite). Die einfaktorielle Varianzanalyse ($n = 18$) ergibt $p = .220$, der Unterschied ist also nicht signifikant. Die Fahrleistungen sind bei beiden Varianten fast identisch.



Anzahl bearbeiteter Aufgaben:

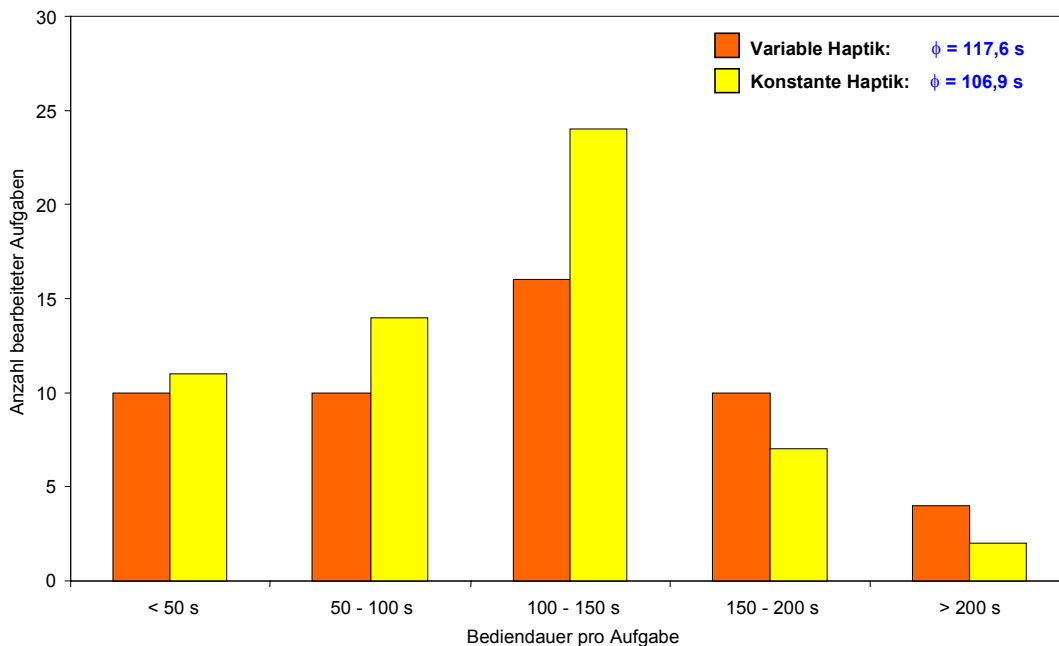
Im folgenden Diagramm ist dargestellt, wie viele Vpn wie viele Bedienaufgaben während eines Streckenabschnitts bearbeiten konnten:



Man sieht, dass mit konstanter Haptik im Durchschnitt eine halbe Aufgabe mehr bearbeitet werden konnte als mit variabler Haptik. Dieser Unterschied ist zwar nicht signifikant (t-Test mit gepaarten Stichproben ($n = 18$): $p = .149$), jedoch deutlich erkennbar.

Bediendauer pro Aufgabe:

Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn man die Anzahl bearbeiteter Aufgaben nach der dafür benötigten Bediendauer gruppiert:



Mit konstanter Haptik benötigen die Vpn im Durchschnitt fast 11 s weniger für die Bearbeitung einer Aufgabe. Auch hier ist der Unterschied nicht signifikant. Der t-Test mit unabhängigen Stichproben ($n = 18$) liefert $p = .326$.

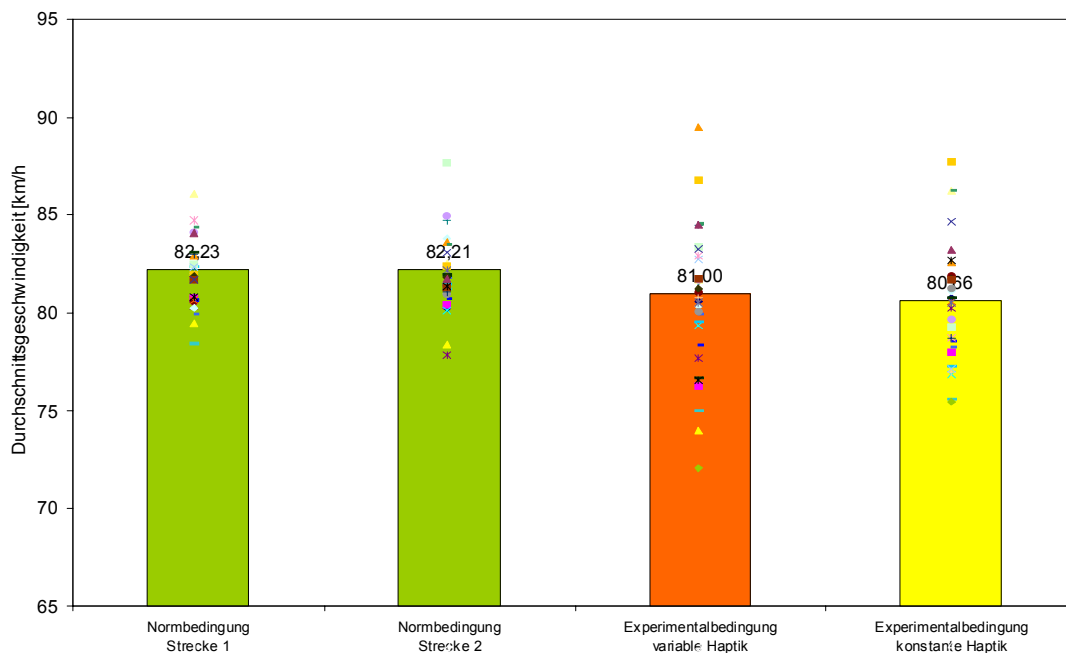
Zusammenfassend ist zu sagen, dass bei nahezu identischen Fahrleistungen mit konstanter Haptik tendenziell mehr Bedienaufgaben bearbeitet werden konnten.

11.6.2 Schnellstraße

Die Ergebnisse der Versuchsumgebung Schnellstraße sind ebenfalls anhand der einzelnen abhängigen Variablen dargestellt.

Durchschnittsgeschwindigkeit:

Im Gegensatz zur Einfahrbahn, wo durch das Fahren mit Tempomat die Geschwindigkeit konstant gehalten wurde, ist auf der Schnellstraße die Geschwindigkeit eine aufschlussreiche abhängige Variable. Er sagt aus, wie weit die Probanden der Anweisung nachkamen, möglichst genau die vorgeschriebenen 80 km/h zu fahren. Das Diagramm auf der nächsten Seite zeigt die Durchschnittsgeschwindigkeit für die verschiedenen Bedingungen.

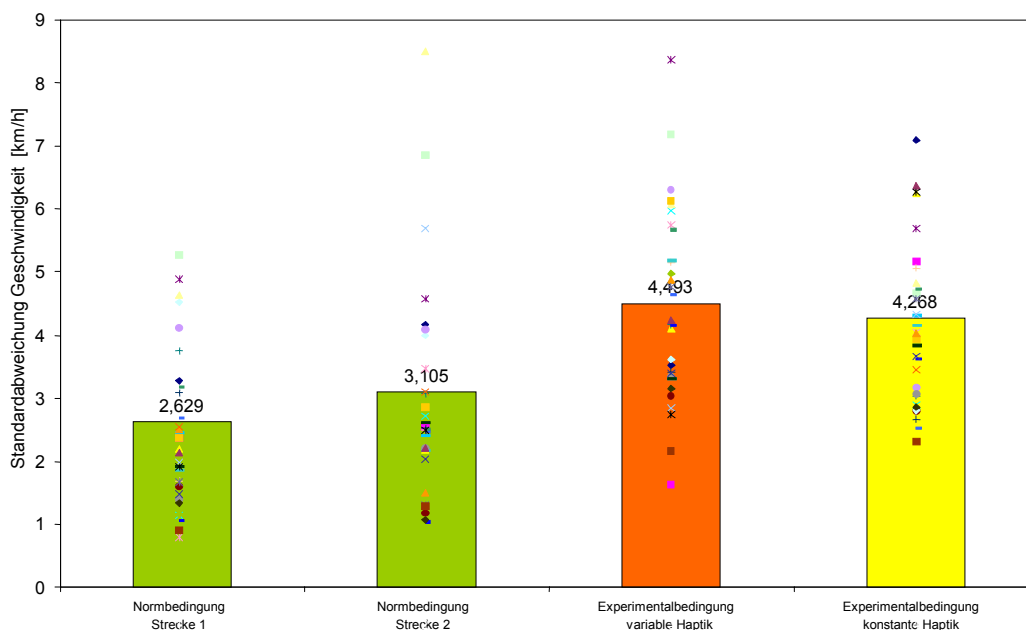


Wie wir sehen, fahren die Vpn während den Experimentalbedingungen langsamer als unter Normbedingung. Dies steht im Einklang u. a. zu den Ergebnissen von BROWN. Dieser konnte bereits 1965 nachweisen, dass Autofahrer ihre Geschwindigkeit reduzieren, wenn sie zusätzliche Unterhaltungsmusik dargeboten bekommen [nach FÄRBER, 1987]. Gemäß der einfaktoriellen Varianzanalyse ($n = 32$) ist der Unterschied hochsignifikant: $p = .002$. Der anschließende Scheffé-Test zeigt, dass zwischen der Experimentalbedingung „Konstante Haptik“ und den beiden Strecken unter Normbedingung ein signifikanter Unterschied besteht ($p = .023$ und $p = .025$).

Kaum ein Unterschied besteht zwischen variabler und konstanter Haptik. Während der Bedienung mit konstanter Haptik fahren die Probanden minimal langsamer als während der Bedienung mit variabler Haptik.

Standardabweichung Geschwindigkeit:

Die Standardabweichung der Geschwindigkeit gibt Aufschluss darüber, wie gleichmäßig die Probanden in Bezug auf die Geschwindigkeit gefahren sind:

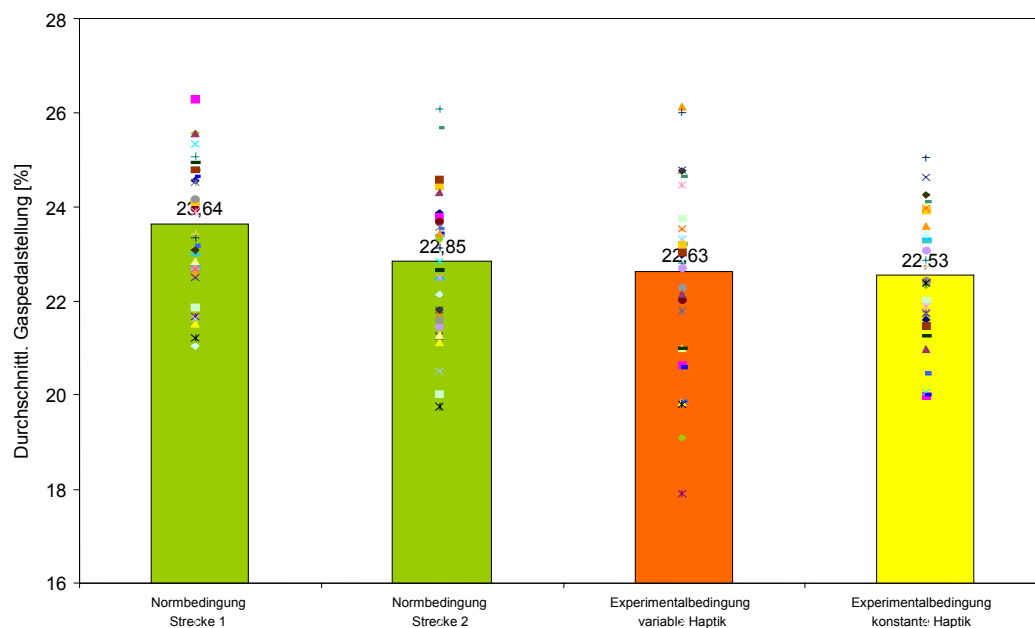


Wir sehen, dass die Werte der Experimentalbedingungen deutlich höher sind als die der Normbedingungen. Zwischen den beiden Experimentalbedingungen und den Normbedingungen besteht ein hochsignifikanter Unterschied (einfaktorielle Varianzanalyse (n = 32): p = .000). Der anschließende Scheffé-Test ermittelt die größten Unterschiede zwischen der ersten Strecke unter Normbedingung und den Experimentalbedingungen „variable Haptik“ (p = .000) und „konstante Haptik“ (p = .000). Das Ergebnis besagt, dass die Vpn während sie Bedienungsaufgaben bearbeiten sollten signifikant stärker von der vorgeschriebenen Geschwindigkeit abweichen als unter Normbedingung, bei der sie sich allein auf die Fahraufgabe konzentrieren konnten. Dies kann dadurch erklärt werden, dass eine Umverschiebung in der Kapazitätsverteilung zwischen der Primär- und der Sekundäraufgabe stattfindet.

Der Wert für variable Haptik ist etwas größer als der für konstante Haptik, der Unterschied ist aber nicht bedeutsam.

Durchschnitt Gaspedalstellung:

Als weitere abhängige Variable kommt bei der Versuchsumgebung Schnellstraße die Gaspedalstellung dazu. Hierzu wurde die Stellung des Gaspedals alle 20ms aus dem CAN-C-Bus des Versuchsfahrzeugs ausgelesen. Der Wertebereich reicht dabei von 0% (nicht gedrückt) bis 100% (Vollgas). Das folgende Diagramm zeigt die durchschnittliche Gaspedalstellung während der einzelnen Streckenabschnitte:

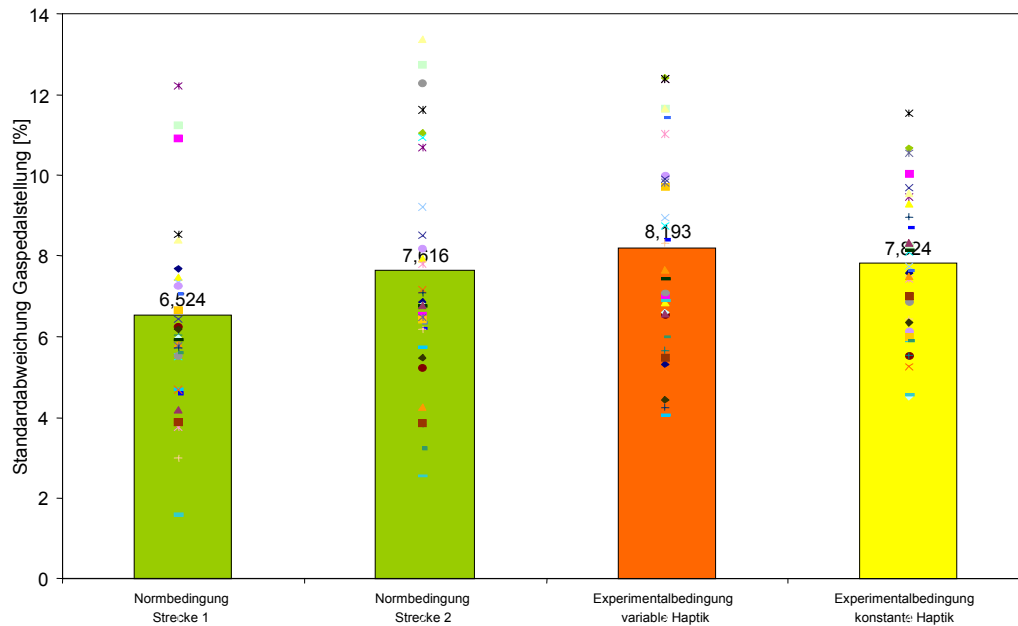


Wie der physikalische Zusammenhang zwischen der Stellung des Gaspedals und der resultierenden Geschwindigkeit bereits vermuten lässt, sind die Werte für die Normbedingung etwas größer als die für die Experimentalbedingungen. Die einfaktorielle Varianzanalyse (n = 32) ergibt, dass die Werte sich signifikant von einer Gleichverteilung unterscheiden: p = .020. Eine genaue Analyse mittels anschließendem Scheffé-Test ergibt signifikante Unterschiede zwischen der ersten Strecke unter Normbedingung und den beiden Experimentalbedingungen (p = .021 und p = .043).

Zwischen variabler und konstanter Haptik besteht kein nennenswerter Unterschied.

Standardabweichung Gaspedalstellung:

Wie schon für die Geschwindigkeit, wurde auch für die Gaspedalstellung die Standardabweichung berechnet. Es zeigt sich keine eindeutige Verteilung:



Die statistische Auswertung mittels einfaktorieller Varianzanalyse ($n = 32$) ergibt allerdings wieder einen signifikanten Unterschied ($p = .001$). Die Überprüfung durch den anschließenden Scheffé-Test ergibt signifikante Unterschiede zwischen der ersten Strecke unter Normbedingung und den beiden Experimentalbedingungen. Es zeigt sich hier, dass der Autofahrer relativ konstant Gas gibt. Dies lässt sich so erklären, dass der Benutzer eine bestimmte Gaspedalstellung wählt. Erst nach gewisser Zeit schaut er wieder auf den Tachometer und korrigiert die Fußposition entsprechend der gewünschten Geschwindigkeit. Aus diesem Grund ist die Standardabweichung der Gaspedalstellung deutlich geringer als die der Geschwindigkeit.

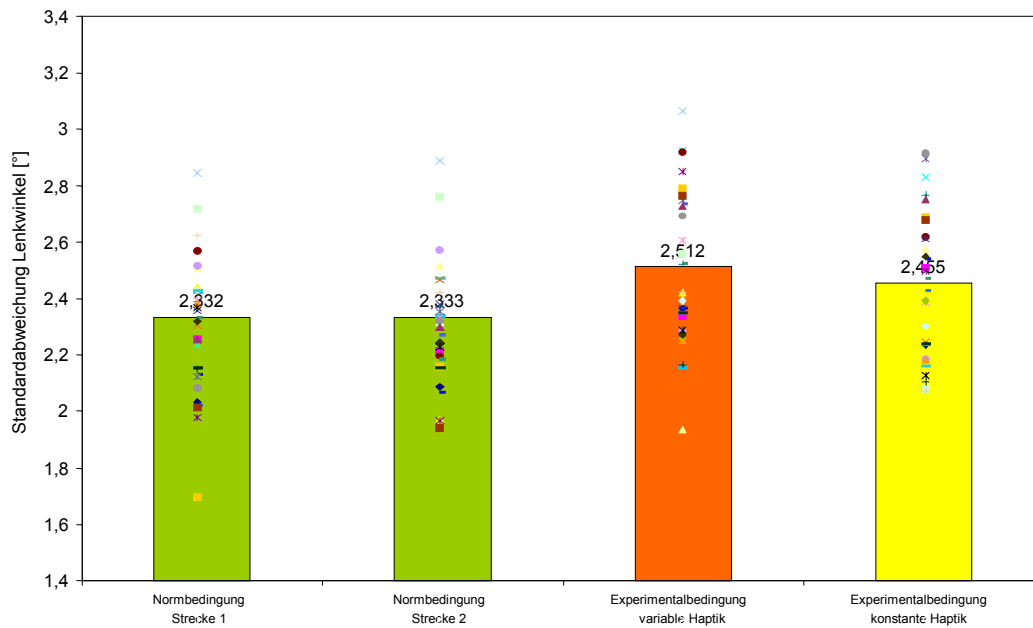
Auch hierbei ist der Unterschied zwischen variabler und konstanter Haptik unbedeutend.

Standardabweichung Lenkwinkel:

Wie für die Einfahrbahn soll auch für die Schnellstraße die Standardabweichung des Lenkwinkels als Maß für die Spurhalteleistung dienen. Die Werte sind auf der nächsten Seite dargestellt.

Zunächst ergibt die einfaktorielle Varianzanalyse ($n = 32$) einen hochsignifikanten Unterschied gegenüber Gleichverteilung: $p = .003$. Wiederum sind erhebliche Unterschiede in den Werten unter Normbedingung und denen unter Experimentalbedingung zu beobachten. Die Standardabweichung des Lenkwinkels ist bei variabler Haptik am größten. Er unterscheidet sich signifikant von den Werten der Normbedingungen wie der anschließende Scheffé-Test zeigt ($p = .022$ und $p = .023$). Der Wert für konstante Haptik liegt dazwischen.

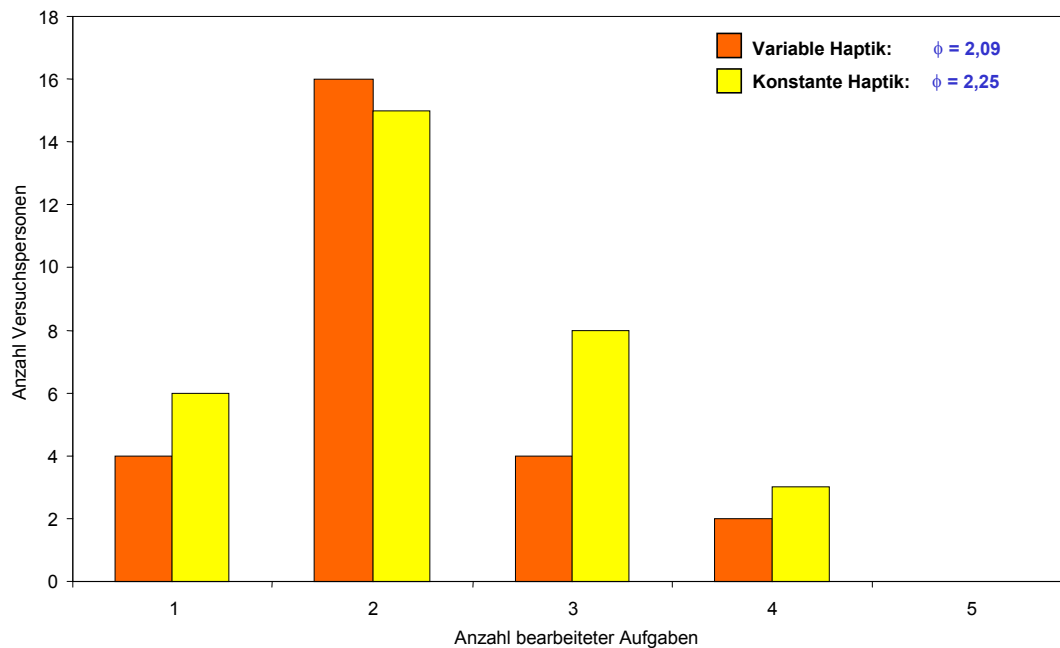
Zwar ist die Standardabweichung des Lenkwinkels bei Bedienung mit variabler Haptik größer als bei konstanter Haptik, der Unterschied ist jedoch ebenfalls statistisch nicht bedeutsam.



Eine zusammenfassende Betrachtung der auf der Schnellstraße aufgezeichneten Fahrdaten ergibt, dass sich alle abhängigen Variablen von der Gleichverteilung unterscheiden. Dabei sind jedoch ausschließlich die Unterschiede zwischen Norm- und Experimentalbedingungen signifikant. Die Unterschiede zwischen variabler Haptik und konstanter Haptik sind gering und auch nicht gleich gerichtet. So schneidet im einen Fall variable Haptik, im anderen Fall konstante Haptik besser ab.

Anzahl bearbeiteter Aufgaben:

Im folgenden Diagramm ist nun dargestellt, wie viel Aufgaben die Versuchspersonen während eines Streckenabschnitts auf der Schnellstraße bearbeiten konnten:

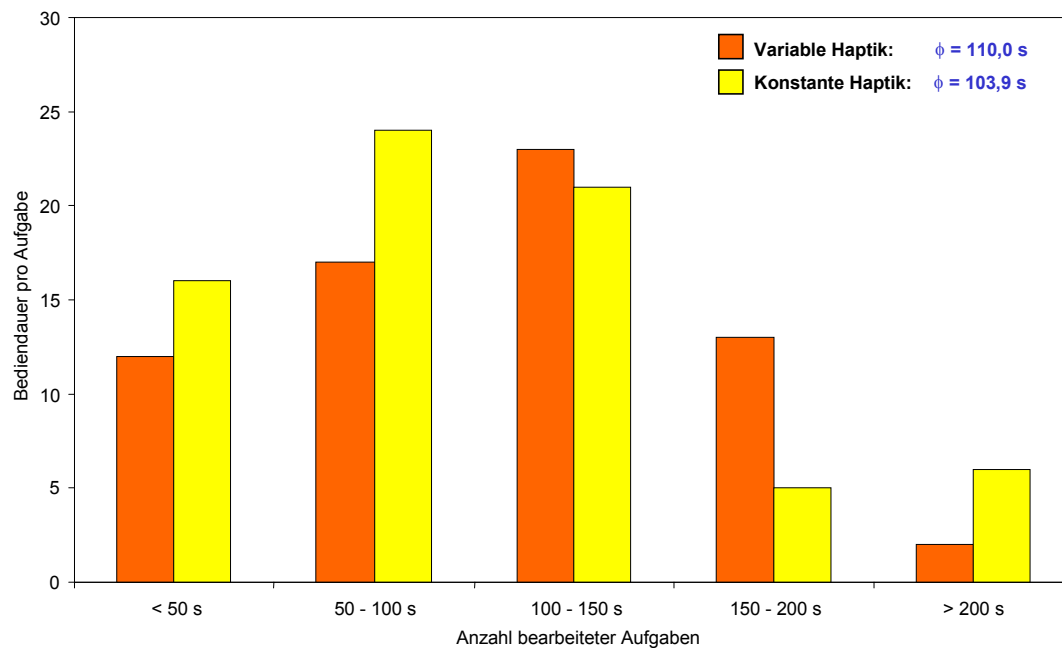


Obwohl hier ebenfalls auf der Schnellstraße mit konstanter Haptik etwas mehr Aufgaben als mit variabler Haptik bearbeitet werden konnten, zeigt der t-Test bei gepaarten Stichproben ($n = 32$), dass die Werte aus statistischer Sicht als gleich zu bewerten

sind: $p = .361$. Es ist hier also kein Unterschied zwischen den beiden Haptikvarianten festzustellen.

Bediendauer pro Aufgabe:

Wie schon bei der Versuchsumgebung Einfahrbahn bietet die benötigte Bediendauer pro Aufgabe ein ähnliches Bild. Auch hier ist kein signifikanter Unterschied zwischen variabler und konstanter Haptik vorhanden (t-Test bei gepaarten Stichproben ($n = 32$): $p = .500$).



Zusammenfassend ist zu den Ergebnissen der Versuchsumgebung Schnellstraße zu sagen, dass bei statistisch gleich guten bzw. schlechten Fahrleistungen mit konstanter Haptik etwas mehr bzw. etwas schneller Bedienaufgaben bearbeitet werden konnten. Statistisch gesehen sind die Ergebnisse jedoch gleich.

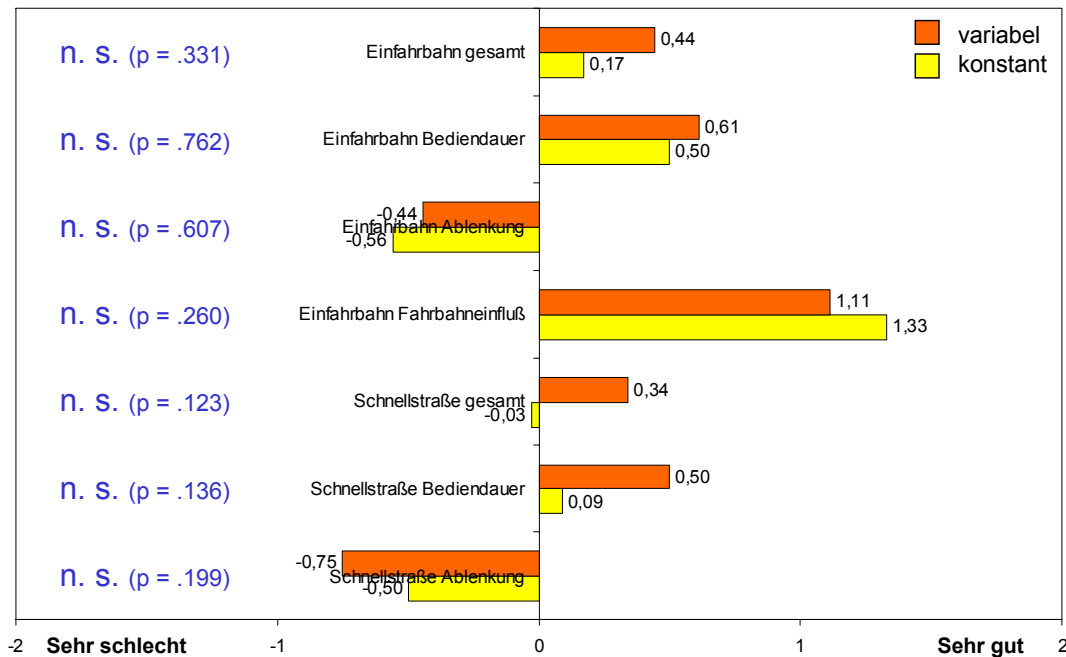
11.6.3 Subjektive Bewertung

Die subjektive Bewertung der beiden Bedienarten ist in dem Diagramm auf der nächsten Seite dargestellt. Abgefragt wurde jeweils eine Gesamtbewertung sowie speziell im Hinblick auf die benötigte Bediendauer und die durch die Bedienung entstandene subjektive Ablenkungswirkung. Bei der Versuchsumgebung Einfahrbahn wurde zusätzlich der empfundene Einfluss der Fahrbahnunebenheiten abgefragt. Prüfverfahren war jeweils der t-Test bei gepaarten Stichproben mit $n = 18$ für die Einfahrbahn und $n = 32$ für die Schnellstraße.

Bei der Gesamtbewertung und bei der Bewertung der benötigten Bediendauer wird die variable Haptik sowohl auf der Einfahrbahn als auch auf der Schnellstraße besser bewertet, wobei die Unterschiede auf der Schnellstraße größer sind. Die Werte auf der Einfahrbahn sind durchweg leicht besser als auf der Schnellstraße. Dies entspricht der empfundenen Ablenkungswirkung.

Der Einfluss von Fahrbahnunebenheiten wird als gering empfunden, wobei der empfundene Einfluss bei konstanter Haptik noch kleiner ist als bei variabler Haptik. Ande-

rerseits ist der Unterschied zwischen variabler und konstanter Haptik auf der Einfahr-
bahn leicht kleiner als auf der Schnellstraße. Es könnte sein, dass dies auf den Einfluss
von Fahrbahnunebenheiten zurückzuführen ist.



11.7 Diskussion

Die Versuchsergebnisse des vorliegenden Feldexperiments werden zunächst zusammenfassend betrachtet:

- Es konnte ein eindrucksvoller Nachweis der Ablenkungswirkung von Bedienung während des Fahrens erbracht werden. Während der Fahrt auf einer Schnellstraße mit 80 km/h ergaben sich bei allen abhängigen Variablen signifikante Unterschiede zwischen Norm- und Experimentalbedingungen. Somit belegt jede abhängige Variable den Unterschied im Fahrverhalten zwischen ausschließlichem Fahren und zusätzlichem Bearbeiten von Bedienungsaufgaben.
- Der Unterschied zwischen variabler und konstanter Haptik ist dabei statistisch nicht bedeutsam. Es ergaben sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen variabler und konstanter Haptik. Sind die Fahrdaten qualitativ als gleich zu bewerten, so deuten die Bediendaten darauf hin, dass Bedienung mit variabler Haptik den Benutzer etwas mehr beansprucht als Bedienung mit konstanter Haptik.
- Subjektiv hingegen wird wiederum variable Haptik gegenüber konstanter Haptik bevorzugt. Zwar sind die Unterschiede hier nicht signifikant, doch weisen die Ergebnisse eine einheitliche Tendenz auf.
- Der Einfluss von Fahrbahnunebenheiten auf Bedienung mit variabler und konstanter Haptik kann als gering angesehen werden.

11.8 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse des Feldexperiments bestätigen weitgehend die Ergebnisse der Untersuchung im Fahrsimulator: Die stärkere Verwendung des haptischen Sinneskanals bei Bedienung mit variabler Haptik führt nicht nachweisbar zu einer Reduzierung der visuellen Ablenkung und der kognitiven Beanspruchung. Zumindest beim heutigen Stand der Technik bietet variable Haptik keine objektiven Vorteile bei der Bedienung eines Fahrerinformationssystems. Eindeutig schlechteres Fahrverhalten als bei Bedienung mit konstanter Haptik konnte allerdings auch nicht nachgewiesen werden. Wie im Simulatorexperiment bewerteten auch im Feldexperiment die Vpn subjektiv variable Haptik besser als konstante Haptik. Dies steht im Widerspruch zu den Ergebnissen der objektiven Messgrößen.

11.9 Vergleich der Versuchsumgebungen

Da im vorangegangenen Versuch variable mit konstanter Haptik anhand eines vergleichbaren Versuchsdesigns in einem Simulatorexperiment verglichen wurde, lassen sich die Ergebnisse aus drei Versuchsumgebungen miteinander vergleichen. Dies soll getrennt für Fahr- und Bediendaten sowie für die subjektive Bewertung erfolgen:

- **Fahrdaten:** Der Vergleich der Fahrdaten der drei Versuchsumgebungen liefert folgende Ergebnisse:
 - Neben den hochsignifikanten Unterschieden zwischen Norm- und Experimentalbedingungen bei den Variablen Durchschnittsgeschwindigkeit, SD Lenkwinkel und SD Querabweichung im Simulatorexperiment konnte auch für die Variablen Durchschnittsgeschwindigkeit, SD Geschwindigkeit, Durchschnitt und SD Gaspedalstellung sowie SD Lenkwinkel auf der Schnellstraße ein signifikanter Unterschied erbracht werden.
 - Bei insgesamt vier abhängigen Variablen im Simulatorexperiment und einer auf der Einfahrbahn schneidet konstante Haptik tendenziell besser ab als variable Haptik. Ein statistisch signifikanter Unterschied ergab sich allerdings nirgends. Auf der Schnellstraße zeigt sich dagegen ein uneinheitliches Bild. Man sieht daran sehr schön, dass das Fahren in realer Umgebung aufgrund der drastischen Auswirkungen auch auf die eigene Sicherheit einen größeren Aufforderungscharakter hat als das Fahren im Simulator. Die Folge davon ist, dass die Fahrdaten auf der Schnellstraße nahezu gleich sind. Im Simulator werden die Unterschiede durch schlechteres Fahren kompensiert, die Bediendaten haben dafür die gleiche Güte.
- **Bediendaten:** Beim Vergleich der Bedienperformanz zeigt sich Folgendes:
 - Im Fahrsimulator war die Anzahl bearbeiteter Aufgaben bei beiden Varianten praktisch gleich.
 - Auf der Einfahrbahn ergaben sich tendenzielle Unterschiede zwischen variabler und konstanter Haptik. Dies kann man sich dadurch erklären, dass hier die Vpn nicht die Möglichkeit hatten, die größere notwendige Aufmerksamkeit für die Bedienaufgabe durch Einbußen in der Fahrleistung zu kompensieren. Andererseits kann man aber auch sagen, dass selbst bei erzwungenen identischen Fahrleistungen die Unterschiede immer noch nicht signifikant sind.

Die relativ großen Unterschiede könnten durchaus auch, wie bereits beschrieben, damit zusammenhängen, dass Fahrbahnunebenheiten und deren Einfluss auf das Hand-Arm-Oberkörper-System doch eine Rolle spielen.

- Die Bediendaten der Schnellstrasse liegen qualitativ zwischen denen des Fahr-simulators und denen der Einfahrbahn. Das passt gut zu den Fahrleistungen der drei Versuchsumgebungen:

Versuchsumgebung	Fahrsimulator	Schnellstraße	Einfahrbahn
Fahrleistungen	Große Unterschiede	Kleine Unterschiede	Kein Unterschied
Bedienleistungen	Kein Unterschied	Sehr kleine Unterschiede	Kleine Unterschiede

- **Subjektive Bewertung:** Durchweg wird variable Haptik besser bewertet als konstante Haptik. Im Simulatorexperiment konnte dies anhand mehrfacher signifikanter Unterschiede nachgewiesen werden. Auch bei der Bewertung auf der Einfahrbahn und auf der Schnellstraße schneidet variable Haptik besser ab. Allerdings ist bei diesen Versuchsumgebungen bei keiner Variablen der Unterschied signifikant.

Der Vergleich der Versuchsumgebungen liefert folgenden Zusammenhang zwischen subjektiver Bewertung und objektiven Bedienleistungen:

Versuchsumgebung	Fahrsimulator	Schnellstraße	Einfahrbahn
Bedienleistungen	Kein Unterschied	Sehr kleine Unterschiede	Kleine Unterschiede
Subjektive Bewertung	Variable Haptik wird signifikant besser bewertet	Variable Haptik wird deutlich besser bewertet	Variable Haptik wird nur leicht besser bewertet

Abschließend ist zu sagen, dass nur die Durchführung eines Simulator- und eines Feldexperiments mit vergleichbarem Versuchsdesign ein aussagekräftiges Gesamtbild ergibt. Treten im Fahrsimulator die Unterschiede zwischen Varianten durch die Kontrolle möglichst vieler Randbedingungen stärker zum Vorschein, so bestechen die Ergebnisse des Feldexperiments durch ihre hohe externe Validität. Will man ein möglichst realistisches Bild der Zusammenhänge bekommen, so ist also sicherlich ein Feldexperiment durchzuführen. Doch erst der Vergleich der Ergebnisse aus den beiden Versuchsumgebungen – wie in diesem Kapitel geschehen - ermöglicht eine ganzheitliche Interpretation und lässt weitere Schlüsse zu.

12 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Vor einer abschließenden Gesamtinterpretation werden die in den insgesamt sechs Probandenuntersuchungen gefunden Ergebnisse zusammengefasst:

Der experimentelle Teil der Arbeit begann mit einer psychophysischen Grundlagenuntersuchung zum Zusammenhang zwischen Reiz und haptischer Wahrnehmung. Für den aktiven haptischen Joystick konnten für die haptischen Gestaltungsparameter Betätigungskraft und –weg die Differenzierbarkeit von Faktorstufen nachgewiesen werden.

Im darauf folgenden Experiment wurden die haptischen Gestaltungsparameter Betätigungskraft, –weg und Druckpunkt des aktiven haptischen Joysticks systematisch untersucht. 26 Vpn bewerteten während der Fahrt im Simulator Haptik-Varianten in Form von Paarvergleichen danach, inwieweit eine erfolgte Betätigung durch Auslenken des Joysticks haptisch erkennbar war. Es stellte sich heraus, dass große Betätigungskräfte und ein auf den Betätigungsweg bezogen später Druckpunkt die Erkennbarkeit einer erfolgten Betätigung am besten unterstützen. In Bezug auf die Betätigungsrichtung konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde über alternative Ausprägungen des Multifunktionsbedienelements nachgedacht. Besonders interessant erschien dabei die Entwicklung eines aktiven haptischen Schiebestellers, da es hierbei nicht zu einem unerwünschten Drehmoment bei Betätigen des integrierten Drucktasters kommt. Der Vergleich der zwei Varianten Joystick und Schiebesteller sollte anhand der Interaktionsaufgaben Menüauswahl, Listenauswahl und Alphanumerische Eingabe stattfinden. Hierfür wurden Anwendungen konzipiert und programmiert. Es wurde wiederum eine Probandenuntersuchung durchgeführt, bei der 29 Vpn während der Fahrt im Simulator die oben aufgeführten Bedienaufgaben mit den zwei Bedienelementen durchführen sollten. Dabei wurden zusätzlich haptische Parameter wie Betätigungskraft und Druckpunkt variiert. Insgesamt schnitt der Joystick besser ab, wobei deutliche Unterschiede sowohl bezüglich der einzelnen abhängigen Variablen Bediendauer, Bedienfehler und subjektive Bewertung als auch zwischen den Interaktionsaufgaben festzustellen waren. Der Vorteil des Joysticks liegt vermutlich im motorisch wesentlich präziser ausführbaren Vorgang der Bedienung. So wird dieser durch eine leichte Drehung des Handgelenks betätigt, wohingegen beim Schiebesteller mehrere Finger z. T. erheblich bewegt werden müssen. Bezüglich haptischer Parameter konnte ein Geschwindigkeits-Genauigkeits-Widerspruch in der Art nachgewiesen werden, dass bei Einstellungen, mit denen am schnellsten Bedienaufgaben bearbeitet werden konnten, sich auch die meisten Fehler ereigneten und umgekehrt.

Während der Konzipierung der Interaktionsaufgabe Alphanumerische Eingabe für das vorangegangene Experiment ergab sich die Frage, welche Benutzeroberfläche für die Eingabe mit dem aktiven haptischen Joystick am besten geeignet ist. Es wurden daraufhin folgende Varianten der Zeichenanordnung entwickelt und in einer Probandenuntersuchung verglichen: die „Qwertz“-Anordnung der Schreibmaschinentastatur, eine Anordnung in alphabetischer Reihenfolge, die Telefonanordnung 10er-Block sowie zwei neu konzipierte Eingabeoberflächen mit polarer Anordnung. Insgesamt 28 Personen nahmen an der Untersuchung teil, welche erstmals in dem für diese Arbeit modifizierten Versuchsfahrzeug im Stand durchgeführt wurde. Über alle abhängigen Variablen Bediendauer, Bedienfehler und subjektive Bewertung hinweg ergaben sich für die „Qwertz“-Anordnung die besten Ergebnisse, wobei die Unterschiede zur „ABC“-Anordnung nicht signifikant waren. Vielmehr konnte eine starke Abhängigkeit von der Art der Eingabeaufgabe nachgewiesen werden.

In dieser Arbeit wurde versucht, durch die verstärkte Nutzung des haptischen Sinneskanals bei der Bedienung eines Fahrerinformationssystems die visuelle Ablenkung und die kognitive Beanspruchung des Fahrers zu reduzieren. Dies erfolgte durch die Verwendung eines in seinen haptischen Eigenschaften frei programmierbaren Joysticks als Multifunktionsbedienelement. Die letzten zwei Experimente im Rahmen dieser Arbeit gingen der abschließenden Frage nach: Ist es aus ergonomischer Sicht vorteilhaft, wenn sich die Haptik eines Multifunktionsbedienelements ändert wenn sie oder konstant bleibt? Der aktive haptische Joystick wurde mit einem passiven konventionellen Joystick verglichen, welcher nach den Ergebnissen des ersten Experiments spezifiziert und aufgebaut wurde.

Zunächst sollte der Vergleich in Form eines Simulatorexperiments erfolgen. Die existierenden Anwendungen wurden zu den Bedienungsaufgaben Menüauswahl, Buchstabeneingabe mit Listenauswahl und Zieleingabe über Karte weiterentwickelt und schließlich zu einem rudimentären Navigationssystem verknüpft. Erfolgte der erste Teil der Untersuchung ähnlich wie der experimentelle Vergleich Joystick – Schiebester, so sollte im zweiten Teil speziell die Ablenkungswirkung näher beleuchtet werden. An der Untersuchung nahmen 30 Personen teil. Die Auswertung des ersten Versuchsteils ergab für die Bedienungsaufgabe Menüauswahl eine eindeutige Überlegenheit des Bedienelements mit mechanischer Kulissee. Hinsichtlich der Buchstabeneingabe mit Listenauswahl zeigte sich, dass die direkte Cursorpositionierung schneller, aber auch motorisch anspruchsvoller ist als sequentielles Auslenken, was insgesamt zu einem ausgeglichenen Ergebnis führte. Die Bedienungsaufgabe Zieleingabe über Karte erwies sich als eine Anwendung, bei der der Joystick mit variabler Haptik eindeutig überlegen ist. Im zweiten Versuchsteil wurde die Blickbewegung der Probanden sowie deren Spurhaltevermögen aufgezeichnet, während sie in dem Navigationssystem umfassende Bedienungsaufgaben während der Fahrt durchzuführen hatten. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede, obwohl eine stärkere Blickabwendung, eine reduzierte Geschwindigkeit und eine schlechtere Spurhaltung auf eine stärkere Ablenkung und höhere Beanspruchung bei variabler Haptik hindeuten. Bei der subjektiven Bewertung hingegen schnitt die variable Haptik mehrfach besser ab und wurde am Ende des Versuchs hochsignifikant bevorzugt. Zur Erklärung dieses offensichtlichen Widerspruchs ist es hilfreich, sich in die Lage der Vpn zu versetzen. Man kann annehmen, dass die Vpn bei variabler Haptik mehr Aufmerksamkeit auf die Bedienung verwendet hatten als bei konstanter Haptik. Sei es, weil sie sich dafür interessierten oder weil sie sich dazu aufgefordert fühlten. Dies führte a priori zu einer stärkeren Ablenkung und somit zu schlechteren Fahrdaten. Des Weiteren waren die Vpn bestrebt, die Bedienungsaufgaben mit variabler Haptik schneller abzuarbeiten. Offensichtlich nahmen sie aber nicht in dem Maße wahr, dass ihnen dabei auch mehr Bedienfehler unterliefen. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Qualität der variablen Haptik noch nicht so gut ist, dass zusätzliche Bedienfehler bei höherer Bediengeschwindigkeit vermieden werden können. Dennoch zeigen sich bei speziellen Aufgaben und Funktionen bereits eindeutige Vorteile für variable Haptik.

In einem weiteren Schritt wurde der Vergleich von variabler und konstanter Haptik in einem Feldversuch wiederholt. Zum einen unterscheiden sich die Versuchsumgebungen in den Beanspruchungen durch die Fahraufgabe, zum anderen ergeben sich für die Vpn durch die Informationen des kinästhetischen Sinneskanals realitätsnähere Bedingungen. Das Experiment wurde auf zwei verschiedenen Versuchsstrecken durchgeführt. Die Vpn fuhren einerseits auf einem Rundkurs mit schlechtem Fahrbahnbelag auf der Einfahrbahn von DaimlerChrysler in Untertürkheim. Hier sollte u. a. der Einfluss fahrdynamischer Schwingungen geklärt werden. Der andere Versuchsteil fand auf einem Teilstück der Schnellstraße B10 statt. An der Untersuchung nahmen insgesamt 32 Personen teil. Das Versuchsdesign orientierte sich am zweiten Teil des vorangegangenen Simulatorexperiments, als Hardware wurden dieselben Joysticks verwendet. Wie

die Auswertung zeigt, konnten die Vpn auf der Einfahrbahn bei nahezu identischen Fahrleistungen mit konstanter Haptik tendenziell schneller Bedienungsaufgaben bearbeiten. Auf der Schnellstraße konnte für die Variablen Durchschnittsgeschwindigkeit, SD Geschwindigkeit, Durchschnitt Gaspedalstellung, SD Gaspedalstellung und SD Lenkwinkel signifikante Unterschiede zwischen den Experimental- und Normbedingungen nachgewiesen werden. Die Unterschiede zwischen variabler und konstanter Haptik waren jedoch nicht signifikant und auch nicht gleich gerichtet. Mit konstanter Haptik konnten etwas mehr Bedienungsaufgaben bearbeitet werden. Wie im Simulatorexperiment beurteilten die Vpn die variable Haptik zwar nicht signifikant, dennoch durchweg besser als konstante Haptik. Der Einfluss von Fahrbahnunebenheiten auf die Bedienung wurde als gering empfunden.

Der Vergleich der Versuchsumgebungen zeigt eindrucksvoll den höheren Aufforderungscharakter des Feldversuchs. Kompensierten die Vpn im Simulator Beanspruchungsunterschiede durch schlechteres Fahren, so resultiert dies auf der Schnellstraße in unterschiedlichen Bedienleistungen, die Fahrdaten haben aber nahezu gleiche Qualität. Insgesamt ist festzustellen, dass das Feldexperiment die aussagekräftigeren Ergebnisse liefert. Im Fahrsimulator machen sich dagegen Unterschiede zwischen zwei Varianten stärker bemerkbar.

12 Interpretation und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde versucht, durch ein neu entwickeltes Bedien- und Anzeigekonzept den haptischen Sinneskanal in stärkerem Maße zur Informationsübertragung zwischen Fahrerinformationssystem und Fahrer zu nutzen. Konkret erfolgte dies durch die Verwendung eines aktiven haptischen Joysticks als Multifunktionsbedienelement. In insgesamt vier Probandenuntersuchungen wurden haptische Gestaltungsparameter und Bedienoberflächen des Bedien- und Anzeigekonzepts evaluiert. Für grundlegende Interaktionsarten wie Menüauswahl, Buchstabeneingabe mit Listenauswahl und Zieleingabe über Karte wurden die optischen und haptischen Anzeigen entwickelt und optimiert, wie sie bei Verwendung eines aktiven haptischen Joystick als Multifunktionsbedienelement aussehen könnten. Schließlich wurde die Bedienung eines Fahrerinformationssystems mit programmierter, variabler Haptik mit der Bedienung mit passiver, konstanter Haptik verglichen. Dabei wurde die generelle Fragestellung der Arbeit überprüft, ob die stärkere Verwendung des haptischen Sinneskanals

- zu einer Reduzierung der visuellen Ablenkung und
- zu einer Reduzierung der kognitiven Beanspruchung führt.

Die vielschichtigen Ergebnisse des durchgeführten Simulator- und Feldexperiments konnten die in Abschnitt 4.3 formulierten Hypothesen nicht pauschal bestätigen. Anhand der objektiven Messgrößen aus Erfassung der Fahrgüte und Blickbewegung, aber auch der Bedienperformanz konnten obige Effekte nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Dies darf jedoch nicht zu einem vorschnellen Gesamturteil über den Lösungsansatz dieser Arbeit führen. Spätestens bei der Frage nach dem Potenzial aktiver variabler Haptik sollten die gefundenen Ergebnisse nochmals folgendermaßen betrachtet werden:

- Bei keiner der drei Versuchsumgebungen konnte ein signifikanter Nachteil für die Bedienung mit variabler Haptik nachgewiesen werden. Es wurden zwar leichte Nachteile für variable Haptik festgestellt, diese waren jedoch nirgends signifikant. Das bedeutet, es konnte auch nicht bestätigt werden, dass die stärkere Nutzung des haptischen Sinneskanals zu einer verstärkten Aufmerksamkeitszuwendung und somit größerer Ablenkungswirkung führt.
- Bereits beim heutigen Stand der Technik konnten für einzelne Anwendungen bzw. Funktionen signifikante Vorteile für die Bedienung mit variabler Haptik im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesen werden. Erfolgt ist dies z. B. für eine Zieleingabe über Karte. Das Aufsuchen von Hyperlinks auf einer Internetseite wäre sicherlich ein weiteres, sehr geeignetes Anwendungsbeispiel.
- Subjektiv wurde variable Haptik mehrfach signifikant besser bewertet bzw. bevorzugt. Die Vpn hatten den Eindruck, mit variabler Haptik schneller und sicherer bedienen zu können. Auch die subjektiv empfundene Ablenkungswirkung war bei variabler Haptik geringer. Im Hinblick auf die subjektive Einschätzung der Vpn hat variable Haptik somit eindeutige Vorteile.

Insgesamt führt dies zu der Ansicht, dass ein Bedienelement mit variabler Haptik für die Bedienung eines Fahrerinformationssystems großes Potential besitzt. Sicherlich ist noch erheblicher technischer Verbesserungsbedarf nötig, bis eine von Elektromotoren erzeugte Haptik die gleiche Qualität besitzt wie eine mechanische Kulissee. Man kann jedoch davon ausgehen, dass mit verbesserter Technik auch z. B. signifikante Nachtei-

le wie bei der Menüauswahl schließlich behoben werden können. Weitere Entwicklungen sollten deshalb vor allem auf die Realisierung hoher und stabiler Kräfte zur Definition von Schaltkulissen abzielen. Die Vorteile variabler Haptik bei speziellen Funktionen sowie die gewonnene Flexibilität in der Gestaltung der haptischen Schnittstelle werden irgendwann die noch existierenden Nachteile in der Qualität der Haptik überwiegen. Bereits heute ist das Potenzial eines aktiven haptischen Bedienelements klar erkennbar, sodass mittelfristig wahrscheinlich Bedienelemente mit variabler Haptik für die Interaktion von Fahrerinformationssystemen einem herkömmlichen Bedienelement überlegen sein werden. In dieser Arbeit wurde aufgezeigt, dass aktive variable Haptik Potenzial für eine optimierte Mensch-Maschine-Schnittstelle bietet.

Neben der Bedienung eines Fahrerinformationssystems kann man sich in Zukunft weitere Anwendungsgebiete aktiver variabler Haptik im Kraftfahrzeug vorstellen. Entwicklungen wie Shift-by-wire und Drive-by-wire sehen keine mechanische Verbindung mehr zwischen Bedienelement und den technischen Komponenten vor, die die Funktion ausüben. Unter dieser Prämisse kann etwa auch die Haptik der primären Bedienelemente Schalthebel und Lenkrad völlig neu gestaltet werden. Wünsche nach einer personalisierten bzw. individualisierten Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle im Kraftfahrzeug könnte mit der Verwendung dieser Technologie nachgekommen werden. Die Gestaltung des gesamten Fahrzeuginnenraums würde neue Freiheiten erhalten, die Technik im Fahrzeug könnte bewusst für den Benutzer initiiert werden. Dabei wird es die Aufgabe der Ergonomie bleiben, bei allen Neuentwicklungen der Schnittstelle Fahrer-Fahrzeug sich für eine sinnvolle Gestaltung in Bezug auf den Menschen und im Hinblick auf die Verkehrssicherheit einzusetzen.

13 Literaturverzeichnis

- 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*, 1995, Vol.38, No.4, 816-827
- Allport, D. A., Antonis, B. & Reynolds, P. (1972):** On the deviation of attention: A disproof of the single channel hypothesis. *Quart. J. exp. Psychol.*, 24, 225-235 [zitiert nach FÄRBER&FÄRBER, 1987]
- ALPS/Alpine:** <http://www.alpine.com>
- Appelle, S. (1972):** Perception and discrimination as a function of stimulus orientation: the "oblique effect" in man and animals. *Psychological Bulletin*, 78, 266-278 [zitiert nach KEYSON, 1996]
- Beitz, W.; Pahl, G. (1997):** Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung, 4. Auflage, Berlin ; Heidelberg: Springer
- Bernotat, R. (1984):** Ergonomische Kriterien und Bewertungsmethoden zur Gestaltung und Anordnung von Bedienelementen im Kraftfahrzeug. ADAC-Schriftenreihe Straßenverkehr, 29, 199-210 [zitiert nach FÄRBER & FÄRBER, 1987]
- Bengler, K. & Zimmer, A. (1997):** Experimentelle Optimierung von Wegleitungsinformationen unter Nutzung von Kontextinformationen, in: Wahrnehmungs-, Entscheidungs- und Handlungsprozesse beim Führen eines Kraftfahrzeugs: Zum Gedenken an Ulrich Tränkle / Ulrich Schulz (Hrsg.). Münster: LIT
- Bio Robotics Lab:** <http://brl.ee.washington.edu/BRL/devices/>
- Bortz, J. (1993):** Statistik für Sozialwissenschaftler, Heidelberg, New York, ...: Springer
- Brookhuis, K. A., de Vries, G. & de Ward, D. (1991):** The effects of mobile telephoning on driving performance. *Accident Analysis and Prevention*, 23, 309-316 [zitiert nach SCHATTENBERG, 2002]
- Bullinger, H.-J. (1994):** Ergonomie, Stuttgart: Teubner
- Burdea, G. (1996):** Force and touch Feedback for Virtual Reality, New York: John Wiley & Sons
- Chapanis, A.; Morgan, C. T.; Cook, J. S.; Lund, M. W. (1963):** Human engineering guide for equipment design, McGraw-Hill Book Company
- Chapanis, A.; Kinkade, R. G. (1972):** Design of controls, In H. P. Van Cott and R. G. Kinkade (Eds.), *Human engineering guide to equipment design*, 345-379, Washington, DC: U.S. Government Printing Office [zitiert nach AKAMATSU ET AL., 1995]
- Charwat, J. (1994):** Lexikon der Mensch-Maschine-Kommunikation, München, Wien: Oldenbourg
- DaimlerChrysler (2001):** www.daimlerchrysler.com/specials/sidestick/sidestick1_g.htm
- Daude, R. (2000):** Mobiles Maschinen- und Prozeßinteraktionssystem, Eine innovative Benutzungsschnittstelle für NC-Werkzeugmaschinen, Dissertation, RWTH Aachen
- Debus, G.; Fröhlich, J.; Renner, G.; Normann, M. (1997):** Grundlagenuntersuchung zur kognitiv-ergonomischen Kombinierbarkeit von Fahr- und Zusatz Tätigkeiten, in: Wahrnehmungs-, Entscheidungs- und Handlungsprozesse beim Führen eines Kraftfahrzeugs: Zum Gedenken an Ulrich Tränkle / Ulrich Schulz (Hrsg.). Münster: LIT

- Diebschlag, W.; Heidinger, F.; Dupuis, H.; Hartung, E.; Meiller, H. (1995):** Ergonomie des Sitzens: arbeitsmedizinische und technische Aspekte der Sitzgestaltung, 3. Auflage, Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie (Die Bibliothek der Technik; Bd. 68)
- Dix, A. et al. (1998):** Human Computer Interaction, 2 a Ed., Prentice Hall Europe, [zitiert nach PHILLIPS ET AL., 2001]
- Dorsch, F. (1994):** Psychologisches Wörterbuch / Dorsch. Hrsg. Von Friedrich Dorsch ... – 12. überarb. und erw. Aufl. – Bern, Göttingen, Toronto, Seattle: Huber
- Douglas, S. A.; Mithal, A. K. (1997):** The Ergonomics of Computer Pointing Devices, London: Springer [zitiert nach PHILLIPS ET AL., 2001]
- Dufresne, A.; Martial, O. & Ramstein, C. (1995):** "Multimodal User Interface System for Blind and "Visually Occupied" Users: ergonomic evaluation of the haptic and auditive dimensions", in proc. of international conference Interact'95, IFIP, Lillehammer, Norway, June 1995
- Fastenmeier, W.; Gstalter, H.; Zahn, P. (2001):** Prospektive Risikopotentialabschätzung am Beispiel der Spurwechsel-Assistenz, VDI-Bericht 1613, S. 173-189
- Färber, B. (1987):** Geteilte Aufmerksamkeit: Grundlagen und Anwendung im motorisierten Straßenverkehr, Köln: Verlag TÜV Rheinland
- Färber, B.; Färber, B. (1987):** Sicherheitsorientierte Bewertung von Anzeige- und Bedienelementen in Kraftfahrzeugen: Grundlagen, Auftraggeber: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT); Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Auftragnehmer: Psychologisches Institut der Universität Tübingen, Frankfurt am Main: FAT (FAT-Schriftenreihe; Nr. 64)
- Färber, B.; Färber, B. (1988):** Sicherheitsorientierte Bewertung von Anzeige- und Bedienelementen in Kraftfahrzeugen: Empirische Ergebnisse, Auftraggeber: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT); Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Auftragnehmer: Psychologisches Institut der Universität Tübingen, Frankfurt am Main: FAT (FAT-Schriftenreihe; Nr. 74)
- Färber, B. & Popp, M. M. (1990):** ERGOFIS: Ergonomische Gestaltung von Fahrer-Informationssystemen, Forschungsbericht, Universität der Bundeswehr München
- Färber, B. & Müller, M. (2000):** Evaluation von Bedienkonzepten mit dem System NICE, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit, Wirtschaftsverlag NW, Heft M 116, S. 50-55
- Färber, B. (2002):** Mensch-Maschine-Interaktion, Vorlesungsmanuskript, Universität der Bundeswehr München
- Fitts, P. M. (1954):** The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. J. Exp. Psychol., 47, 1954, 381-391 [zitiert nach GEISER, 1990]
- FREG:** <http://rcs.ee.washington.edu/BRL/devices/surgical/devices/freg.htm>
- Geiser, G. (1990):** Mensch-Maschine-Kommunikation, München, Wien: Oldenbourg
- Gibson, J. J. (1966):** The senses considered as perceptual systems, Boston: Houghton Mifflin Company [zitiert nach SCHUMANN, 1994]
- Gibson, J. J. (1973):** Die Sinne und der Prozeß der Wahrnehmung, Dt. Übers. von Ivo und Erika Kohler und Marina Groner, Bern, Stuttgart, Wien: Verlag Hans Huber

Goldstein, E. B. (1997): Wahrnehmungspsychologie – eine Einführung, Dt. Übers. von Manfred Ritter, aus dem Amerikan. übers. von Gabriele Herbst, Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag

Grandjean, E. (1991): Physiologische Arbeitsgestaltung: Leitfaden der Ergonomie, Thun: Ott

Hajian, A. Z. & How, R. D. (1996?): Biomechanics of Manipulation: Grasping the task at hand. Harvard Robotics Lab Technical Report [zitiert nach ZWISLER, 1998]

Hapttech: <http://www.hapttech.com>

Haptic Master Guide: <http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/HM/txt.html>

Heineken, E. (1990): Aufnahme und Verarbeitung von Informationen – Wahrnehmungspsychologische Grundlagen, Auftragsstudie für das Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Bericht Nr. 33

Heintz, F., Bouis, D. & Haller, R. (1985): A Concept of User Guidance for Vehicle Information Systems. Automotive Electronics, SAE-Paper, No. 850309

Hoogen, J. (1998): Ein Experimentalsystem zur Erzeugung von kinästhetischem und taktilem Feedback in Telepräsenz. GMA-Fachbericht Mensch-Prozeß-Kommunikation. VDE-Verlag, Berlin 1998, S. 65-74

Hoyos, C. G.; Kastner, M. (1986): Belastung und Beanspruchung von Kraftfahrers. Schriftenreihe Unfall- und Sicherheitsforschung, Heft 59. Herausgegeben im Auftrag der Bundesminister für Verkehr von der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW

Immersion (2000): TouchSense™ Technology: Transforming User Interface to User Interaction, White Paper

Immersion: <http://www.immersion.com>

Jandura, L.; Srinivasan, M. A. (1994): „Experiments on Human Performance in Torque Discrimination and Control“, Proceedings of 1994 ASME Winter Annual Meeting, DSC-Vol. 55-1, ASME, New York, pp. 369-375, November [zitiert nach BURDEA, 1996]

Johannsen, G. (1993): Mensch-Maschine-Systeme, Berlin, Heidelberg: Springer

Jürgens, H. W. (1993): Körpermaße, in: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie, Band 2, München, Wien: Carl Hanser

Kebeck, G. (1994): Wahrnehmung: Theorien, Methoden und Forschungsergebnisse der Wahrnehmungspsychologie, Weinheim, München: Juventa Verlag

Keidel, W.-D. (1985): Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie, Stuttgart, New York: Georg Thieme

Keyson, D. V. (1996): Touch in User Interface Navigation, Dissertation, Technische Universität Eindhoven

Kraiss, K.-F. (1985): Fahrzeug- und Prozeßführung: Kognitives Verhalten d. Menschen u. Entscheidungshilfen, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio: Springer

Kroemer, K.H.E. (1967): Was man von Schaltern, Kurbeln und Pedalen wissen muß, Sonderheft der REFA-Nachrichten, Darmstadt: REFA e.V.

Krueger, L. E. (1982): Tactual perception in historical perspective: David Katz's world of touch. In W. Schiff and E. Foulke (Eds.) Tactaul Perception: A Sourcebook (pp. 1-54). Cambridge: Cambridge University Press [zitiert nach KEYSON, 1996]

- Küting, H. J. (1976):** Belastung und Beanspruchung des Kraftfahrers. Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung. Köln
- Kuhn, F. (1999):** COMAND. Deskriptives Benchmarking und vergleichende Felduntersuchungen mit Wettbewerbssystemen, Technischer Bericht, DaimlerChrysler AG
- Lechelt, E. C. (1988):** Spatial assymetries in tactile discrimination of line orientation: A comparison of sighted, visually impaired an blind. Perception, 17, 59-63 [zitiert nach KEYSON, 1996]
- Lederman, S. J.; Klatzky, R. L.(1997):** Haptic aspects of motor control, in F. Boller & J. Grafman (Eds), Handbook of Neuropsychology (pp. 131-147). Elsevier Science B.V.
- Logitech:** <http://www.logitech.com/cf/products/index.cfm>
- Loomis, J. M.; Lederman, S. J. (1986):** Tactual Perception. In K. R. Boff, L. Kaufman & Grafman (series eds.) and M. Jeannerod & J. Grafman (section eds.), Handbook of Neuropsychology, Volume 11 (chapter 7, p. 131-147), Amsterdam: Elsevier [zitiert nach ZWISLER, 1988]
- McCann, K. (2002):** Bringing Haptics Technology To Automobiles, AutoTechnology, 2002, Vol. 2, No. 5, 38
- Microsoft:** <http://www.microsoft.com/germany/ms/sidewinder/forcefeedback2/default.htm>
- Millman, P. A. (1995):** Haptic Perception of Localized Features, Dissertation, Northwestern University
- MPB:** http://www.mpb-technologies.ca/space/freedom6_2000/f6s_intro.html
- MSL:** http://www-2.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/project/msl/www/haptic/haptic_device.html
- Neudörfer, A. (1981):** Anzeiger und Bedienteile: Gesetzmäßigkeiten und systematische Lösungssammlungen, Düsseldorf: VDI-Verlag
- Nieminen, T. & Summala, H. (1994):** Novice and experienced drivers' looking behavior and primary task control while doing a secondary task. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 38th Annual Meeting, 852-856. Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society [zitiert nach SCHATTENBERG, 2002]
- Panik, F.; Haeussermann, P.; Beck, P. (1984):** Fahrerinformationssystem als leistungsfähiges Terminal eines fahrerunterstützenden Rechnersystems
- Payette, J.; Hayward, V.; Ramstein, C.; Bergeron, D. (1996):** Evaluation of a force feedback (haptic) computer pointing device in zero gravity, DSC-Vol. 58, Proceedings of the ASME Dynamics Systems and Control Division
- Phillips, J. G.; Triggs, T. J. (2001):** Characteristics of cursor trajectories controlled by the computer mouse, Ergonomics, 2001, Vol. 44, No. 5, 527-536
- Rasmussen, J. (1986):** Information Processing and Human-Machine-Interaction, New York: North-Holland [zitiert nach SCHATTENBERG, 2002]
- Reed, M. P. & Green, P. A. (1999):** Comparison of driving performance on-road and in a low-cost simulator using a concurrent telephone dialing task. Ergonomics, 42 (8), 1015-1037
- Renner, G. (1995):** Fahrzeugführung unter kognitiver Belastung – eine Simulationsstudie, Dissertation, RWTH Aachen
- Rohmert, W.; Jenik, P.; Mainzer, J. (1989):** Körperkräfte, in: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie, Band 1, München, Wien: Carl Hanser

- Rohmert, W. (1993):** Biomechanische Grundlagen, in: Schmidtke, H. (Hrsg.): Ergonomie, 3. Auflage, München, Wien: Carl Hanser
- Rohmert, W.; Jenik, P. (1993):** Skelett und Muskel – unter biomechanischen und funktionellen Gesichtspunkten, in: Schmidtke, H. (Hrsg.): Ergonomie, 3. Auflage, München, Wien: Carl Hanser
- Rühmann, H. (1993a):** Schnittstellen in Mensch-Maschine-Systemen, in: Schmidtke, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Ergonomie, 3. Auflage, München, Wien: Carl Hanser
- Rühmann, H. (1993b):** Isometrische Stellungskräfte an Stellteilen und Betriebsmitteln, in: Schmidtke, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Ergonomie, 3. Auflage, München, Wien: Carl Hanser
- Rühmann, H. (1993c):** Stellteilgestaltung, in: Schmidtke, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Ergonomie, 3. Auflage, München, Wien: Carl Hanser
- Rumar, K. (1988):** In-vehicle information systems. International Journal of Vehicle Design, 9, 548-556 [zitiert nach SCHATTENBERG, 2002]
- Schattenberg, K. (2002):** Fahrzeugführung und gleichzeitige Nutzung von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen, Dissertation, RWTH Aachen
- Schmidt, R. F.; Thews, G. (1995):** Physiologie des Menschen, 26. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer
- Schmidtke, H. (1989a):** Grundlagen der Gestaltung von Steuerarmaturen, in: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie, Band 1, München, Wien: Carl Hanser
- Schmidtke, H. (1989b):** Steuerarmaturen für Translationsbewegungen, in: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie, Band 1, München, Wien: Carl Hanser
- Schmidtke, H.; Rühmann, H. (1989):** Hand-Fingerkräfte, in: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie, Band 2, München, Wien: Carl Hanser
- Schmidtke, H.; Rühmann, H. (1992):** Integrierte Steuerarmaturen, in: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie, Band 3, München, Wien: Carl Hanser
- Schmidtke, H.; Rühmann, H. (1993):** Betriebsmittelgestaltung, in: Schmidtke, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Ergonomie, 3. Auflage, München, Wien: Carl Hanser
- Schmidtke, H. (1994):** Motorische Leistungen, in: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie, Band 2, München, Wien: Carl Hanser
- Schumann, J. (1994):** On the use of discrete proprioceptive-tactile warning signals during manual control, Münster, New York: Waxmann
- Schütz, E. (1972):** Physiologie: Lehrbuch für Studierende, München, Berlin, Wien: Urban & Schwarzenberg
- Sherrick, C. ; Craig, J. (1982):** „The Psychophysics of Touch“, in W. Schiff and E. Foulke (Eds.) Tactile Perception - A Sourcebook, Cambridge University Press, New York, pp. 55-81 [zitiert nach BURDEA, 1996]
- SensAble:** <http://www.sensable.com/haptics/products/phantom.html>

Spreng, M. (1989): Zentralnervöse Funktionen, in: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie, Band 1, München, Wien: Carl Hanser

Srinivasan, M. A. ; Chen, J. (1993): „Human Performance in Controlling Normal Forces of Contact with Rigid Objects“, Advances in Robotics, Mechatronics, and Haptic Interfaces, DSC-Vol. 49, ASME, New York, pp. 119-125 [zitiert nach BURDEA, 1996]

Tan, H. Z.; Srinivasan, M. A.; Eberman, B.; Cheng, B. (1994): Human Factors for the Design of force-reflecting haptic Interfaces, Dynamic Systems and Control, Vol. 55-1

Verwey, W. B. & Veltman, H. A. (1996): Detecting short periods of elevated workload: A comparison of nine workload assessment techniques. Journal of Experimental Psychology: Applied, 2 (3), 270-285 [zitiert nach SCHATTENBERG, 2002]

VDO: <http://www.vdo.com>

Weinberger, M.; Winner, H.; Bubb, H. (2001): Adaptive Cruise Control – Übernahme-situationen, VDI-Bericht 1613, S. 65-78

Woodson, W. E.; Conover, D. W. (1964): Human engineering Guide for equipment Designers, Los Angeles: University of California Press

Youngblut, C.; Johnson, R. E.; Nash, S. H.; Wienclaw, R. A.; Will C. A. (1996): Review of Virtual Environment Interface Technology, Institute for Defense Analyses, IDA-Paper P-3186; online verfügbar unter <http://www.hitl.washington.edu/scivw/IDA/>

Zwisler, R. (1998): Virtuelle Realität und die Rolle von Haptik, Universität Regensburg, Vorlesungsmanuskript

Normen

DIN 33411, Teil 1: Körperkräfte des Menschen, Begriffe, Zusammenhänge, Bestimmungsgroßen

EN 894-1, Ausgabe Februar 1997, Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen, Teil 1: Allgemeine Leitsätze für Benutzer-Interaktion mit Anzeigen und Stellteilen

EN 894-3, Ausgabe März 2000, Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen, Teil 3: Stellteile