

Bewertung von Benutzerschnittstellen für Cockpits hochagiler Flugzeuge

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Philosophischen Fakultät II
Psychologie, Pädagogik und Sportwissenschaft der Universität Regensburg

Vorgelegt von
Armin Eichinger
Regensburg 2011

Erstgutachter: Prof. Dr. Alf C. Zimmer

Zweitgutachter: Prof. Dr. Klaus Bengler

Obergutachter: Prof. Dr. Klaus-Peter Wild

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
2	Angewandte Evaluation im operativen Kontext	15
2.1	Generalisierbarkeit	15
2.2	Einfluss der Arbeitsumwelt	16
2.2.1	Repräsentativität, Reziprozität und Primat der Umgebung . . .	16
2.2.2	Kohärenz und Korrespondenz	18
2.3	Anforderungen experimenteller Evaluation	18
2.3.1	Grundlegende methodische Aspekte	19
2.3.2	Allgemeines Rahmenmodell	20
3	Technologische Grundlagen und Anforderungen	23
3.1	Anzeigekonzept	23
3.2	Bedienkonzept	24
3.3	Anforderungen an das Bewertungskonzept	26
4	Einfluss von Umgebung und allgemeinen Flugaufgaben	27
4.1	Agilität und die Entwicklung einer Systemperspektive	27
4.1.1	Operative Agilität	27
4.1.2	Systemanforderungen	28
4.2	Flugaufgaben und situative Anforderungen	29
4.2.1	Allgemeine Flugaufgaben	30
4.2.2	Situative Anforderungen an den Piloten	30
4.3	Anforderungen an das Bewertungskonzept	31
5	Informationsverarbeitung	33
5.1	Modelle der Informationsverarbeitung	33

5.1.1	Motivation	33
5.1.2	Annahmen	34
5.1.3	Struktur	35
5.2	Modell der Informationsverarbeitung	36
5.2.1	Verarbeitungsstufen	36
5.2.2	Feedback	38
5.2.3	Aufmerksamkeit	38
5.3	Methoden	39
6	Aufmerksamkeit	40
6.1	Arten der Aufmerksamkeit	40
6.1.1	Selektive Aufmerksamkeit	41
6.1.2	Geteilte Aufmerksamkeit	43
7	Workload, Belastung und Beanspruchung	49
7.1	Motivation	49
7.2	Begriffsbestimmung	50
7.2.1	Workload	50
7.2.2	Belastung und Beanspruchung	52
7.2.3	Zusammenfassung und Konsequenzen	54
7.3	Performance Operating Characteristic	55
8	Spezielles Evaluationskonzept	57
8.1	Lokalisierung im allgemeinen Evaluationskonzept	57
8.2	Leistungserhebung	58
8.3	Informatorische Beanspruchungsanalyse	59
8.4	Zusatzaufgaben	60
8.5	Aufgabenschwierigkeit und Aufmerksamkeitsverteilung	61
8.6	Auswertung	62
9	Informatorische Belastungs- / Beanspruchungsanalyse	64
9.1	Anwendungsfälle: Missionstypen	64
9.2	Allgemeine Flugaufgaben	65
10	Zusatzaufgaben zur Abbildung des Belastungskontextes	70
10.1	Visuelle Zusatzaufgabe	71

10.1.1	Entwicklung und Struktur des Paradigmas	71
10.1.2	Charakteristik des gewählten Paradigmas	72
10.2	Kognitive Zusatzaufgabe	73
10.2.1	Entwicklung und Struktur des Sternberg-Paradigmas	73
10.2.2	Charakteristik des gewählten Paradigmas	74
10.3	Motorische Zusatzaufgabe	76
10.3.1	Schema-Theorie motorischen Lernens	77
10.3.2	Allgemeine Aspekte des Paradigmas	77
10.3.3	Spezielle Charakterisierung der Umsetzung	79
10.4	Realitätskonforme komplexe Zusatzaufgabe	80
10.4.1	Tracking-Aufgabe	81
10.4.2	Readback-Aufgabe	85
11	Versuchsplanung	89
11.1	Untersuchungsdesign	89
11.2	Leistungs- und Workloadkriterien	89
11.2.1	Zeigeaufgaben	90
11.2.2	Visuelle Zusatzaufgabe	94
11.2.3	Kognitive Zusatzaufgabe	96
11.2.4	Motorische Zusatzaufgabe	97
11.2.5	Realitätsnahe komplexe Zusatzaufgabe	99
11.2.6	Workload	102
11.3	Fragestellungen	103
11.4	Stichprobenkonstruktion und -beschreibung	104
11.5	Untersuchungsdurchführung	105
11.6	Ablauf	106
12	Ergebnisse	107
12.1	Einfachziele	108
12.1.1	Leistung in der Zeigeaufgabe	108
12.1.2	Workload	109
12.1.3	Visuelle Aufgabe	110
12.1.4	Kognitive Aufgabe	113
12.1.5	Motorische Aufgabe	115

12.1.6 Komplexe Aufgabe	116
12.2 Mehrfachziele	119
12.2.1 Leistung in der Zeigeaufgabe	119
12.2.2 Workload	120
12.2.3 Visuelle Aufgabe	121
12.2.4 Kognitive Aufgabe	124
12.2.5 Motorische Aufgabe	126
12.2.6 Komplexe Aufgabe	129
12.3 Übersicht über alle Effekte	130
12.4 Qualitative Ergebnisse	131
12.4.1 Fehler in den Zeigeaufgaben	131
12.4.2 Performance Operating Characteristics - POCs	134
12.4.3 Workload-Profile	137
13 Interpretation und Diskussion	139
13.1 Visuelle Zusatzbelastung	140
13.1.1 Einfachziele	140
13.1.2 Mehrfachziele	141
13.1.3 Weitere Bewertung	142
13.2 Kognitive Zusatzbelastung	143
13.2.1 Einfachziele	143
13.2.2 Mehrfachziele	143
13.2.3 Weitere Bewertung	144
13.3 Motorische Zusatzbelastung	146
13.3.1 Einfachziele	146
13.3.2 Mehrfachziele	147
13.3.3 Weitere Bewertung	148
13.4 Realitätskonforme Zusatzbelastung	149
13.4.1 Einfachziele	149
13.4.2 Mehrfachziele	150
13.4.3 Weitere Bewertung	152
13.5 Zusammenfassende Bewertung	153
13.5.1 Zeigeaufgaben	153
13.5.2 Evaluationskonzept	154

Inhaltsverzeichnis

A Fragebogen zur informatorischen Beanspruchungsanalyse	159
B Fragebogen zur Erhebung des Workload-Profils	165
C Instruktion und Information	167
D Fehler in der Zeigeaufgabe	172
Literaturverzeichnis	174

Zusammenfassung

Für die Gestaltung und Bewertung von Mensch-Maschine-Systemen in Arbeitsdomänen, bei denen stark volatile externe Einflüsse eine bedeutsame Rolle für die Zielerreichung spielen, müssen die Einflussgrößen des Arbeitsumfelds und neben den physischen die psychologischen Voraussetzungen und Fähigkeiten der Nutzer berücksichtigt werden.

Cockpits hochagiler Flugzeuge sind ein prototypisches Beispiel für eine stark Kontextabhängige Arbeitsdomäne, bei der die gleichzeitige Ausführung informatorisch anspruchsvoller Aufgaben unter Zeitdruck eine zentrale Rolle spielt. Um die Grundlage für eine Bewertung von Bedienelementen für solche Cockpits zu schaffen, wird zunächst die informatorische Belastung von Piloten analysiert und dokumentiert. Darauf aufbauend werden Anforderungen an eine experimentelle Abbildung relevanter Kontextattribute formuliert. Der informatorische Kontext wird durch standardisierte Zusatzaufgaben abgebildet, die in zwei Schwierigkeitsstufen bearbeitet werden. Diese Aufgaben decken die visuelle, kognitive und motorische Informationsverarbeitungsqualität ab, für die die Analyse Spitzenbelastungen zeigt. Um die Bedienleistung während unterschiedlicher Ressourcenverteilung untersuchen zu können, wird der Aufmerksamkeitsschwerpunkt in der resultierenden Mehrfachaufgabensituation variiert. In Ergänzung zu den standardisierten wird eine realitätskonforme Zusatzaufgabe ausgeführt, die dem ermittelten Belastungsprofil entsprechen soll. Auch für diese Aufgabe werden Schwierigkeit und Priorisierung variiert.

Die experimentelle Repräsentation relevanter Kontexteigenschaften führt zu vielfältigen Einflüssen auf Leistungs- und Workloadmaße, die im Detail diskutiert werden. Besonders die Qualität der informatorischen Zusatzbelastung sowie die Manipulation deren Schwierigkeit wirken sich deutlich auf die erhobenen Maße aus.

Inhaltsverzeichnis

Den Hintergrund der Untersuchung bildet der Leistungsvergleich von Touchscreen und Trackball als mögliche Bedienelemente im Cockpit. Unter allen experimentellen Konstellationen zeigt sich ein deutlicher Geschwindigkeitsvorteil des Touchscreens, der auch nicht durch eine erhöhte Fehlerrate erkaufte wird. Zudem ist die subjektive Workload für die Verwendung des Touchscreens niedriger als für die Verwendung des Trackballs.

1 Einleitung

Manchmal muss es erst schlechter werden, bevor es besser wird. Eine solche Entwicklung hin zum Schlechteren erfuhr die U. S. Luftwaffe während der letzten Jahre des zweiten Weltkrieges. Der Kriegseintritt der USA führte zu einem rasch und stark steigenden Bedarf an modernen Kampfflugzeugen, um die militärischen Aktivitäten des Landes zu unterstützen (Vicente, 2004). Es wurden technologisch fortschrittliche Flugzeuge entwickelt: Die Geschwindigkeit der Maschinen konnte massiv gesteigert werden; die Anzahl der Bedienelemente und Instrumente im Cockpit stieg um 350 % (vgl. Badke-Schaub, Hofinger & Lauche, 2008). Diese modernen Kampfflugzeuge wurden von vorwiegend jungen Piloten unter den extremen Bedingungen des Luftkampfes eingesetzt.

Die erste Bilanz war ernüchternd:

»The intense effort to produce new weapons, the race against time in industrial production, and the magnitude of the program required to train men to operate these new machines resulted inevitably in many instances in which the final man-machine combination failed to function effectively.« (Fitts, 1947, zitiert nach Vicente, 2004, S. 72).

Es ist dieser Perspektivenwechsel hin zur »final man-machine combination«, der den Wendepunkt in der Sicherheit der zivilen wie der militärischen Luftfahrt markiert. Fitts und Jones (1947) erkannten, dass eine Untersuchung der Interaktion Mensch-Maschine unter realen Einsatzbedingungen erforderlich ist. In einer ersten Anwendung der Methode der *Critical Incidences* untersuchten sie hunderte von kritischen Vorkommnissen. Im Titel ihres Berichts setzten sie »pilot error« in Anführungszeichen; ein deutlicher Hinweis auf eine Änderung der Verantwortlichkeiten.

Eine der ersten Interventionen bei der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle im Flugzeugcockpit wurde von Alphonse Chapanis vorgenommen. Bei einigen Flug-

1 Einleitung

zeugtypen (z. B. Lockheed P-47, Boeing B-17) kam es zu unerklärlichen Unfällen nach der Landung. Piloten fuhren das Fahrwerk ein, anstatt die Landeklappen auszufahren. Lieutenant Chapanis wurde 1943 beauftragt, diese Unfälle zu untersuchen. Er fand die Ursache des Problems in der Platzierung der Bedienelemente. Die Schalter für Fahrwerk und Landeklappen befanden sich nebeneinander und waren praktisch identisch gestaltet. Chapanis erkannte, dass die gesteigerten Anforderungen während der Landung die Wahrscheinlichkeit einer Verwechslung der beiden Bedienelemente erhöhten und so zu den Unfällen führten (vgl. Chapanis, 1999). Eine aktuelle Einschätzung der kanadischen Luftwaffe unterstützt diese Interpretation: *»During a critical phase of flight such as landing, with higher cognitive workload constraints, the use of incorrect controls by the pilot was all too easily made.«* (Foster-Hunt, 2009, S. 1).

Die Flugzeuge wurden im Kampfeinsatz gebraucht, und eine andere Platzierung der Schalthebel war nicht möglich. Als provisorische Maßnahme modifizierte Chapanis die beiden Bedienelemente: Er fügte dem Schalter für die Landeklappe einen keilförmigen Aufsatz, dem für das Fahrwerk einen runden Gummiaufsatz hinzu. Dadurch stellte er zum einen sicher, dass die Bedienelemente unterscheidbar waren; zum anderen schuf er so eine Beziehung zu den kontrollierten Funktionen. Beide Schalter wiesen nun eine visuelle Ähnlichkeit zu den von ihnen bedienten Geräten auf: Der keilförmige Schalter ähnelte den keilförmigen Landeklappen, der runde Gummiaufsatz ähnelte den Reifen am Fahrwerk.

Chapanis' Intervention war erfolgreich. Die Schalthebel wurden nicht mehr verwechselt. Es gab keine Unfälle aus diesem Grund mehr. Das Provisorium wurde übernommen und für viele weitere Flugzeuge weltweit zum Standard (Vicente, 2004).

Diese ersten Bewertungen und Verbesserungen der Mensch-Maschine-Schnittstelle in Flugzeugcockpits machen zwei Punkte deutlich: (1) In Mensch-Maschine-Systemen¹ ist technologischer Fortschritt auf Seite der Maschine allein nicht ausreichend, um die Leistung des Gesamtsystems zu steigern. Im Gegenteil wird diese Leistung massiv beeinträchtigt, wenn die Anforderungen an den menschlichen Bediener zu groß wer-

¹Die begriffliche Einordnung von Mensch-Maschine-Systemen folgt Chapanis (1965): *»a man-machine system is an equipment system in which at least one of the components is a human being who interacts with or intervenes in the operation of the machine components of the system from time to time«* (S. 16). Ein »equipment system« besteht nach Chapanis aus einer Anzahl von Geräten, arrangiert zur Zusammenarbeit, um einen gemeinsamen Zweck zu erfüllen.

1 Einleitung

den. (2) Sind Umgebungsbedingungen am Ergebnis der Mensch-Maschine-Interaktion maßgeblich beteiligt, müssen diese bei der Erstellung und Bewertung von Benutzerschnittstellen berücksichtigt werden. So sieht auch Herbert A. Simon menschliches Verhalten stark von Kontexteinflüssen geprägt: »*Human rational behavior . . . is shaped by a scissors whose two blades are the structure of the task environments and the computational capabilities of the actor*« (Simon, 1990, S. 7).

Es ist der Anspruch der vorliegenden Arbeit, diese beiden Aspekte für die Bewertung von Benutzerschnittstellen für Cockpits hochagiler Flugzeuge nicht nur zu beachten, sondern in einem integrierten Ansatz zueinander in Beziehung zu setzen. Die von Simon beschriebene Dualität von Akteur und Umwelt ist dabei der rote Faden durch alle Abschnitte dieser Arbeit.

Gegenstand von Kapitel 2 sind besondere Anforderungen, die das angewandte Versuchsumfeld an die experimentelle Forschung stellt. Es werden Überlegungen zur experimentellen Kontrolle und zur Generalisierbarkeit angestellt. Die Erfordernisse der Evaluation von Benutzerschnittstellen im angewandten Umfeld werden diskutiert. Die Konsequenzen für den Aufbau der Untersuchung, deren Bewertungskriterien sowie der Struktur des Evaluationskonzeptes werden formuliert.

Unmittelbarer Anlass der Untersuchung sind aktuelle technische Entwicklungen im Bereich der Cockpitdisplays, die neuartige Anzeige- und Bedienmöglichkeiten bieten. Diese werden in Kapitel 3 erläutert. Es werden verschiedene Arten der Interaktion mit Benutzerschnittstellen in Flugzeugcockpits charakterisiert. Daraus werden Anforderungen an Bewertungsansätze abgeleitet.

In Kapitel 4 werden situative Einflüsse und Flugaufgaben von Piloten hochagiler Flugzeuge beschrieben. Wichtige Begriffe und Konzepte, die zum Verständnis der Umgebungsanforderungen wichtig sind, werden erläutert. Die gleichzeitige Bearbeitung verschiedener Aufgaben wird als zentrale Anforderung der Umwelt des untersuchten Mensch-Maschine-Systems identifiziert.

Im Zentrum des untersuchten Mensch-Maschine-Systems steht der Pilot. Seine Fähigkeit, die gestellten Aufgaben im beschriebenen Umfeld zu erfüllen, sind von Kontexteinflüssen sowie der individuellen Verarbeitungsleistung abhängig. Ein klassisches Modell der menschlichen Informationsverarbeitung wird in Kapitel 5 vorgestellt. Es dient zum einen dazu, zentrale Begriffe der folgenden Ausführungen einzuordnen und

1 Einleitung

zueinander in Beziehung zu setzen. Zum anderen wird sein Einsatz als Werkzeug vorbereitet, Nutzer- und Kontextanforderungen als die beiden wesentlichen Aspekte der Untersuchung zu integrieren.

Auf die besondere Bedeutung von Prozessen der selektiven und geteilten Aufmerksamkeit in ihrer Funktion als »*the filter and the fuel*« (Wickens & McCarley, 2008, S. 3) für die Aufgabenleistung geht Kapitel 6 ein. Als Ausgangspunkt weiterer Ausführungen zur informatorischen Belastung werden Ressourcen-Modelle der Aufmerksamkeit beschrieben. In diesem Zusammenhang werden Mehrfachaufgaben als Untersuchungsansatz vorgestellt. Um die Qualität der Bearbeitung von Mehrfachaufgaben beurteilen zu können, muss die Leistung für alle Aufgaben betrachtet werden. *Performance Ressource Functions* und *Performance Operating Characteristics* bieten dafür einen geeigneten Rahmen.

Unter enger Bezugnahme auf die beiden vorangegangenen Kapitel zur Informationsverarbeitung und Aufmerksamkeit werden in Kapitel 7 Belastung, Beanspruchung und Workload als zentrale Konzepte der Arbeit diskutiert.

Die Überlegungen der vorhergehenden Abschnitte werden in Kapitel 8 zu einem Evaluationskonzept zusammengefasst, das die Erfordernisse menschlicher Informationsverarbeitung sowie Anforderungen durch Kontextbedingungen berücksichtigt und für unterschiedliche Bewertungsprobleme von Benutzerschnittstellen im Cockpit verwendbar ist. Kontexteinflüsse auf die primäre Leistungserhebung werden durch Zusatzaufgaben erzeugt, die in Struktur, Schwierigkeit und Gewichtung manipuliert werden.

In Kapitel 9 werden entsprechend dem Vorgehensmodell des Evaluationskonzeptes Durchführung und Ergebnisse einer informatorischen Beanspruchungsanalyse für die untersuchten Anwendungsfälle beschrieben.

In Kapitel 10 werden die Zusatzaufgaben vorgestellt, die den Belastungskontext zum einen standardisiert nach Belastungsqualität, zum anderen nach dem ermittelte Belastungsprofil realitätsnah abbilden.

In Kapitel 11 werden Versuchsplanung und -durchführung beschrieben.

Die Ergebnisse der Untersuchung präsentiert Kapitel 12.

In Kapitel 13 werden die Ergebnisse im größeren Zusammenhang diskutiert.

2 Angewandte Evaluation im operativen Kontext

Im Folgenden werden wichtige Herausforderungen der experimentellen Forschung im operativen Kontext beschrieben, die zu methodischen Anforderungen an die vorliegende Untersuchung und einem allgemeinen Rahmenmodell zur Bewertung von Benutzerschnittstellen führen.

2.1 Generalisierbarkeit

Jede Art der Forschung, deren Erkenntnisse in einem operativen Kontext angewendet werden sollen, muss sich fragen, in welcher Hinsicht die Ergebnisse auf dieses Umfeld generalisierbar sind. In einer Grundsatzerklärung zum Decision and Management Science Forschungsprogramm der National Science Foundation stellt Hammond (1986) provokativ die Frage: »*do experiments in the psychological laboratory ever provide generality?*« (S. 429). Um diese Frage beantworten zu können, ist es zunächst wichtig zu verstehen, welche Arten von Generalisierbarkeit angestrebt werden könnten¹. Zum einen legen Versuchsleiter psychologischer Experimente großen Wert darauf, dass ihre Ergebnisse über die untersuchte Stichprobe hinaus auf eine bestimmte Grundgesamtheit von Personen verallgemeinert werden können. Diese Generalisierung über Untersuchungseinheiten steht im Zentrum klassischer statistischer Techniken. Deren Ursprung liegt in der Agrarforschung, bei der über Felder, Pflanzen oder Tiere generalisiert werden muss. Die experimentellen Bedingungen sind auch im operativen Umfeld gut zu kontrollieren. Eine Generalisierung über Versuchsbedingungen muss hier nicht diskutiert werden.

¹Die folgenden Ausführungen argumentieren im Sinne von Hammond (1986). Bezüge zu anderen Autoren sind gekennzeichnet.

Dieses hohe Maß an experimenteller Kontrolle kann auch im psychologischen Labor-experiment ausgeübt werden. Bei der Versuchsplanung wählt der Experimentator eine relevante Teilmenge des operativen Umfeldes aus. Es können Einflussgrößen manipuliert und Störeinflüsse kontrolliert werden. Da die Laborbedingungen aber nur eine Teilmenge des operativen Kontextes sind, ist eine Verbindung zwischen beiden nachzuweisen. Neben der Generalisierbarkeit der Ergebnisse über die Stichprobe hinaus auf die Grundgesamtheit ist eine Generalisierbarkeit der Ergebnisse über die Experimentalbedingungen hinaus auf einen operativen Kontext zu begründen. Hammond (1986) formuliert diesen Anspruch so: »*when an experiment is carried out, the question of generalization from the laboratory to the actual conditions of interest outside the laboratory must be answered by some form of defensible logic*« (S. 431). Konkret plädiert er für ein möglichst klares und nachvollziehbares Vorgehen bei der Auswahl der Versuchsbedingungen, für eine Berücksichtigung der Variationsbreite relevanter Einflussfaktoren und einer Abbildung dieser Variationsbreite im Experiment.

2.2 Einfluss der Arbeitsumwelt

2.2.1 Repräsentativität, Reziprozität und Primat der Umgebung

Diesen methodischen Standard sieht Hammond (1986) beispielsweise erfüllt durch Ansätze wie das *representative design* von Brunswik (1956), bei dem sowohl Versuchsteilnehmer als auch die experimentellen Bedingungen stellvertretend für ihre jeweilige Population sind (vgl. hierzu auch Hogarth, 2005).

Die Arbeiten von Brunswik (vgl. Brunswik, 1955) und Gibson (vgl. Gibson, 1986) bilden die Grundlage für einen den Kontext betonenden Blickwinkel auf psychologische Forschung, den *ecological approach*² (vgl. Burns & Hajdukiewicz, 2004). Dieser Ansatz betont zur Untersuchung des Verhaltens von Operateuren in ihrer Interaktion mit der Arbeitsumgebung, vermittelt über Benutzerschnittstellen, folgende Prinzipien (nach Hajdukiewicz & Vicente, 2006).

²Auf die Übersetzung »ökologisch« wird verzichtet, da die mit diesem Begriff verbundenen Konnotationen missverständlich sind.

Repräsentativität Bei der Analyse und Bewertung von Mensch-Maschine-Systemen sind möglichst viele Aspekte der realen Arbeitsumgebung zu berücksichtigen. Sowohl Arbeitsumgebung als auch Operateure sollen die Realität repräsentieren.

Reziprozität Die enge Verbindung von Mensch und Umwelt bildet den Hintergrund, vor dem menschliches Verhalten zu untersuchen ist. Wenn sie nicht sowohl den menschlichen Operateur als auch die Arbeitsumgebung zu betrachten und analysieren, können Gestaltungsanforderungen zum Systementwurf fehlerhaft oder unvollständig sein.

Primat der Umgebung Erst ist das Arbeitsumfeld zu analysieren, bevor das Verhalten innerhalb dieser Umgebung untersucht wird³.

Dhami, Hertwig und Hoffrage (2004) beschreiben Probleme bei der Umsetzung dieser Anforderungen in der angewandten Forschung. Die Forderung nach repräsentativer Auswahl von Situationen ist dabei oft schwer zu erfüllen. Hammond (1966) ergänzt daher die substanzielle Stichprobenerhebung, bei der inhaltliche Eigenschaften der Situation im Vordergrund stehen, um die formale Stichprobenerhebung (engl. *substantive* vs. *formal situational sampling*). Diese fordert Repräsentativität der formalen Eigenschaften der Situation oder Aufgabe unabhängig von deren Inhalt. Nach Dhami et al. (2004) gestattet dieser Ansatz repräsentative Laborforschung, die allerdings eine Struktur-orientierte Aufgabenanalyse voraussetzt (vgl. Cooksey, 1996). Eine Empfehlung hinsichtlich der formalen Attribute der repräsentierten Reize gibt Hammond (1966): Er befürwortet Reize, die hinsichtlich der informatorischen Eigenschaften der Umwelt repräsentativ sind. Brunswik (1956) unterstreicht die Verbindung von Repräsentativität und Generalisierbarkeit: »*Generalizability of results concerning ... the variables involved must remain limited unless the range, but better also the distribution ... of each variable, has been made representative of a carefully defined set of conditions*« (S. 53).

Um die Ergebnisse der geplanten Untersuchung sowohl über Versuchsteilnehmer als auch auf reale Gegebenheiten generalisieren zu können, sollen daher in einem zweistu-

³Herbert A. Simons Parabel von der Ameise illustriert und betont den großen Einfluss, den die Umwelt auf das Verhalten ausübt: »*Viewed as a geometric figure, the ant's path is irregular, complex, and hard to describe. But its complexity is really a complexity in the surface of the beach, not the complexity in the ant*« (Simon, 1996, S. 51).

figen Vorgehen die Aufgaben der Probanden analysiert und deren informatorischen Eigenschaften experimentell abgebildet werden.

2.2.2 Kohärenz und Korrespondenz

Eine hilfreiche Differenzierung von Arten der Arbeitsumwelt nimmt Vicente vor (Vicente, 1990, 1999; für ähnliche Ausführungen im Bereich der Displaygestaltung vgl. Bennett, Nagy & Flach, 2006). Er stellt Kohärenz-abhängige und Korrespondenz-abhängige Arbeitsumwelten gegenüber. Erstere beschreibt er als Mensch-Maschine-Systeme, deren zielrelevante Einflussfaktoren vorwiegend *innerhalb* der Dyade Mensch-Maschine liegen. Ein klassisches Beispiel hierfür ist die Arbeit mit Office-Programmen am Computer. In Korrespondenz-abhängigen Arbeitsbereichen liegen zielrelevante Einflussfaktoren *außerhalb* der Mensch-Maschine-Dyade. Die durch die Maschine vermittelte Repräsentation der Realität muss mit dieser übereinstimmen, um die Zielerreichung des Systems erfolgreich gestalten zu können. Beispiele für entsprechende Arbeitsbereiche sind Arbeitsplätze von Fluglotsen, wegen ihrer hoch dynamischen Belastung im Besonderen auch die von Jetpiloten, deren Umgebung ihnen durch eine Vielzahl von Informationsdisplays vermittelt wird.

In Arbeitsdomänen, bei denen diese externen Einflüsse eine bedeutsame Rolle für die Zielerreichung spielen, also in Korrespondenz-abhängigen Domänen, muss nach Vicente (1990) die Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen sowohl die Einflussgrößen des Arbeitsumfelds als auch die psychologischen Möglichkeiten und Fähigkeiten des Nutzers berücksichtigen. Für die geplante Untersuchung werden diese Anforderungen berücksichtigt.

2.3 Anforderungen experimenteller Evaluation

Für die vorliegende Untersuchung werden zuerst allgemeine methodische Kriterien vorgestellt, die bei der Durchführung von Evaluationsstudien zu berücksichtigen sind. Ein allgemeines Rahmenmodell innerhalb dessen konkrete Untersuchungen geplant werden können, wird im nachfolgenden Abschnitt entwickelt.

2.3.1 Grundlegende methodische Aspekte

Die Evaluationsforschung stimmt in ihren methodischen Anforderungen zu großen Teilen mit denen der klassischen empirischen Forschung überein, wie sie beispielsweise Bortz und Döring (2006) formulieren. Besondere Schwerpunkte finden sich in der allgemeinen Zielsetzung der Evaluation. Nach Stockmann (2000) sind für eine Evaluationsstudie besonders folgende Ziele zu differenzieren und zu konkretisieren:

1. Wissenschaftliche **Erkenntnis** von Eigenschaften und Wirkungen der Intervention
2. **Optimierung** der Maßnahme im Hinblick auf die konkreten Ziele
3. **Kontrolle** der korrekten Umsetzung des Projekts
4. **Entscheidung** zwischen verschiedenen Interventionsmaßnahmen oder hinsichtlich des weiteren Forschungsvorgehens
5. **Legitimierung** der Entwicklung und Durchführung der Maßnahme nach Außen

Bortz und Döring (2006) unterscheiden zwei Funktionen einer Wissenschaftsdisziplin: die Formulierung von *wissenschaftlichen* Theorien über das grundlegende Ursachen- und Wirkungsgefüge und von *technologischen* Theorien, die am Output einer wissenschaftlichen Theorie anknüpfen. Auf dieser Grundlage lassen sich Regeln zum praktischen Einsatz wissenschaftlicher Erkenntnisse formulieren. Das Qualitätskriterium für gute technologische Theorien ist nach Bortz und Döring (2006) die praktische Nutzbarmachung dieser wissenschaftlichen Erkenntnisse in angewandter bzw. Evaluationsforschung.

Für die Einordnung der geplanten Untersuchung ist diese Formulierung von übergeordneten Forschungszielen hilfreich. Sie zeigt, welche Anforderungen an eine Evaluationsstudie gestellt werden, macht diese explizit und damit eine Gewichtung möglich und transparent.

Bevor gezeigt wird, inwiefern wissenschaftliche Theorien eingesetzt werden, um diese Ziele für die vorliegende Untersuchung zu erreichen, sollen strukturelle Eigenschaften von Evaluationsforschung identifiziert werden.

2.3.2 Allgemeines Rahmenmodell

Die Evaluation von Benutzerschnittstellen in komplexen, dynamischen Umgebungen erfordert geeignete Bewertungsansätze, die die Anforderungen durch die Umgebung in die Konzeption mit aufnehmen. Ein allgemeines Rahmenmodell zur Formulierung solcher Bewertungsansätze beschreiben Pejtersen und Rasmussen (1997). Es soll als Grundlage für das spezielle Rahmenmodell dienen, das für die Planung und Durchführung der vorliegenden Untersuchung entwickelt und implementiert wird. Zur Einordnung und Beschreibung eines Evaluationsprojekts führen Pejtersen und Rasmussen (1997) folgende Kategorisierungsdimensionen ein.

Summative und formative Evaluation

Besonders im Hinblick auf den Stand des Evaluationsprojekts sowie seine Zielsetzung ist eine Unterscheidung von formativer und summativer Evaluation nützlich (vgl. Bortz & Döring, 2006).

Summative Evaluation begutachtet die Maßnahme zusammengefasst nach ihren Auswirkungen, die mit denen einer alternativen Maßnahme oder mit den Erwartungen zu Projektbeginn verglichen werden.

Für die Entwicklung von neuen Maßnahmen sowie die Bewertung von Veränderungsprozessen stellt die begleitende, *formative* Evaluation den geeigneten Ansatz dar. Hier werden die Abwicklung der Maßnahme und deren Wirkung stetig kontrolliert. Gewonnene Erkenntnisse fließen in den nächsten Iterationsschritt der Entwicklung. Formative Evaluation strebt nach Information zu kontextuellen Einflussfaktoren, Mechanismen und Prozessen (vgl. Treasury, 2007).

Verifizierung und Validierung

Der allgemeine Begriff der Evaluation kann gegliedert werden in die Bewertung der Übereinstimmung mit den Spezifikationen der Maßnahme oder des Produkts, die *Verifizierung*, und in die Bewertung der Übereinstimmung der Maßnahme oder des Produkts mit den Bedürfnissen der Nutzer, der *Validierung*.

Für den Bereich der Gestaltung von Benutzerschnittstellen wird während des Prozesses der Verifizierung überprüft, inwieweit ein Produkt den Gestaltungszielen ent-

spricht. Das geschieht häufig über den Vergleich mit Gestaltungsheuristiken oder internationalen Normen (vgl. Nielsen & Mack, 1994; Sherehiy, Karwowski & Rodrick, 2006).

Empirische und analytische Evaluation

Die *analytische* Evaluation von Benutzerschnittstellen umfasst den strukturierten Vergleich von Anforderungen der Arbeitsumgebung mit den Gestaltungsanforderungen oder den Spezifikationen eines Prototyps. Der analytische Ansatz prüft inhaltliche Anforderungen an die Funktionalität eines Produkts und übernimmt damit deren Verifizierung (s. o.).

Der *empirische* Ansatz legt den Schwerpunkt auf formale Aspekte eines Produkts und bezieht Kontext, Benutzererfahrung und -präferenzen mit ein. Durch Experimente werden Leistungsstandards verifiziert und der Produkteinsatz mit repräsentativen Nutzern in repräsentativer Umgebung validiert.

Den Ausgangspunkt der Überlegungen von Pejtersen und Rasmussen (1997) bildet die Analyse moderner Arbeitsplätze. Deren Merkmal sind immer seltener statische Arbeitsprozeduren und immer mehr situativ gesteuertes Verhalten nach Ermessen des Operators. »*The interaction of work environment and actors' resource constraints creates the task ad hoc*« (Pejtersen & Rasmussen, 1997, S. 1519). Ein Rahmenmodell zur Evaluation muss daher die Charakteristiken der physischen Arbeitsumgebung und die situative Interpretation dieser Umgebung durch den Operator in Abhängigkeit von dessen Wahrnehmung, Fertigkeiten oder Strategien umfassen.

Folgende Perspektiven bilden die Grundstruktur für die verschiedenen Ansatzpunkte oder Ebenen der Evaluation:

1. Arbeitsumfeld
2. Soziale Organisation
3. Aufgabensituation
4. Operateur

Für das operative Umfeld der aktuellen Untersuchung spielt die soziale Organisation eine untergeordnete Rolle und muss daher nicht in Betracht gezogen werden. Das allgemeine Rahmenmodell zur Bewertung von Benutzerschnittstellen erlaubt es, die

Interaktion hinsichtlich des Arbeitsumfelds, der Aufgabensituation sowie den Charakteristiken des Operators zu berücksichtigen. Es umfasst folgende Ebenen:

- Die Untersuchung der **sensomotorischen Aspekte** der Interaktion beantwortet allgemeine Fragen zur Gestaltung von Bedienelementen und Anzeigen, so dass sie den Wahrnehmungs- und motorischen Anforderungen der Operateure gerecht werden. Bewertungen auf dieser Ebene beinhalten den analytischen Vergleich mit und die Verifizierung von ergonomischen Standards und Normen. Neuartige Fragestellungen erfordern die empirische Prüfung der Anforderungen im Rahmen von Labor-Experimenten.
- **Kognitive Ressourcen und Prozesse** stehen im Zentrum der Untersuchung von Aspekten der Bereitstellung von Information, so dass die Interaktion weder durch Geschwindigkeit noch durch Menge oder Anordnung der Präsentation beeinträchtigt wird. Diese Untersuchung erfolgt vorwiegend experimentell.
- Unter Einsatz komplexer Aufgabenstellungen und -szenarien wird experimentell überprüft, inwieweit die **Situationsanalyse** und individuelle **Entscheidungsstrategien** unterstützt werden.
- Die Überprüfung des **Aufgabenspektrums** auf Vollständigkeit erfolgt sowohl analytisch nach Dokumentation der Anforderungen und Expertenurteilen als auch über Experimente, die eine möglichst große Bandbreite an Systemeinsätzen abdecken.
- Das **Arbeitsumfeld** wird für die Bearbeitung komplexer Szenarien realitätsnah simuliert.

Um den Anforderungen der Repräsentativität zu genügen, fordern auch Pejtersen und Rasmussen (1997) für die empirische Bewertung, dass das experimentelle Umfeld in relevanten Belangen der Arbeitsumgebung entspricht. Sie fordern zudem *»to make explicit how the behavior-shaping constraints are transferred to the research domain«* (S. 1527).

Als wichtige Ausprägungen dieser *»behavior-shaping constraints«* werden in den folgenden Abschnitten technische Rahmenbedingungen, Umgebungseinflüsse und kognitive Anforderungen beschrieben, die für die untersuchte Domäne von zentraler Bedeutung sind und mit den Ausführungen dieses Kapitels in ein spezielles Rahmenmodell zur Bewertung von Benutzerschnittstellen in Cockpits hochagiler Flugzeuge integriert werden.

3 Technologische Grundlagen und Anforderungen

Es ist Ziel der vorliegenden Arbeit, ein Konzept zur Bewertung von Benutzerschnittstellen in Cockpits hochagiler Flugzeuge zu erstellen und zu implementieren. Das untersuchte Flugzeugmuster ist der Eurofighter Typhoon, für den im Projekt Panoramic Displays (kurz PanDis) die Verwendbarkeit eines großflächigen Touchscreendisplays geprüft wird. Im Folgenden werden kurz die technologischen Voraussetzungen beschrieben, die diese Neuentwicklung ermöglicht haben. Anzeige- und Bedienkonzept für PanDis werden vorgestellt und die daraus folgenden Anforderungen für eine Bewertung formuliert (für eine umfangreichere Zusammenfassung vgl. auch Kellerer, Eichinger, Sandl & Klingauf, 2008).

3.1 Anzeigekonzept

In der aktuellen Konfiguration weist der Eurofighter im Bereich des Hauptinstrumentenbretts drei Multifunktionsdisplays (engl. *multi function head down display*, MHDD) auf. Auf diesen werden relevante Informationen inhaltlich gruppiert in *Formaten* dargestellt, die nach Bedarf angezeigt werden können (vgl. Abb. 3.1 links).

Für aktuelle MHDDs werden Flüssigkristallanzeigen (engl. *liquid crystal displays*, LCDs) verwendet. Holographische Anzeigen (engl. *holographic displays*, HOLDIS) projizieren visuelle Inhalte auf eine Anzeigefläche, die die Anzeige über Mikrospiegel vom Blickwinkel abhängig machen kann. Dadurch wird die Abstrahlung von Streulicht verringert, das vor allem bei Dunkelheit die visuelle Wahrnehmung beeinträchtigen kann (vgl. Becker, Neujahr, Sandl & Babst, 2008). Durch den Einsatz mehrerer Projektionseinheiten kann die Qualität der Bilddarstellung sowie die Redundanz und dadurch



Abbildung 3.1: Hauptinstrument des Eurofighter Typhoon in der aktuellen Konfiguration (links); verfügbare Fläche für das Großflächendisplay (rechts).

die Ausfallsicherheit der Anzeige erhöht werden (vgl. Halldórsson, 2003). HOLDIS gestattet zudem beliebig geformte und beliebig große Anzeigen; insbesondere wird dadurch die Verwendung der kompletten in Abbildung 3.1 rechts angedeuteten Fläche als einheitlichen Anzeigebereich möglich. Potenziell steht somit eine großflächige zusammenhängende Anzeige zur Verfügung, die die durch die MHDDs genutzte Fläche mehr als verdoppelt.

Kellerer (2006) entwickelt für dieses Großflächendisplay ein Anzeigekonzept, das dessen Potentiale ausarbeitet. Besonders hervorzuheben ist dabei die permanente Anzeige einer 2D-Karten- oder einer synthetisch erzeugten 3D-Ansicht der Umgebung, die sog. *Pilot-Awareness*-Darstellung. Angewählte Formate werden in den vier Bildschirmecken oder links bzw. rechts über die gesamte Bildschirmhöhe dargestellt. Sie verdecken so nur die Randbereiche der Pilot Awareness Darstellung (vgl. Abb. 3.2).

3.2 Bedienkonzept

Die Bedienung der drei aktuellen MHDD-Anzeigen des Eurofighters erfolgt über einen frei positionierbaren Cursor und variabel belegte Druckschalter mit haptischem Druckpunkt, sog. *Softkeys*. Auch die Steuerung über verbale Befehle (engl. *direct voice input*, DVI) ist möglich, wird aber im Rahmen der Untersuchung nicht berücksichtigt. Der Cursor wird über den am Schubhebel angebrachten XY-Controller bewegt (vgl. Abb. 3.3).



Abbildung 3.2: PanDis Anzeige-konzept



Abbildung 3.3: XY-Controller (rot markiert) am Schubhebel

Kerschenlohr (2007) erarbeitet ein Bedienkonzept, das auf Touchscreenbedienung basiert. Schaltflächen zur An-/Abwahl von und der Interaktion mit Formaten werden dabei nur bei Bedarf angezeigt und reduzieren so die Anzeigefläche nur vorübergehend. Auch die Eingabe über Touchscreen positioniert einen Cursor auf der Anzeigefläche. Der Abschluss des Befehls erfolgt nach Abheben des Fingers von der Bildschirmoberfläche. Die Touchscreenbedienung ist damit voll kompatibel zur Bedienung über XY-Controller. Als Bedienelemente können Touchscreen und XY-Controller nach dem Grad der Unmittelbarkeit der Interaktion eingeordnet werden. Wickens, Lee, Liu und Becker (2004) ordnen dabei den Touchscreen den *direkten* und den XY-Controller den *indirekten* Eingabemedien zu.

3.3 Anforderungen an das Bewertungskonzept

Das zu erarbeitende Bewertungskonzept muss allgemein ermöglichen, Potenziale und Defizite dieser neuartigen Benutzerschnittstelle für das Cockpit des Eurofighters zu untersuchen. Aus den vorstehenden Ausführungen ergeben sich unmittelbar folgende Fragen, die in Grundzügen die Informationsverarbeitungskette Wahrnehmung–Verarbeitung–Handlung abdecken (vgl. hierzu Wickens & Carswell, 2006 und auch die Ausführungen in Abschnitt 5). Sie sind als spezielle Fragestellungen in ein Bewertungskonzept aufzunehmen:

Aspekte der Wahrnehmung Unterstützt die größere und zusammenhängende Anzeige die Wahrnehmung und Interpretation der dargestellten Inhalte?

Untersuchung der Bedienelemente Kann die nötige Qualität der Bedienung mit dem *XY-Controller* für ein großflächiges Display gewährleistet werden? Kann die nötige Qualität der Bedienung mit dem *Touchscreen* für ein großflächiges Display gewährleistet werden?

Untersuchung der Bedienfelder Welche Größe und Abstände voneinander müssen die Schaltflächen haben, damit sie sowohl mit XY-Controller als auch mit Touchscreen schnell und sicher bedient werden können?

Diese Anforderungen auf Grund neuartiger technologischer Aspekte der Benutzerschnittstelle werden im nächsten Abschnitt ergänzt um Anforderungen auf Grund situativer Einflüsse, die vor allem von den allgemeinen Flugaufgaben eines Jetpiloten abhängen.

4 Einfluss von Umgebung und allgemeinen Flugaufgaben

Die Anforderungen an den Piloten werden im Folgenden zuerst aus der Perspektive der technischen Systementwicklung betrachtet. Abschnitt 4.2 erläutert dann die Struktur der allgemeinen Flugaufgaben und beschreibt deren Einfluss auf die Interaktion Mensch-Maschine aus der Perspektive des Operators.

4.1 Agilität und die Entwicklung einer Systemperspektive

Verbesserungen der Flugeigenschaften sowie technische Entwicklungen im Bereich der Avionik¹-Systeme führen zu einer Erweiterung des System-Begriffs und zu einer Betonung der Interaktion an der Schnittstelle von Pilot und Flugzeug.

4.1.1 Operative Agilität

Der Titel dieser Arbeit verweist auf Benutzerschnittstellen für Cockpits hochagiler Flugzeuge. Nach klassischer Sichtweise ist Agilität eine Eigenschaft des Flugwerks (engl. *airframe agility*; vgl. Giampietri, 2003). Eine entsprechende Begriffsbestimmung ist einem Bericht der AGARD (1994) zu entnehmen: »*Airframe agility is defined by the physical properties of the aircraft which relate to its ability to change, rapidly and*

¹ »Avionik – zusammengesetzt aus Aviatik (von lat. *avis* = Vogel) und Elektronik – ist ein Begriff aus der Luft- und Raumfahrttechnik, eine Bezeichnung für die Gesamtheit der elektrischen und elektronischen Geräte an Bord eines Fluggerätes, einschließlich der Fluginstrumente.« Wikipedia (2009a)

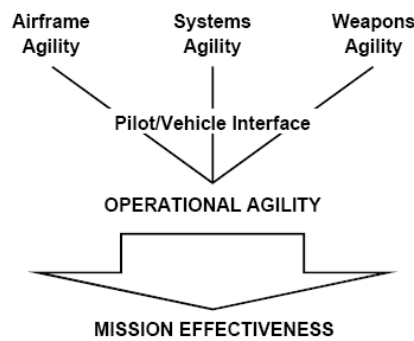


Abbildung 4.1: Struktur und Einfluss operativer Agilität, nach LeBlaye (2000)

precisely, its flight path or pointing axis and to its ease of completing that change. (...) As such, airframe agility relates closely to, and may be regarded as an extension to flying qualities.« (S. 13). Calhoun, LeBlaye und Welsch (2000) weisen darauf hin, dass diese Definition zu kurz greift und befürworten einen erweiterten Begriff der Agilität. Danach beeinflussen neben der Flugwerk-Agilität, die vor allem Aspekte der Manövrierbarkeit umfasst, auch Information und Funktionalität weiterer Flug- und Waffensysteme, vermittelt über das »*pilot-vehicle interface*«, die Agilität des Gesamtsystems (vgl. Abbildung 4.1). Diese Erweiterung der Agilität um die Schnittstelle zum Pilot als Operateur führt zum Begriff der *operativen Agilität*, definiert als »*the ability to adapt and respond rapidly and precisely, with safety and poise, to maximize mission effectiveness*« (LeBlaye, 2000, S. 23). Die Anforderungen hochagiler Flugzeuge erstrecken sich nach diesem Verständnis auf die Benutzerschnittstelle, die die Agilität der Flugzeugarchitektur und verschiedener Subsysteme dem Piloten vermitteln muss, um das Gesamtsystem agil zu machen. LeBlaye (2000) identifiziert als entscheidende Kriterien der operativen sowie aller anderen Arten von Agilität im Kontext der militärischen Luftfahrt Geschwindigkeit und Genauigkeit; Kriterien, die auch für die Integration verschiedener Avionik-Systeme relevant sind.

4.1.2 Systemanforderungen

Die Gestaltung von Benutzerschnittstellen für Cockpits aktueller Kampfflugzeuge ist das Ergebnis einer Entwicklung, die von manchen als »*revolution in crew station design*« (Calhoun et al., 2000, S. 62) bezeichnet wird. Eine Revolution, die vor allem durch die stetig wachsende Zahl an Systemen geprägt wird: Ein Head-Up-Display zur

4 Einfluss von Umgebung und allgemeinen Flugaufgaben

Anzeige von Informationen zu Navigation, Fluglenkung, Erfassung von Luft- und Bodenzielen und dem Abschuss von Waffen; mehrere MHDDs zur Anzeige von Daten der Flug-, Sensor- und Waffensysteme oder von taktischen Informationen; programmierbare Schaltflächen an Schubhebel und Steuerknüppel; Spracheingabe von Befehlen (engl. *direct voice input*; s. o.); Helmvisiere mit integrierten Anzeigen, die die Blickrichtung des Piloten berücksichtigen (engl. *helmet mounted displays*). Damit alle diese Systeme zur operativen Agilität und damit zum Missionserfolg beitragen können, wurde die Benutzerschnittstelle als entscheidendes Element erkannt: *»In fact, it is this communication between the crew station and the pilot that is the limiting factor in the ability of pilots to exploit the advantages afforded by agile systems.«* (Calhoun et al., 2000, S. 63). Durch die Vielzahl an Systemen, die ein hochagiles Flugzeug aufweist, und die über die Benutzerschnittstelle gesteuert werden müssen, ist die *»information management task the primary challenge and key determinant of successful deployment«* (Calhoun, 2000, S. 1). Um diese Aufgabe des Informationsmanagements erfolgreich zu erfüllen, muss der Pilot in der Lage sein, die Gesamtsituation wahrzunehmen und entsprechend zu reagieren. Anzeigen und Bedienelemente hochagiler Flugzeuge bestimmen, wie schnell und genau der Pilot relevante Informationen aufnehmen und Bedienaktionen ausführen kann (vgl. Calhoun et al., 2000).

Der klassische System-Begriff bezieht sich vorwiegend auf Avionik-Systeme und wird deutlich in der Definition der Systemagilität als *»the ability to rapidly change mission functions of the individual systems which provide the pilot with his tactical awareness and his ability to direct and launch weapons in response to and to alter the environment in which he is operating.«* (LeBlaye, 2000, S. 23). Dieser Begriff wird zum Gesamtsystem erweitert und umfasst nun zusätzlich zu Flugwerk, Avionik- und Waffensystemen den Piloten sowie Benutzerschnittstellen im Cockpit (vgl. AGARD, 1994).

4.2 Flugaufgaben und situative Anforderungen

Im folgenden Abschnitt wird eine allgemeine Kategorisierung der Flugaufgaben des Piloten vorgenommen. Abschnitt 4.2.2 interpretiert die Konsequenzen von Art und Umfang der Aufgaben als Anforderungen an den Operateur.

4.2.1 Allgemeine Flugaufgaben

Die vielfältigen Tätigkeiten des Piloten während der Flugführungstätigkeit können in vier Gruppen von Metaaufgaben gegliedert werden (vgl. Hörmann & Lorenz, 2009; Wickens, 2003a):

Flugwegkontrolle (engl. *aviation*) Stabilisierung des Flugzeugs auf dem angestrebten Flugweg; Führung des Flugzeugs im eigentlichen Sinn

Navigation (engl. *navigation*) Bewegung von Punkt A nach Punkt B im dreidimensionalen Raum; Vermeidung von Bedrohung durch von Terrain, Wetter etc.

Kommunikation (engl. *communication*) Kommunikation mit der Flugleitung; Austausch von Informationen mit anderen Piloten oder Waffensystemoffizieren²

Systemmanagement (engl. *system management*) Überwachung und Konfiguration aller technischen Systeme

Für den militärischen Flugeinsatz ist zu ergänzen (vgl. Kellerer, 2010):

Taktik/Bedrohungsmanagement (engl. *tactics/threat management*) Planung und Kontrolle militärischer Missionsziele; taktischer Umgang mit feindlichen Bedrohungen

Je nach Bedrohungslage können taktische Überlegungen alle anderen Aufgaben dominieren. Davon abgesehen gilt für das Aufgabenmanagement folgende Gewichtung der Aufgaben: »*first aviate, then navigate, then communicate, then administrate*« (Hörmann & Lorenz, 2009, S. 731).

4.2.2 Situative Anforderungen an den Piloten

Wie in Abschnitt 4.1.2 ausgeführt trägt eine steigende Zahl von Systemen zum Umfang der vom Piloten zu verarbeitenden Information bei. Entsprechend argumentieren Clamann und Kaber (2004) und machen für diese Informationsfülle die »*number of stimuli in the cockpit, such as the densely packed controls and the output produced by warning indicators, status displays, flight path displays, ATC data links, weather information, navigation information, and communications*« (S. 397) verantwortlich

² »Als Waffensystemoffizier (...) wird das zweite Besatzungsmitglied in zweisitzigen Kampfflugzeugen bezeichnet.« Wikipedia (2009b)

4 Einfluss von Umgebung und allgemeinen Flugaufgaben

und beschreiben die situativen Anforderungen an den Piloten daher als komplex und dynamisch.

Auch Calhoun (2000) weist darauf hin, dass die primäre Herausforderung des Piloten im Informationsmanagement liegt. Diese Auffassung teilt Wickens (1999): »*pilots move more into the roles of information managers*« (S. 232). Er beschreibt die Aufgaben eines Piloten als komplex, vielfältig und nahezu alle Bereiche der Wahrnehmung und Kognition betreffend. Die Ressourcen, die dem Piloten für die Bearbeitung dieser Aufgaben zur Verfügung stehen, sieht Wickens als begrenzt. Sie müssen zudem schnell von einer Aufgabe auf die nächste gerichtet oder auf gleichzeitig auszuführende Tätigkeiten verteilt werden: »*At any point in time, numerous events are happening in a sophisticated aircraft. All of these events may need monitoring or control. This means that a number of procedures must be executed concurrently to keep up with the aircraft*« (Williges, Williges & Fainter, 1989, S. 484). Diese Einschätzung teilt Wickens (1999): »*The pilot is, above all, a time-sharing system*« (S. 233).

Die Informationsaufnahme durch den Piloten erfolgt vorwiegend visuell (vgl. Wickens, 1999) und betrifft besonders die räumliche Verarbeitung von Information zur Flugwegkontrolle und Navigation (vgl. Taylor, Brunye & Taylor, 2008). Wickens (1999) weist abgrenzend zur verbalen auf die vorwiegend manuelle Handlungsausführung und die enge Verbindung von Wahrnehmungs- und motorischer Komponente hin (vgl. auch Powers, 1973). Für Aufgaben im Bereich der Kommunikation ergänzen auditive und verbale Komponenten das Spektrum der Informationsverarbeitung.

4.3 Anforderungen an das Bewertungskonzept

Aus diesen Ausführungen ergeben sich folgende Aspekte, die ein Bewertungskonzept für Benutzerschnittstellen in Cockpits hochagiler Flugzeuge berücksichtigen muss:

Art der Informationsverarbeitung Die Aufgabensituation des Piloten ist gekennzeichnet von intensiven Anforderungen an verschiedene Qualitäten der Informationsverarbeitung: visuell, auditiv, kognitiv, verbal, motorisch. Diese Qualitäten sind für die Analyse des situativen Kontextes und dessen experimenteller Abbildung einzubeziehen.

4 Einfluss von Umgebung und allgemeinen Flugaufgaben

Multitasking Durch die Vielzahl an Aufgaben und dynamische situative Anforderungen muss der Pilot häufig mehrere Aufgaben gleichzeitig ausführen. Ein Evaluationskonzept muss daher Mehrfachaufgabensituationen umfassen.

Schwierigkeit Die Komplexität der situativen Anforderungen an den Piloten sind gekennzeichnet von begrenzten Ressourcen und hoch variabler Informationsmenge. Die eingesetzten Szenarien müssen daher die zu investierenden Ressourcen manipulieren.

Ressourcenverteilung Die dynamische Priorisierung der Aufgaben erfordert unterschiedliche Verteilung der begrenzten Ressourcen. Auch dieser Aspekt muss daher durch geeignete Instruktion der Versuchsteilnehmer über Gewichtung bestimmter Bestandteile von Aufgaben geeignet abgebildet werden.

Die folgenden Abschnitte diskutieren die theoretischen Grundlagen dieser Aspekte im Rahmen eines Modells zur Informationsverarbeitung.

5 Informationsverarbeitung

In Kapitel 4 wurde erläutert, dass die Aufgaben von Piloten hochagiler Flugzeuge vor allem durch hohe Anforderungen an verschiedene Aspekte der Informationsverarbeitung geprägt sind. Im Folgenden wird ein Modell zur Beschreibung und Einordnung relevanter Konzepte und Prozesse der Informationsverarbeitung vorgestellt. Dieses Modell dient im Weiteren als Grundlage für die Analyse und experimentelle Abbildung des informatorischen Kontextes.

5.1 Modelle der Informationsverarbeitung

Die Bandbreite dieser Ansätze reicht von einfachen beschreibenden Modellen einzelner Aspekte der Informationsverarbeitung bis hin zu integrierten kognitiven Architekturen, die quantitative Vorhersagen über geübtes Verhalten (engl. *skilled behavior*) machen. Gemeinsam der Modelle sind ihre Beweggründe und Grundannahmen.

5.1.1 Motivation

Modelle der menschlichen Informationsverarbeitung (engl. *human information processing*) werden als Theorie-Werkzeuge eingesetzt, um Verhalten beschreiben und vorhersagen zu können. Sie erlauben die Untersuchung von Phänomenen, die sowohl für die Grundlagen- als auch für die angewandte Forschung relevant sind (vgl. Proctor & Vu, 2006a). Card, Moran und Newell (1983) sehen diesen Bezugsrahmen als nahe liegend: »*It is natural for an applied psychology of human-computer interaction to be based theoretically on information-processing psychology*« (S. 13).

Besonders attraktiv macht diese Art von Modellen die Möglichkeit, beliebige Arten von Verhalten in einem einheitlichen Rahmen diskutieren und analysieren zu können.

Im Bereich der Untersuchung von Mensch-Maschine-Interaktion bieten Modelle der Informationsverarbeitung die Möglichkeit, Leistungsaspekte des Verhaltens zu untersuchen (vgl. Wickens & Hollands, 2000), vorwiegend auch, um Leistungsdefizite und Fehler lokalisieren zu können (vgl. Carswell & Stephens, 2006).

Die Organisation der Informationsverarbeitung in Systeme und Subsysteme bietet zudem einen Ansatz, der Mensch und Maschine in einem Rahmen diskutiert und damit eine Antwort liefert auf »*the desire to integrate description of the human within overall systems*« (Posner, 1986, S. V-6).

5.1.2 Annahmen

Den klassischen Ansätzen zur qualitativen wie quantitativen Modellierung liegt die Annahme zu Grunde, dass die Informationsverarbeitung in Subsystemen erfolgt. Diese Diskretisierung bezieht ihre Rechtfertigung nach Wickens und Carswell (2006) aus dem Nachweis neurophysiologischer Korrelate, vor allem aber dem differenzierten Einfluss der Aufgabensituation auf die unterschiedlichen Verarbeitungsstufen. Die Information wird zwischen diesen diskreten Stufen übertragen und transformiert. Die Übertragung benötigt Zeit und bietet so einen Ansatzpunkt, um durch gezielte experimentelle Manipulation über chronometrische Methoden eine stufenweise Verarbeitung nachzuweisen (vgl. Proctor & Vu, 2006a). Einen solchen Nachweis führt Sternberg, indem er verschiedene Faktoren analysiert, die additiv zur Bearbeitungszeit von Aufgaben beitragen. Er modifiziert dazu die subtraktive Methode von Donders (1868/1969). Beide Autoren gehen von einer stufenweisen Verarbeitung von Information aus. Sternberg integriert seine Untersuchungsergebnisse in ein Modell der Informationsverarbeitung mit den Stufen *target identification*, *memory search*, *response selection* und *response execution* (Sternberg, 1975; Proctor & Vu, 2006a).

Eine weitere Annahme, die diesen Modellen zu Grunde liegt, betrifft offensichtlich vorhandene Grenzen der Informationsverarbeitung und daraus resultierende Leistungsvariation. Die Ursache dieser Beschränkung wird in der mangelnden Bandbreite zur Transmission oder in Kapazitätsbeschränkungen von Speichereinheiten oder von Prozessoren gesehen. Ihre Auswirkungen werden vor allem bei der gleichzeitigen Bearbeitung von mehreren Aufgaben deutlich (vgl. Wickens & Hollands, 2000).

Diese Grundannahmen fassen Embrey, Blackett, Marsden und Peachey (2006) zusammen: »[*Human information processing*] models have proved particularly useful due to the special prominence they tend to give to the idea that effective task performance depends crucially on the availability of internal mental resources needed to power information processing sub-systems« (S. 49).

5.1.3 Struktur

Es wurden Ansätze entwickelt, die den kontinuierlichen und gleichzeitigen Informationsfluss über alle beteiligten Instanzen betonen (z. B. das Kaskadenmodell nach McClelland, 1979) oder die die Perspektive der stufenweise Verarbeitung aufgeben und die Wechselwirkung vieler vernetzter Einheiten herausstellen und darauf aufbauend konnektionistische Modelle formulieren (vgl. Rumelhart, Hinton & McClelland, 1987). Auch die SRK-Taxonomie von Rasmussen (vgl. Rasmussen, Pejtersen & Goodstein, 1994; Vicente, 1999) kann in diesem Zusammenhang als Informationsverarbeitungsmodell interpretiert werden, das menschliches Verhalten als Reaktion auf Signale, Zeichen oder Symbole als fertigungs-, regel- oder wissensbasiert kategorisiert und diesen Stufen zunehmende kognitive Verarbeitung und abnehmende Automation zuweist. Zimmer (2003) erweitert das SRK-Schema um eine Bewertungsebene, um den Einfluss von Werten und Einstellungen auf Zielhierarchien bei der Verhaltenssteuerung abbilden zu können. Für die Untersuchung von Prozessen der Mensch-Maschine-Interaktion gilt jedoch: Die Gliederung der Informationsverarbeitungsprozesse nach Aufnahme, kognitiver Verarbeitung und Handlungsausführung ist die Grundlage vieler Modelle der Mensch-Maschine-Interaktion und findet sich auch in der Konzeption kognitiver Architekturen. So beschreiben Card et al. (1983) einen modellhaften menschlichen Informationsverarbeiter, den *Model Human Processor*, dessen Verhalten durch die Arbeitsweise eines Wahrnehmungs-, eines kognitiven und eines motorischen Prozessors mit zugeordneten Speichereinheiten bestimmt wird. Kieras und Meyer (1997) übernehmen für die Entwicklung der kognitiven Architektur EPIC (*Executive-Process Interactive Control*) die Grundstruktur des Model Human Processor. Sie unterscheiden nach auditiver und visueller Wahrnehmung sowie nach verbaler und manuell-motorischer Handlungsausführung.

Eine Vielzahl an Forschungsansätzen versucht, die Belastung unterschiedlicher Verarbeitungsstufen zu quantifizieren, um für konkrete Situationen Vorhersagen über Beanspruchungs- und Leistungsaspekte treffen zu können. Prominente Vertreter dieser Ansätze sind das *Time-Line Analysis and Prediction* (TLAP)-Modell nach Parks und Boucek (1989) sowie die VACP¹-Skalen von Aldrich, Szabo und Bierbaum (1989) und McCracken und Aldrich (1984). Die VACP-Skalen werden auch für das Modellierungstool IMPRINT der US-Armee eingesetzt (vgl. Wojciechowski, 2004; Yee, Nguyen, Green, Oberholtzer & Miller, 2009). Auch für diese Modelle wird die Informationsverarbeitung in die Stufen visuelle und auditive Informationsaufnahme, kognitive Verarbeitung und psychomotorische Handlungsausführung gegliedert. Verbale Aktionen werden bei TLAP dem auditiven Kanal, bei VACP der motorischen Handlungsausführung zugeordnet.

Die gemeinsame Grundstruktur der beschriebenen Ansätze lässt sich zusammenfassend in die Stufen *Wahrnehmung*, *Kognitive Verarbeitung* und *Handlungsausführung* gliedern.

5.2 Modell der Informationsverarbeitung

Ein im Sinn der obigen Ausführungen klassisches Modell der Informationsverarbeitung formulieren Wickens und Carswell (2006; vgl. Abb. 5.1). Dessen Verarbeitungsprozesse und -konzepte werden im Folgenden beschrieben.

5.2.1 Verarbeitungsstufen

Die Prozessschritte des Modells werden den Ausführungen in Abschnitt 5.1.3 entsprechend zu drei Stufen zusammengefasst.

5.2.1.1 Wahrnehmung

Wahrnehmung wird durch Reiz-gesteuerte *bottom-up*-Prozesse sowie *top-down* durch Gedächtnis-Prozesse, vermittelt über die Aufmerksamkeit, beeinflusst. Die Übergänge von den ersten Stufen der sensorischen Reizaufnahme über Prozesse der Muste-

¹ V – visual, A – auditive, C – cognitive, P – psychomotor

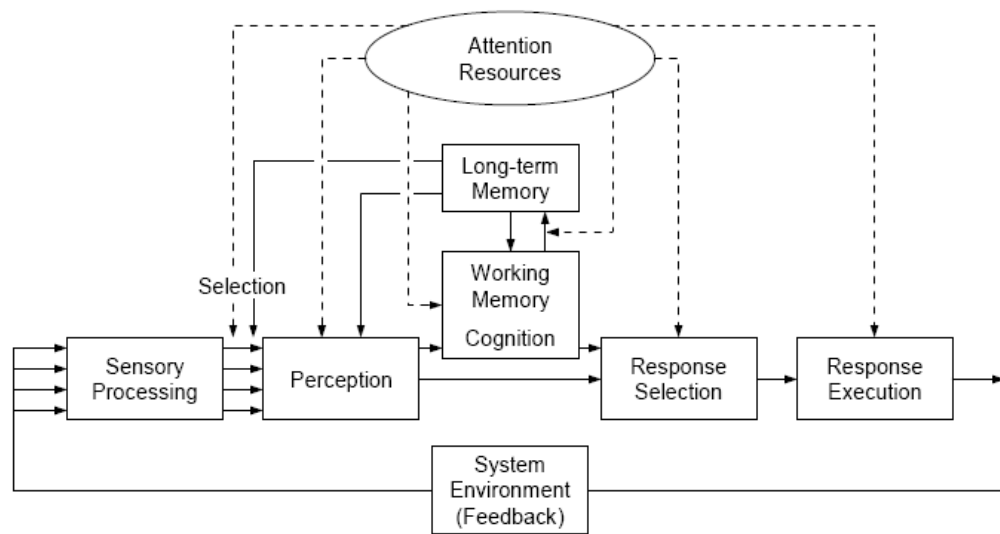


Abbildung 5.1: Modell der menschlichen Informationsverarbeitung nach Wickens und Carswell (2006)

erkennung zur Identifizierung von Objekten und deren Verarbeitung sind fließend. Bereits die sensorische Reizaufnahme wird durch Aufmerksamkeitsprozesse gesteuert, indem grundlegende, Aufgaben-relevante Attribute der Reize betont werden (vgl. Ware, 2008). Daher umfasst die Stufe der Wahrnehmung für die vorliegende Untersuchung alle Aspekte der visuellen und auditiven Reizaufnahme und Objektwahrnehmung.

5.2.1.2 Kognitive Verarbeitung

Die wahrgenommene Information wird mit anderer Aufgaben-relevanter Information zusammengefasst, verarbeitet und durch die Entscheidungsfindung zu einer Grundlage für die Handlung. Diese Verarbeitungsschritte laufen bewusst ab, sind Ressourcen-limitiert (vgl. Norman & Bobrow, 1975) und anfällig für Störungen (vgl. Wickens & Hollands, 2000). Die verantwortliche Instanz für die kognitive Verarbeitung und Koordination der Gedächtnissysteme ist das Arbeitsgedächtnis (vgl. Baddeley, 2007), dessen zentrale Exekutive das visuell-räumliche, das phonologische und das episodische Subsystem steuert. Verglichen mit Wahrnehmungsprozessen erfordert diese zentrale Verarbeitung mehr Zeit, mentale Anstrengung und Aufmerksamkeit (vgl. Wickens & Hollands, 2000).

5.2.1.3 Handlungsausführung

Nachdem die Entscheidung für eine Handlungsalternative getroffen worden ist, wird diese ausgeführt. Die Ausführung beruht auf der integrierten aufgenommenen und verarbeiteten Information. Als Handlungsausführung wird neben motorischer auch die verbale Aktivität verstanden. Nach Art der Handlung oder nach Grad der Automatisierung kann die Aktion von stetiger sensorischer Rückmeldung abhängig sein (vgl. Wickens & Carswell, 2006).

5.2.2 Feedback

Ein wichtiges Merkmal des Modells ist die Aufnahme einer Rückmeldung der Handlungsausführung. Dieses Feedback ist entweder unmittelbar für den Operateur wahrnehmbar oder kann an den Konsequenzen für Parameter des Mensch-Maschine-Systems registriert werden (vgl. Wickens & Hollands, 2000).

Diese Auffassung von Feedback betont, dass der Informationsfluss (1) an einem beliebigen Punkt des Modells gestartet werden kann und (2) für eine Vielzahl von Aufgaben kontinuierlich erfolgt (vgl. Wickens & Hollands, 2000). Die Auffassung »Aktion bedingt Wahrnehmung« ist daher genau so passend wie deren Gegenstück »Wahrnehmung bedingt Aktion« (vgl. Powers, 1973; Neisser, 1976)

5.2.3 Aufmerksamkeit

Aufmerksamkeit spielt eine integrierende Rolle in diesem Modell. Nach Auffassung von Wickens (2007) sind Aufmerksamkeitsressourcen das knappe Gut, das für die Ausführung informationsverarbeitender Operationen nötig und häufig für deren Störanfälligkeit verantwortlich ist, vor allem, wenn mehrere Operationen gleichzeitig auszuführen sind. Neben dieser Funktion als Ressource besonders bei verteilten Operationen attestiert Wickens (2007) der Aufmerksamkeit eine Filterfunktion für die selektive Zuweisung von Ressourcen.

Die Verteilung von Aufmerksamkeitsressourcen spielt für die vorliegende Untersuchung eine zentrale Rolle. Die Prozesse der selektiven und verteilten Aufmerksamkeit werden daher in einem eigenen Kapitel (vgl. Kapitel 6) erörtert.

5.3 Methoden

Die Untersuchungsansätze zur theoretischen Rechtfertigung der Modelle zur Informationsverarbeitung verwenden vorwiegend Methoden zur Messung von zeitlichen oder Entfernungsgrößen sowie deren kategorisierten Häufigkeiten zur Erhebung von Maßen der Geschwindigkeit und Genauigkeit (vgl. Abschnitt 5.1.2). Auch die Erfassung von Leistung, die innerhalb dieses Modells beschrieben werden kann, erfolgt über Geschwindigkeit und Genauigkeit als »*key dimensions of performance*« (Bronzino, 2006, S. 78-4).

Diese Art der Leistungserhebung ist damit auch vereinbar mit Untersuchungen zur Gebrauchstauglichkeit (engl. *Usability*), definiert als das »*Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen*« (DIN EN ISO 9241-11, 1998, S. 4). Auch in diesem Rahmen werden Maße der Genauigkeit und Geschwindigkeit als klassische Operationalisierungen von Effektivität und Effizienz und damit als Leistungsdimensionen der Gebrauchstauglichkeit beschrieben.

Ein Evaluationskonzept, das die Struktur des beschriebenen Modells berücksichtigt, kann nach *Art der Informationsverarbeitung* unterscheiden und erfüllt damit die erste der in Abschnitt 4.3 formulierten Anforderungen. Die *Schwierigkeit* von Aufgaben lässt sich durch den Grad der Belastung der einzelnen Verarbeitungsstufen abbilden, bedarf aber zusätzlich noch eine Differenzierung nach Belastung und Beanspruchung, die in Kapitel 7 vorgenommen wird. Die Aspekte *Multitasking* und *Ressourcenverteilung* erfordern eine genauere Diskussion der Rolle der Aufmerksamkeit im folgenden Kapitel 6.

6 Aufmerksamkeit

Die Beziehung zwischen menschlicher Leistung und Aufmerksamkeit wird im Modell der menschlichen Informationsverarbeitung etabliert (vgl. 5.1). Obwohl plausibel, bestehen verschiedene Ansichten, wie das Konzept Aufmerksamkeit theoretisch einzuordnen ist. Dieses Spannungsfeld illustrieren das Zitat von William James »*Everyone knows what attention is*« (James, 1890, S. 1) und nach mehr als 100 Jahren die Antwort darauf von Elizabeth Styles »*Despite William James's (1890) oft-quoted remark ... it would be closer to the truth to say that ›Nobody knows what attention is‹ or at least not all psychologists agree*« (Styles, 2006, S. 1). Nach Styles ist Aufmerksamkeit kein einheitliches Konzept, sondern der Name für eine Reihe von psychologischen Phänomenen und Prozessen.

Im Folgenden wird das der vorliegenden Untersuchung zu Grunde liegende Verständnis des Konzepts Aufmerksamkeit herausgearbeitet, eingeordnet und abgegrenzt. Dazu werden verschiedene Perspektiven beschrieben, die den Bezug zum Informationsverarbeitungsmodell und den Aspekt der Begrenzung der Verarbeitungskapazität aufnehmen, die auch Styles (2006) betont: »*There is, however, some agreement that attention is characterised by a limited capacity for processing information and that this allocation can be intentionally controlled*« (S. 1).

6.1 Arten der Aufmerksamkeit

Eine Beschreibung und Gliederung von Aufmerksamkeitsphänomenen erfolgt nach den Arten von menschlichem Verhalten (vgl. Lund, 2001): Soll ein Reiz ausgewählt und ungestört von anderen Einflüssen verarbeitet werden, oder sind mehrere Reize möglichst gleichzeitig zu verarbeiten. Der erste Fall erfordert selektive oder fokussierte, der zweite geteilte Aufmerksamkeit. Auch das Aufrechterhalten der Aufmerksamkeit

(engl. *sustained attention*) bildet eine eigene Kategorie von Konzepten und Prozessen, die beispielsweise in der Prozessindustrie von großer Bedeutung sind, die für die vorliegende Untersuchung aber nicht betrachtet werden.

6.1.1 Selektive Aufmerksamkeit

Im Folgenden werden prominente Modelle selektiver Aufmerksamkeit vorgestellt und ihre charakteristischen Eigenschaften beschrieben.

Filtermodell

Broadbents Ansatz bezieht sich auf ein Informationsverarbeitungsmodell mit *einem* zentralen Prozessor (vgl. Broadbent, 1958). Um den Prozessor vor Überlastung zu schützen, empfängt er zu verarbeitende Information über einen kapazitätsbegrenzten Übertragungskanal. Der Wechsel zwischen verschiedenen sensorischen Kanälen erfolgt langsam und etwa zwei Mal pro Sekunde. Dieser strukturelle Verarbeitungsengpass (engl. *processing bottleneck*) fungiert als Filter, der nur relevante Information passieren lässt, die später semantisch weiterverarbeitet wird. Diese frühe Selektion erfolgt auf Grundlage einfacher sensorischer Merkmale; für die auditive Wahrnehmung beispielsweise nach Tonhöhe oder Ort. Die parallele Aufnahme von sensorischen Informationen wird zu einem frühen Zeitpunkt serialisiert, »*overloading of the limited capacity channel is prevented by serializing the input to it*« (Moray, 1970, S. 29). Über das Modell eines kapazitätsbegrenzten Filters können verschiedene experimentelle Befunde, beispielsweise zu dichotischem Hören, erklärt und Gestaltungsempfehlungen für die Steuerung selektiver Aufmerksamkeit, beispielsweise für Alarmsignale, abgeleitet werden. Das Modell dient als Rahmen zur Analyse von Interferenzeffekten und Fehlern bei der Systembedienung durch Operateure (vgl. Reason, 1970).

Abschwächungsmodell

Das Abschwächungsmodell (engl. *attenuation model*) von Treisman (1960) teilt wesentliche Grundannahmen des Filtermodells von Broadbent und wird daher auch den Modellen der frühen Selektion zugeordnet. Es geht von einem Filter aus, der semantisch zu kodierende Information weiterhin komplett passieren lässt. Die restliche In-

formation wird durch den Filter nicht blockiert, sondern nur abgeschwächt und kann im Bedarfsfall auch noch später einer semantischen Analyse unterzogen werden.

Broadbents Filter- und Treismans Abschwächungsmodell stellen zwar den Bezug zu Informationsverarbeitungsprozessen her und gehen von limitierter Verarbeitungskapazität aus. Die Limitierung ist jedoch konstant an die Kapazität eines Kanals gebunden. An ihre Grenzen stoßen die Modelle für Befunde zur erfolgreichen Bearbeitung mehrerer Aufgaben oder zur Entwicklung automatisierter Verhaltensweisen bei Mehrfachtätigkeit. Wichtige Anforderungen an ein Bewertungskonzept für die vorliegende Untersuchung sind damit nicht erfüllt.

Attribute alternativer Ansätze

Alternative Ansätze zur selektiven Aufmerksamkeit unterscheiden folgende Aspekte:

Position des Flaschenhalses Deutsch und Deutsch (1963) lokalisieren den Übergang zwischen paralleler und serieller Verarbeitung spät im Verlauf der Verarbeitung.

Anzahl der Kanäle Im Gegensatz zu Broadbents einzelner Zugang zur zentralen Verarbeitung geht Moray (1986) von mehreren Kanälen aus, deren Organisation und Auswahl für einen bestimmten Bereich Erfahrung und Training voraussetzt.

Wahl der Metapher Anstatt der starren, unflexiblen Kapazität eines Kanals, wie sie in den *Bottleneck*-Theorien verwendet wird, können über die *Spotlight*-Metapher graduelle Intensitätsübergänge der Aufmerksamkeit erfasst werden. Grad der Verarbeitung und Größe der betrachteten Fläche sind umgekehrt proportional (vgl. Pashler, 1999). In ihrer *Feature Integration Theory* verwenden Treisman und Gelade (1980) die Spotlight-Metapher als bewegtes Fenster über die visuelle Information. Kern der Theorie ist die Integration paralleler Merkmalssuche und serieller Konjunktionssuche in einem einheitlichen Rahmen.

Kontrolle Ein wichtiges Kriterium in der Einordnung der verschiedenen Modellvorstellungen der selektiven Aufmerksamkeit betrifft die Lokalisierung der Selektionskontrolle. Manche Ansätze gehen von Reiz-kontrollierter Selektion aus (sog. *bottom-up Effect*-Modelle); *top-down Cause*-Modelle sehen in der Selektion ein Epiphänomen der Operation verschiedener sensorischer und kognitiver Systeme (vgl. Goldhammer & Moosbrugger, 2005).

SEEV-Modell

Das SEEV-Modell von Wickens und McCarley (2008) kann verschiedene dieser Aspekte integrieren. Danach ist die Aufmerksamkeitsselektion abhängig von *bottom-up*- und *top-down*-Prozessen. Die Wahrscheinlichkeit einer Selektion wird dabei durch die Auffälligkeit (engl. *Saliency*) von visuellen oder auditiven Reizen erhöht, durch die erforderliche Anstrengung (engl. *Effort*) der Selektion verringert. Die Erwartung (engl. *Expectancy*) über das Auftreten eines Reizes an einem bestimmten Ort ist erfahrungsabhängig und ist positiv korreliert mit der Wahrscheinlichkeit einer Selektion. Der Wert (engl. *Value*) eines aufzunehmenden Reizes ist eng mit der Priorisierung der aktuell zu erfüllenden Aufgabe verbunden und steht in positivem Zusammenhang mit der Selektionswahrscheinlichkeit.

Die folgende Gleichung fasst diese Einflüsse auf die Selektionswahrscheinlichkeit $P(A)$ zusammen:

$$P(A) = sS - efEF + exEX + vV$$

Dabei stehen Kleinbuchstaben für die Gewichte der Dimensionen und Großbuchstaben für deren Ausprägung. Wickens und Kollegen konnten das Modell in mehreren Studien in Fahr- und Flugszenarien validieren (vgl. Wickens & Horrey, 2008).

Nach Wickens und McCarley (2008) ist das SEEV-Modell in der Lage, zentrale Aspekte der Selektion abzubilden. Um die Reaktion auf veränderte Aufgabenanforderungen hinsichtlich Umfang und Verteilung von Aufmerksamkeit beschreiben zu können, ist eine energetische Perspektive nötig, die im folgenden Abschnitt eingenommen wird.

6.1.2 Geteilte Aufmerksamkeit

Bereits Moray (1967) weist darauf hin, dass die Annahme eines einzelnen Übertragungskanals nicht in der Lage ist, alle Phänomene der selektiven und geteilten Aufmerksamkeit zu erklären. Speziell für die Verteilung von Aufmerksamkeit auf mehrere Aufgaben muss ein Konstrukt angenommen werden, das entsprechend teilbar ist. Verschiedene theoretische Ansätze, dieses Konstrukt zu definieren, werden im Folgenden vorgestellt.

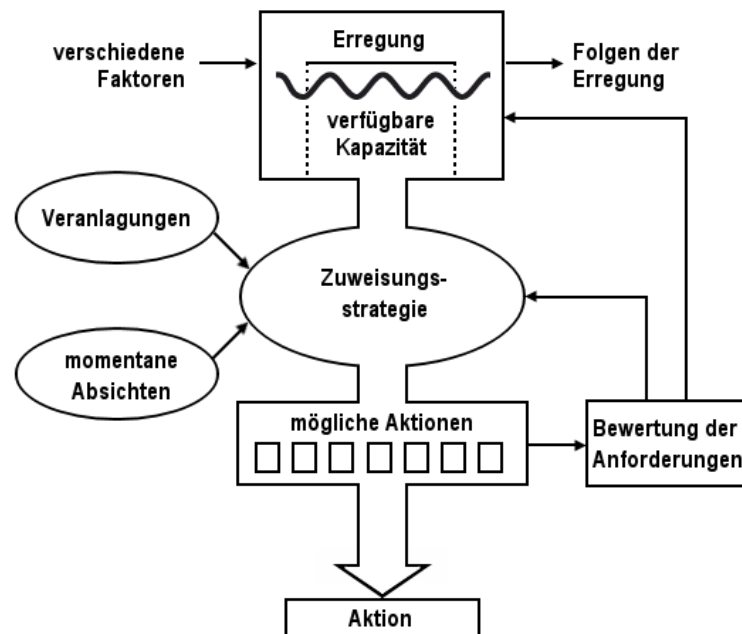


Abbildung 6.1: Modell einer zentralen Aufmerksamkeitskapazität; modifiziert nach Kahneman (1973)

Modelle unspezifischer Kapazität

Für Modelle, die eine einheitliche, unspezifische Kapazität annehmen (bezeichnet auch als Einzelressourcenmodelle, engl. *single resource models*) richtet sich die Zuweisung dieser Kapazität oder Ressource zu Aufgaben allein nach Anforderung (engl. *demand*) und Angebot (engl. *supply*). Die Schwierigkeit einer Aufgabe bestimmt deren Ressourcen-Anforderung. In manchen Modellen wird das Ressourcen-Angebot als konstant angenommen (z. B. im Modell von Navon & Gopher, 1979). Die meisten Modelle gehen aber von einer variablen Kapazität aus, die von situativen und individuellen Aspekten beeinflusst wird.

Das bekannteste dieser Modelle formuliert Kahneman (1973; vgl. Abb. 6.1). Er argumentiert, dass dem kognitiven System ein einheitliches Reservoir begrenzter Kapazität zur Verfügung steht, um die Aufgabenausführung zu unterstützen. Schwierige Aufgaben erfordern eine große Menge dieser Ressource, was zu Problemen führt, wenn gleichzeitig andere Prozesse darauf zugreifen müssen. Einfache, hoch geübte oder automatisierte Aufgaben erfordern wenig Ressourcen und können leichter gleichzeitig ausgeführt werden. Im Gegensatz zu Einkanal-Theorien kann dieses Modell die Par-

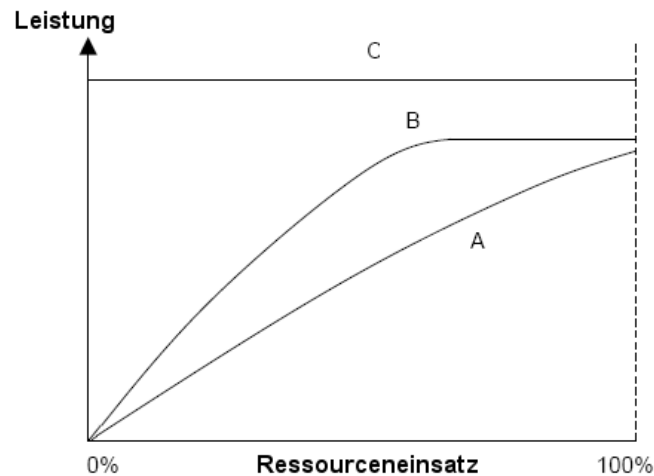


Abbildung 6.2: Abhängigkeit der Leistung von Ressourceneinsatz und Datenqualität: verschiedene Verläufe von Performance-Resource-Funktionen; A: vollständige Ressourcenlimitierung, B: Ressourcen- und Datenlimitierung, C: vollständige Datenlimitierung

allelisierung, also die erfolgreiche gleichzeitige Ausführung mehrerer Tätigkeiten, erklären. Die allgemeine Gesamtmenge an Ressourcen ist variabel und abhängig vom individuellen Erregungslevel. Die tatsächlich einsetzbare Menge an Ressourcen wird von überdauernden individuellen Eigenschaften und den unmittelbaren Absichten beeinflusst, die die Zuweisungsstrategie bestimmen. Für schwierige Aufgaben kann das Erregungsniveau adaptiv gesteigert und so die verfügbare Menge an Ressourcen erhöht werden.

Kahneman sieht in Aufmerksamkeit ein energetisches Konzept, das willkürlich verteilt werden kann. »Aufmerksamkeit« wird von ihm analog zu »Anstrengung« verwendet, um den energetischen Charakter der Aufmerksamkeit als graduell manipulierbare Größe zu betonen.

Einen deutlicheren Bezug von Aufmerksamkeit und Leistung stellen Norman und Bobrow (1975) in ihrer Weiterentwicklung des Ressourcenkonzepts heraus. Auch sie gehen von kapazitätsbegrenzter Aufmerksamkeit aus, die zentral kontrolliert wird. Die Leistung bei der Bearbeitung einer Aufgabe ist aber nicht zwangsläufig Ressourcenabhängig, sondern kann auch von der Datenqualität beeinflusst sein, wenn die Aufgabenleistung durch Erhöhung der Ressourcen nicht gesteigert werden kann. Das kann

bei sehr leichten Aufgaben, unzureichender Informationsqualität oder automatisierten Tätigkeiten der Fall sein (vgl. Goldhammer & Moosbrugger, 2005; Wickens & McCarley, 2008). Eine grafische Darstellung dieses Zusammenhangs bietet die Leistungs-Ressourcen-Funktion (engl. *performance-resource function*, PRF; vgl. Abb. 6.2).

Modelle spezifischer Kapazität

Kahnemans Modell einer einzelnen Ressource erklärt Interferenzen zwischen Aufgaben über das Angebot der Ressource oder über strukturelle Effekte, wenn beispielsweise gleichzeitig auf zwei entfernte Punkte geblickt werden soll. Interferenzeffekte für leichte Zweifachaufgaben, die nicht über Struktureffekte zu erklären sind, führen zur Formulierung von Modellen, die mehrere spezifische Ressourcen annehmen. Die Ressourcen werden zu verschiedenen Stufen der Informationsverarbeitung in Beziehung gesetzt. So vermutet Allport (1980) verschiedene Aufmerksamkeitsmodule, die jeweils bestimmte Fähigkeiten realisieren. Die Kapazität jedes der Module ist begrenzt. Ähnliche Aufgaben, die die gleichen Module beanspruchen, führen zu einem lokalen Kapazitätsengpass, der die Interferenzeffekte begründet (vgl. Goldhammer & Moosbrugger, 2005). Ähnlich dem Modell von Allport schlagen Navon und Gopher (1979) ein Modell multipler Ressourcen vor. Auch sie erklären Leistungsdefizite bei ähnlichen Aufgaben über spezifische Interferenzen bei der Informationsverarbeitung.

Die Anzahl der Module bzw. Ressourcen wird in den Modellen von Allport, Navon und Gopher nicht spezifiziert. Das Mehrfachressourcenmodell von Wickens (1980, 1984) beschreibt eine begrenzte Anzahl an Ressourcen und ihre Verarbeitung, das viele experimentelle Befunde zu Interferenzeffekten in Multitasking-Aufgaben erklären kann. Nach Wickens ist das Mehrfachressourcenmodell ein »*model of time-sharing or multitask divided attention performance*« (Wickens & McCarley, 2008, S. 242).

Wickens positioniert sein Modell im Kontext der Aufmerksamkeit (Goldhammer & Moosbrugger, 2005) und setzt es explizit zu Informationsverarbeitungsprozessen in Beziehung, indem er die Rolle der Aufmerksamkeit als »*glue or emergent feature that binds together all the various components of cognition and human information processing*« (Wickens & McCarley, 2008, S. 239) beschreibt. Er charakterisiert den Verarbeitungsprozess anhand der Stufen eines vereinfachten Informationsverarbeitungsmodells (Wahrnehmung, zentrale Verarbeitung, Handlungsausführung), Mo-

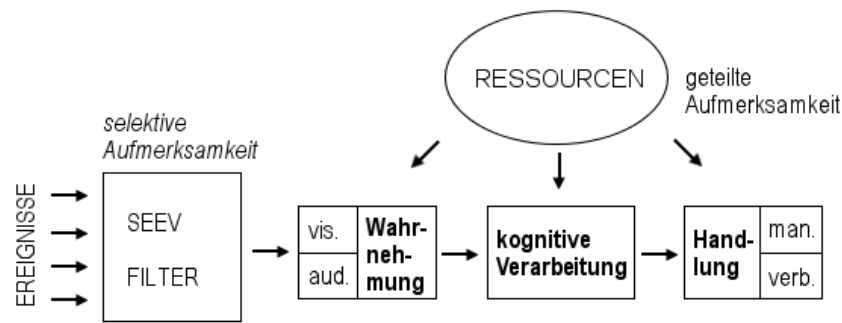


Abbildung 6.3: Vereinfachtes Informationsverarbeitungsmodell; modifiziert nach Wickens (2007) und Lee (2007)

dalität (visuell, akustisch), Codierung (verbal, räumlich) und visueller Kanal (fokal, peripher). Gleichzeitig ausgeführte Aufgaben beeinflussen sich danach um so mehr, je größer ihre Übereinstimmung in diesen Attributen ist.

Wickens (2008) betont, dass die Architektur des Mehrfachressourcenmodells aus drei Komponenten besteht, die die Leistung bei Multitasking-Aufgaben bestimmen:

Struktur der Ressourcen Bei Mehrfachaufgaben betrifft das insbesondere den Grad der Ähnlichkeit der Aufgaben. Damit können Interferenzeffekte unabhängig vom Grad der Belastung erklärt werden.

Ausprägung der Ressourcen-Anforderung Die Anstrengung, mit der auf eine Anforderung reagiert wird ist dagegen stark abhängig vom Grad der Belastung, die von der Aufgabe gefordert wird.

Zuweisungsstrategie Die Verteilung der Ressourcen kann nach individueller Einschätzung der Anforderungen erfolgen.

Das Modell multipler Ressourcen liefert damit die theoretische Grundlage folgender in Kapitel 4 formulierter Anforderungen an das Bewertungskonzept:

- *Multitasking*-Szenarien stellen besondere Ansprüche an die Informationsverarbeitung. Die experimentelle Umsetzung muss diese Szenarien entsprechend abbilden.
- Die Art der *Informationsverarbeitung* ist expliziter Bestandteil des Modells. Sie muss für die Analyse und experimentelle Umsetzung berücksichtigt und valide abgebildet werden.

- Die *Schwierigkeit* der Aufgabe entspricht der Ausprägung der Ressourcen-Anforderung. Damit kann dieser Aspekt über die Gestaltung der Aufgaben manipuliert werden.
- Die Auffassung von Aufmerksamkeit als begrenzter und verteilter Ressource ermöglicht potenziell die Untersuchung der *Ressourcenverteilung* unter verschiedenen Priorisierungen, die experimentell zu kontrollieren sind.

Ein vereinfachtes Modell der Informationsverarbeitung in Abbildung 6.3 stellt die wichtigsten Aspekte dieses Kapitels grafisch dar. Es stellt die Stufen der Wahrnehmung, Verarbeitung und Handlung heraus und unterscheidet dabei zwischen visuellen und auditiven Prozessen der Informationsaufnahme sowie manuellen und verbalen Prozessen der Ausführung. Die Funktion der Aufmerksamkeit wird deutlich als dual herausgestellt: Zum einen dient sie als Filter für aufgenommene Reize, zum anderen nimmt sie eine energetische Aufgabe wahr, indem sie den einzelnen Verarbeitungsschritten, potenziell auch für die gleichzeitige Bearbeitung verschiedener Aufgaben, Ressourcen zuweist.

Im nächsten Kapitel werden mit Workload, Belastung und Beanspruchung Konzepte eingeführt, die in enger Beziehung zur Auffassung von Aufmerksamkeit als Ressource stehen.

7 Workload, Belastung und Beanspruchung

Im Folgenden wird zuerst die Bedeutung von Workload in der Forschung zu Mensch-Maschine-Systemen historisch motiviert. Ihr breiter potenzieller Geltungsbereich macht eine Erläuterung der Begriffe Workload, Belastung und Beanspruchung erforderlich. Performance Operating Characteristics werden anschließend als geeigneter Rahmen zur Analyse des Zusammenhangs von Workload und Leistung vorgestellt.

7.1 Motivation

Die Entwicklung der Workload-Forschung ist eng verbunden mit Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Mensch-Maschine-Systemen, die insbesondere seit den 40er Jahren des letzten Jahrhunderts im Bereich der Fliegerei nötig wurden (vgl. dazu auch die Ausführungen in Kapitel 1). Leistungsdefizite, die zu Unfällen mit teils katastrophale Folgen führten, wurden häufig undifferenziert unter dem Begriff »*pilot error*« zusammengefasst (vgl. Fitts & Jones, 1947). Die Analyse der Begleitumstände dieser »Fehler« führt zu der Erkenntnis, dass die Leistung des Gesamtsystems von den Verarbeitungskapazitäten des Piloten abhängt (vgl. Chapanis, 1999). Diese werden beeinflusst von Menge und Art der auszuführenden Aufgaben, die wiederum von der Gestaltung der Benutzerschnittstelle abhängig sind. Nach Vidulich (2003) ist Workload ein Schlüsselkonzept, das die praktischen Auswirkungen der Anforderungen an die Informationsverarbeitungsprozesse des Piloten und damit die Leistung des Gesamtsystems widerspiegelt. Es stellt deshalb ein wichtiges Kriterium für die Einführung neuer Technologie im Cockpit dar.

Über das Konstrukt Workload soll der Bezug zwischen Informationsverarbeitung, Aufmerksamkeit und situativen Ansprüchen an den Operateur und dessen erbrachter Leistung erfasst werden. Cain (2007) sieht die Leistung stark von Workload beeinflusst und identifiziert im Bedarf, die Systemleistung vorherzusagen, den Hauptgrund für die Quantifizierung von Workload. Seiner Auffassung nach ist Workload ein vermittelndes Konstrukt, das Einblick gewähren kann, wann gesteigerte Aufgabenanforderungen zu unannehmbaren Systemleistungen führen.

7.2 Begriffsbestimmung

7.2.1 Workload

Da in der vorliegenden Untersuchung nicht von physischer Workload oder Arbeit die Rede ist, können die Bezeichnungen mentale, kognitive oder nur Workload als Synonyme aufgefasst werden.

Im Folgenden werden verschiedene Definitionen von Workload vorgestellt, die jeweils unterschiedliche Aspekte des Konstrukts betonen. Im Anschluss werden diese Aspekte hin zu einem einheitlichen Verständnis von Workload integriert.

Den Bezug von Workload zu den **Anforderungen**, die die Umwelt an den Operateur stellt, betonen Kantowitz und Simsek (2001). Sie definieren Workload als »*intervening variable, similar to attention, which modulates the tuning between the demands of the environment and the capabilities of the organism*« (Kantowitz & Simsek, 2001, S. 396). Meijman und O'Hanlon (1984) stellen zusätzlich die Rolle der Ressourcen heraus: »*Mental workload depends upon the demands in relation to the amount of resources the operator is willing or able to allocate, and is therefore a relative concept.*« (zitiert nach De Waard, 1996, S. 16). Nach Gopher und Donchin (1986) ist Workload »*invoked to account for those aspects of the interaction between a person and a task that cause task demands to exceed the person's capacity to deliver*« (S. 41-3). Die ursächliche Bedeutung von Anforderungen für die Entstehung von Workload stellt Hart (2006) heraus: »*Workload is a term that represents the cost of accomplishing mission requirements for the human operator.*« (S. 905).

Die meisten Definitionen von Workload setzen äußere, Aufgaben-bezogene Anforderungen (s.o.) in Beziehung zu einer **Ressource** oder Kapazität, die der Operateur

bereitstellt, um das Ziel der Aufgabe zu erreichen. Wickens (2002) beschreibt diesen Zusammenhang so: »*Mental workload describes the relation between the (quantitative) demand for resources imposed by a task and the ability to supply those resources by the operator.*« (S. 161). Den Aspekt der Begrenzung dieser Kapazität nehmen O'Donnell und Eggemeier (1986) auf und definieren »*workload as that portion of the operator's limited capacity that is actually required to perform a particular task*« (zitiert nach De Waard, 1996, S. 16). Explizit stellt De Waard (1996) den Bezug zwischen Anforderung und Ressource heraus: »*Workload is the result of reaction to demand; it is the proportion of the capacity that is allocated for task performance. Effort is a voluntary mobilisation process of resources.*« (De Waard, 1996, S. 16).

Die Verbindung von Anforderungen und Ressourcen sehen viele Ansätze im Bezug beider Konzepte zur **Informationsverarbeitung**: »*Defining workload in terms of information processing demanded versus what is available is a common approach*« (Vidulich, 2003, S. 116). Nach Gopher und Donchin (1986) ist Workload »*a hypothetical construct intended to capture limitations on the operator's information processing apparatus as these are viewed from the perspective of some assigned task*« (S. 41-21). Im gleichen Beitrag stellen die Autoren zusätzlich die vermittelnde Funktion des Konzepts heraus: »*mental workload is clearly an attribute of information processing and control systems that mediate between stimuli, rules, and responses*« (Gopher & Donchin, 1986, S. 41-3). De Waard (1996) beschreibt Workload als »*specification of the amount of information processing capacity that is used for task performance*« (S. 15) und betont damit die Abhängigkeit der Leistung von Workload-Mechanismen.

Viele Autoren stellen diesen **Leistungsaspekt** ihrer Auffassung von Workload in den Vordergrund. So befinden Hart und Staveland (1988): »*workload is a hypothetical construct that represents the cost incurred by a human operator to achieve a particular level of performance*« (S. 140). Ähnlich charakterisiert Cain (2007) Workload als »*interim measure and one that should provide insight into where increased task demands may lead to unacceptable performance*« (S. 3). Entsprechend seinem Einzelressourcenmodell (vgl. Abb. 6.1) definiert Kahneman (1973) Workload als »*the proportion of the capacity an operator spends on task performance*« (zitiert nach Brookhuis & De Waard, 2001, S. 322). Kantowitz und Simsek (2001) sehen den Bezug zur Leistung noch ausschließlicher: Workload »*cannot be directly observed but must be inferred from changes in performance*« (S. 396).

Eine Begriffsbestimmung, die die Anforderung der Aufgabe, darüber hinausgehende subjektive Einflüsse und die **integrierende Rolle** von Workload betont, liefern Hart und Staveland (1988): *»An operator's subjective experience of workload summarizes the influences of many factors in addition to the objective demands imposed by the task. Thus, workload is not an inherent property, but rather it emerges from the interaction between the requirements of a task, the circumstances under which it is performed, and the skills, behaviors, and perceptions of the operator.«* (S. 140). Auch Moray et al. (1979) stellen die vermittelnde Position von Workload heraus: *»The concept of mental workload has been proposed as an inferred construct that mediates between task difficulty, operator skill, and observed task performance.«* (zitiert nach Wickens, 2001, S. 443). Hart und Wickens (1990) schließlich betonen die Einordnung in das betrachtete Gesamtsystem: *»Workload is a general term used to describe the cost of accomplishing task requirements for the human element of man-machine systems.«* (S. 258)

Die meisten dieser Definitionen formulieren Ansprüche einer Aufgabe an den Operateur. Diese Trennung in äußere Einflüsse und subjektive Auswirkung betont das Belastungs-Beanspruchungskonzept, das im deutschen Sprachraum besonders im Bereich der Arbeitswissenschaften große Bedeutung hat.

7.2.2 Belastung und Beanspruchung

In den Definitionen von Workload wird zwischen von außen wirkenden Anforderungen (engl. *»demands«*) und den individuellen Reaktionen darauf, die als Kosten der Informationsverarbeitung, Ressourcenzuweisung oder Anstrengung aufgefasst werden, unterschieden. Eine noch deutlichere Trennung nimmt in dieser Hinsicht das Belastungs-Beanspruchungskonzept vor. Die Begriffe werden seit den 1940er Jahren in der deutschsprachigen Arbeitspsychologie auch im Sinne einer psychischen Einwirkung auf den Operateur verwendet (vgl. Bornemann, 1942/1959).

Seit 1987 ist das Konzept der psychischen Belastung und Beanspruchung Bestandteil einer DIN-Norm (DIN 33405, 1987). Danach wird psychische Belastung definiert als *»die Gesamtheit der erfassbaren Einflüsse, die von außen auf den Menschen zukommen und auf ihn psychisch einwirken«*. Psychische Beanspruchung ist *»die individuelle, zeitlich unmittelbare und nicht langfristige Auswirkung der psychischen Belastung*

7 Workload, Belastung und Beanspruchung

im Menschen in Abhängigkeit von seinen individuellen Voraussetzungen und seinem Zustand«. Diese Norm wurde Teil des europäischen Normenwerks und infolgedessen auch als deutsche Norm übernommen (DIN EN ISO 10075-1, 2000).

Zwischen Belastung und Beanspruchung wird also eine Ursache-Wirkung-Beziehung vermutet. Äußere Faktoren belasten den Organismus, der mit Beanspruchung reagiert. In der Erfassung von Beanspruchung als Belastungsfolge, stimmt dieser Ansatz weitgehend mit der Erfassung von Workload überein. Beide Konzepte werden auf ähnliche Art operationalisiert und deshalb in deutschsprachigen Veröffentlichungen als weitgehend synonym verwendet. Die scheinbar saubere konzeptuelle Abtrennung der Belastung als externe Ursache der Beanspruchung wird dann problematisch, wenn es um die Operationalisierung von Belastung geht. Die Definition suggeriert eine Objektivität des Konstrukts, die eine einfache Messung der relevanten Bestimmgrößen nahe legt. Häufig wird dazu die Analogie zur physischen Belastung strapaziert (vgl. Hofmann, Keller & Neuhaus, 2002), indem beispielsweise das Gewicht eines anzuhebenden Gegenstands als Entsprechung der psychischen oder kognitiven Belastung herhalten muss. Die Problematik dieses Ansatzes wird deutlich, wenn man ihm das Verständnis von Workload als ein in der Interaktion Operateur–Aufgabe begründetes hypothetisches Konstrukt gegenüberstellt, das nicht unabhängig vom Operateur betrachtet werden kann (vgl. Gopher & Donchin, 1986). Durch die Messung des Gewichts kann tatsächlich davon ausgegangen werden, die physikalische Belastung zu erheben, da die Beziehung zwischen Aufgabe und Operateur auch für Unbeteiligte nachvollziehbar, transparent und nicht sehr variabel ist. Für die Messung der »Gesamtheit der erfassbaren Einflüsse, die (...) auf den Menschen (...) psychisch einwirken« wird deutlich, dass die Beziehung zwischen leicht messbaren physikalischen Größen und deren psychischen Einflüssen nicht transparent, nur schwer nachvollziehbar und hoch variabel ist. Ein Umstand, den Schmidtke (2002) so kommentiert: *»Einer solchen Messung hat sich die Komponente Belastung bisher als unzugänglich erwiesen. Dies liegt u. a. am Fehlen eines Bezugssystems für die außerordentliche Vielfalt an Aufgaben, die durch mentale Tätigkeit zu bewältigen sind.«* (S. 6). Buld (2001) empfiehlt daher folgendes Vorgehen: *»Was Belastung ist, muss für jede Tätigkeit und Fragestellung neu eingegrenzt werden.«* (S. 19).

7.2.3 Zusammenfassung und Konsequenzen

Die Ausführungen der beiden vorangegangenen Abschnitte lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

Die verschiedenen Definitionen von Workload betonen verschiedene Aspekte der Interaktion, stehen sich aber nicht unversöhnlich gegenüber. Ähnliche Auffassungen von Konzepten und Prozessen überwiegen.

Versucht man, die verschiedenen Definitionen zu integrieren, lässt sich eine strukturelle Auffassung von Workload herausarbeiten: Workload entsteht primär durch die *Anforderungen* einer Aufgabe an den Operateur. Den Anforderungen begegnet der Operateur mit der Mobilisierung von *Ressourcen* durch Aktivierungsprozesse, beispielsweise durch Anstrengung. Die Kopplung von Anforderungen und Ressourcen erfolgt über die Belastung des *Informationsverarbeitungssystems*. Mit der Handlungsausführung als Ergebnis der Informationsverarbeitung wird die enge Verbindung von Workload und *Leistung* deutlich.

Der Begriff der Ressource oder Kapazität, wie er in den voranstehenden Definitionen verwendet wird, ist überwiegend kompatibel zur Auffassung von Ressource als energetischem Konstrukt der Aufmerksamkeit, das limitiert ist, dessen Zuweisung aber bewusst und willentlich erfolgen kann. Nach dieser Auffassung entsteht Workload durch Anforderungen an die verschiedenen Stufen der Informationsverarbeitung. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass Workload ein mehrdimensionales Konstrukt ist. Dieser Auffassung ist auch Cain (2007): »*That mental workload is multidimensional is not seriously challenged today.*« (S. 24).

Durch ihren direkten Einfluss auf die Leistung kann die zusätzliche Erfassung von Workload bei der Leistungserhebung wertvolle Informationen zur Aufgabenausführung liefern.

Als Ansatzpunkt der Belastung durch die Bearbeitung einer oder mehrerer Aufgaben kann das Informationsverarbeitungssystem angenommen werden. Das Konzept der Belastung entzieht sich weitgehend einer Operationalisierung. Über die subjektive Erfassung der informatorischen Beanspruchung als unmittelbarer Belastungsfolge kann dieses Problem aber umgangen werden.

Um es in der Terminologie des Belastungs-Beanspruchungskonzeptes auszudrücken, wird in der aktuellen Untersuchung versucht, das von Schmidtke (2002) angesprochene

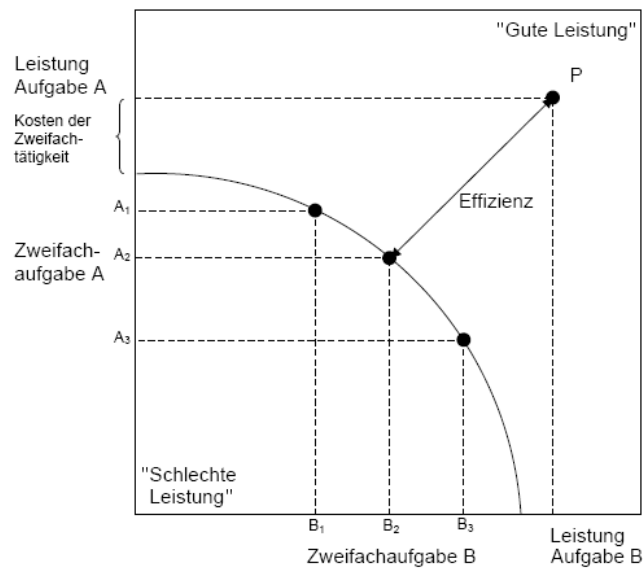


Abbildung 7.1: Typischer Verlauf einer Performance-Operating-Characteristic

fehlende Bezugssystem zur Operationalisierung von Belastung durch eine Erhebung der unmittelbaren informatorischen *Beanspruchung* als Folge informatorischer *Belastung* (vgl. Schmidtke, 1996) zu ersetzen. Eine informatorische Beanspruchungsanalyse dient damit der indirekten Erhebung eines informatorischen Belastungsprofils.

7.3 Performance Operating Characteristic

Wie in Abschnitt 6.1.2 beschrieben, kann über eine *Performance Resource Function (PRF)* die Leistung bei der Bearbeitung einer Aufgabe in Abhängigkeit von den investierten Ressourcen dargestellt werden.

Als konzeptuelles Werkzeug ermöglicht eine *Performance Operating Characteristic (POC)* die Darstellung der Leistung von zwei Aufgaben, die gleichzeitig bearbeitet werden (vgl. Abb. 7.1). Anders als bei ROC-Kurven, die als Werkzeuge im Rahmen der Signalentdeckungstheorie ($1 - \text{Spezifität}$) gegen Sensitivität darstellen und wegen gleicher Einheiten an Abszisse und Ordinate weiter gehende quantitative geometrische Auswertungen zulassen, wird bei POC-Kurven die Leistung in der einen Aufgabe in Abhängigkeit von der Leistung in der anderen Aufgabe dargestellt. Dadurch wird grafisch illustriert, wie sich beide Aufgaben gegenseitig beeinflussen.

Durch diese Art der Darstellung wird der Grad der Interferenz, also der wechselseitigen Beeinflussung deutlich (vgl. Wickens & McCarley, 2008; Luczak, 1998; Norman & Bobrow, 1975). Wird eine der beiden Aufgaben über alle Priorisierungsstufen perfekt ausgeführt, führt das zu vertikalen beziehungsweise horizontalen Abschnitten in der POC. Können beide Aufgaben über alle Priorisierungsstufen perfekt ohne gegenseitige Beeinflussung ausgeführt werden, erzeugt das eine degenerierte POC, die nur aus dem »*point of optimal divided attention performance*« besteht (Bondar, 2002, S. 17; vgl. Punkt *P* in Abb. 7.1). Die Abbildung weist auf einen verbreiteten Befund bei der Untersuchung von Mehrfachaufgaben hin, nämlich dass die Einführung einer Zusatzaufgabe zu überproportionalen Leistungseinbußen gegenüber den Leistungen bei den Einzelaufgaben führt, auch wenn die Zusatzaufgabe mit minimalem Ressourceneinsatz bearbeitet wird. Diese Leistungseinbußen werden als Kosten der Gleichzeitigkeit (engl. *cost of concurrence*) bezeichnet (vgl. Navon & Gopher, 1979). Der dargestellte Verlauf der POC für die Aufgaben A und B zeigt eine leichte Interferenz zwischen den Aufgaben. Der Abzug der Ressourcen von einer führt zu einer Leistungssteigerung bei der anderen Aufgabe, führt aber nicht zu einem perfekten, linearen *Trade-off* zwischen den Aufgabenleistungen.

Der Abstand zwischen dem experimentell bestimmten Kurvenverlauf und dem Punkt der optimalen Multitasking-Leistung *P* lässt Rückschlüsse auf die Effizienz der Mehrfachtätigkeit zu und steht in umgekehrtem Zusammenhang zur Fähigkeit, Aufmerksamkeitsressourcen auf die beiden Aufgaben aufzuteilen (vgl. Bondar, 2002).

Eine POC kann empirisch bestimmt werden, indem die Probanden instruiert werden, eine Aufgabe gegenüber der anderen nach einem vorgegebenen Schlüssel zu priorisieren. Durch Verwendung verschiedener Priorisierungen können die einzelnen Punkte der Kurve lokalisiert werden.

8 Spezielles Evaluationskonzept

Die vorangehenden Kapitel haben von unterschiedlichen Ausgangspunkten Anforderungen an ein Evaluationskonzept abgeleitet. Im Folgenden werden diese Anforderungen zusammengefasst und zu einem speziellen Evaluationskonzept integriert, das Aufbau und Ablauf der experimentellen Untersuchung vorgibt.

8.1 Lokalisierung im allgemeinen Evaluationskonzept

In Abschnitt 2.3.2 wird ein allgemeines Evaluationskonzept vorgestellt, das die Untersuchung von Benutzerschnittstellen in Korrespondenz-Domänen auf verschiedenen konzeptuellen Ebenen empfiehlt. Das spezielle Vorgehen der aktuellen Untersuchung kann zu diesem allgemeinen Rahmen in Beziehung gesetzt werden.

Die Untersuchung **sensomotorischer Aspekte** geht der aktuellen Arbeit voraus. Diese werden von Eichinger, Kellerer, Sandl und Zimmer (2008) behandelt. Im Sinne einer formativen Evaluation (vgl. Abschnitt 2.3.2) fließen die Ergebnisse dieser experimentellen Bewertung in die vorliegende Untersuchung ein. So beruht beispielsweise die Gestaltung der Geometrie der Schaltflächen auf Erkenntnissen und Empfehlungen dieser Studie.

Der Schwerpunkt der aktuellen Untersuchung ist die Analyse von Leistungsaspekten bei der Bedienung des Großflächendisplays in Abhängigkeit von Kontexteffekten, die vor allem auf **kognitive Ressourcen und Prozesse** einwirken. Die Ausführungen der folgenden Abschnitte beziehen sich auf diese Ebene des allgemeinen Rahmenmodells.

Die Untersuchung, inwieweit das Großflächendisplay **Situationsanalyse und individuelle Entscheidungsstrategien** unterstützt, inwieweit also Aspekte des Situationsbewusstseins (vgl. Endsley, 2006) gefördert werden, wird Bestandteil einer weiteren

Studie in der Fortführung des Projekts PanDis sein. Gemäß den Empfehlungen von Pejtersen und Rasmussen (1997) werden diese Versuche im Rahmen realitätsnah simulierter Szenarien durchgeführt. Solange die dort untersuchten Szenarien nur einen auch zeitlich begrenzten Ausschnitt aus dem tatsächlichen Aufgabenspektrum bilden, ist das im Folgenden vorgestellte Vorgehen zur Bewertung auch für diese Stufe der Evaluation einsetzbar und zu empfehlen. Für längere und komplexere Szenarien ist zu erwarten, dass die willkürliche Zuweisung von Aufmerksamkeitsressourcen über einen längeren Zeitraum nicht durch einfache Instruktion erfolgen kann.

Um in Versuchen den Einfluss des tatsächlichen **Arbeitsumfelds** erheben zu können, erfordern diese den Einsatz von leistungsfähigen Simulatoren oder aber den Einsatz im Flugzeug. Da hier komplette Missionen im realistischen Umfeld zu bearbeiten sind, ist die Erzeugung von Kontext über Zusatzaufgaben nicht angezeigt.

8.2 Leistungserhebung

Die Qualität von Eingabegeräten wird häufig im Rahmen von Zeigeaufgaben (engl. *rapid aiming tasks* bzw. *target acquisition tasks*; vgl. MacKenzie, Sellen & Buxton, 1991) untersucht. Dieses experimentellen Paradigma erlaubt die gleichzeitige Erhebung von Maßen der Genauigkeit und Geschwindigkeit und kann leicht an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden. Wegen seiner grundlegenden Bedeutsamkeit und Flexibilität wird dieser Untersuchungsansatz in vielen verschiedenen Gebieten gewählt:

- Vergleich von Eingabegeräten (Schedlbauer, Pastel & Heines, 2006)
- Erstellung von Bewegungsmodellen zur Vorhersage von Zeigeleistung (vgl. Biswas & Robinson, 2009)
- Evaluation neuartiger virtueller Eingabemethoden (Bowman, Kruijff, LaViola & Poupyrev, 2004)

In der vorliegenden Untersuchung wird geprüft, inwieweit ein großflächiges Display mit einem Touchscreen als primärem Eingabeelement schnell und zuverlässig bedient werden kann. Die Vergleichsgrundlage bildet der bereits im Cockpit verfügbare XY-Controller (vgl. Abb. 3.3). Die im Cockpit verwendete Hardware kann für die aktuelle Studie nicht verwendet werden. Als leistungstärkstes indirektes Bedienelement

(vgl. Wickens et al., 2004; Kellerer, 2010) wird statt dessen ein Trackball verwendet (vgl. Abb. 8.1).



Abbildung 8.1: Für die experimentelle Evaluation verwendeter Trackball als Ersatz für den XY-Controller im Cockpit des Eurofighter (vgl. Abb. 3.3)

Es werden zwei verschiedene Zeigaufgaben eingesetzt, die kombiniert eine möglichst große Bandbreite an Auswahlaktionen abdecken. Für beide Aufgabentypen werden die Zeit bis zur Auswahl eines Ziels und die dabei auftretenden Auswahlfehler als Maße der Bediengeschwindigkeit und -genauigkeit erhoben.

Gleichzeitig zur Durchführung der Zeigaufgabe ist eine von verschiedenen Zusatzaufgaben zu bearbeiten. Diese Aufgaben werden nach dem Grad der informatorischen Belastung ausgewählt, der im nächsten Schritt zu ermitteln ist.

8.3 Informatorische Beanspruchungsanalyse

Belastungen, die in hochagiler Umgebung auf den Piloten wirken, beeinflussen besonders Prozesse und Ressourcen der Informationsverarbeitung (vgl. dazu die Ausführungen in den Kapiteln 4 bis 7). Informatorische Belastungen sind schwer zu operationalisieren. Deshalb wird von Piloten deren subjektive informatorische Beanspruchung mittels strukturierter Interviews erhoben und auf Grundlage dieser Angaben für die untersuchten Anwendungsfälle ein Belastungsprofil erstellt (vgl. Anhang A).

Das Belastungsprofil geht in zweierlei Hinsicht in die Versuchsplanung ein: (1) Die informatorische Belastung in den dominierenden Belastungsqualitäten wird einzeln durch **standardisierte Zusatzaufgaben** abgebildet. Diese Betrachtung einzelner

Belastungsdimensionen dient zum einen der elementaren Analyse von informativischen Einflüssen unabhängig von anderer Zusatzbelastung. Dadurch können potenzielle Quellen der Überbelastung identifiziert werden. Zudem schaffen diese standardisierten Belastungskontexte die Möglichkeit, verschiedene Typen von Hauptaufgaben in unterschiedlichen operativen Umgebungen miteinander in ihrer Interferenzneigung zu vergleichen. (2) Das gesamte Belastungsprofil wird durch eine **komplexe Zusatzaufgabe** nachgebildet. Diese Zusatzaufgabe wird aus verschiedenen Einzelaufgaben zusammengestellt. Der Vorteil einer komplexen Zusatzaufgabe liegt in der Möglichkeit, die ganze Breite des Informationsverarbeitungsspektrums zu erfassen. Diese Aufgabe wird jedoch speziell für einen Belastungskontext entwickelt und ist daher nur schwer auf andere operative Umgebungen übertragbar.

8.4 Zusatzaufgaben

Die beschriebenen Attribute des Kontextes sollen durch Zusatzaufgaben abgebildet werden, an deren Auswahl verschiedene Anforderungen zu stellen sind.

Die Auswahl geeigneter Zusatzaufgaben beruht vor allem auf den Ergebnissen der **Analyse des Belastungskontextes** durch eine informatorische Beanspruchungsanalyse. Das Bezugssystem dieser Analyse liefert das in Abschnitt 6.1.2 (vgl. Abb. 6.3) vorgestellte Informationsverarbeitungsmodell.

Die standardisierten Zusatzaufgaben sollen möglichst eindeutig und ausschließlich einer Instanz oder **Dimension der Informationsverarbeitung** zugeordnet werden können.

Eine Voraussetzung zur Mobilisierung variabler Aufmerksamkeitsressourcen ist die potenzielle Veränderlichkeit der Aufgabenkomplexität. Die **Schwierigkeit der Zusatzaufgaben** muss daher manipulierbar sein und möglichst granular abgestuft werden können.

Damit die standardisierten Zusatzaufgaben ihren Zweck erfüllen können, über verschiedene Studien hinweg vergleichbare experimentelle Resultate zu erzeugen, sollten sie keine zeitlich oder finanziell aufwändige Installation erfordern; sie müssen **praktikabel** umsetzbar sein.

Die Implementierung der Aufgaben sollte die Daten in einem **maschinell auswertbaren** Format verfügbar machen. Die kombinatorische Fülle an Faktorkonstellationen erzeugt eine manuell nur schwer zu bewältigende Menge an Daten.

Die zu erbringende Leistung sollte **Ressourcen-abhängig** sein. Das schließt Aufgaben aus, für die zu erwarten ist, dass Teilnehmer bereits umfangreiche Expertise dazu erworben haben. So wäre beispielsweise das Schreiben einer SMS bereits in dieser Hinsicht ungeeignet, da für viele jugendlichen Probanden die Tätigkeit hochgradig automatisiert ablaufen würde und relativ unabhängig von den investierten Aufmerksamkeitsressourcen wäre. Diese Forderung ist eng verbunden mit der Manipulation der Aufgabenschwierigkeit.

Die Zusatzaufgaben sollten einen wissenschaftlich gesicherten **theoretischen Unterbau** haben. Die Parameter der Aufgabe, die Einfluss auf die Leistung nehmen, sollten empirisch abgesichert und dokumentiert sein, damit sie im Experiment entsprechend beeinflusst oder kontrolliert werden können.

Im Umfeld der experimentellen Aufmerksamkeitsforschung existiert eine Vielzahl von Zusatzaufgaben, aus denen gewählt werden kann. Eine Übersicht liefern Eggemeier und Wilson (1991), O'Donnell und Eggemeier (1986) und Verwey und Veltman (1996).

8.5 Aufgabenschwierigkeit und Aufmerksamkeitsverteilung

Wie in Abschnitt 4 erläutert wurde, ist das Arbeitsumfeld des Piloten geprägt von dynamischen Änderungen der Intensität der Belastung und der Gewichtung einzelner Aufgaben. Der Belastungskontext bietet daher die Zusatzaufgaben in zwei Schwierigkeitsstufen an, deren Ausprägung in Vorversuchen ermittelt wird. Nach Wickens und McCarley (2008) kann diese Intensivierung der Beanspruchung unabhängig von der informatorischen Struktur der Aufgaben durchgeführt werden, da diese Einflüsse auf die Multitasking-Leistung weitgehend orthogonal erfolgen.

Um der unterschiedlichen Gewichtung von Aufgaben gerecht zu werden, sind alle Kombinationen von Aufgaben für drei Priorisierungsschlüssel zu bearbeiten: Schwerpunkt auf die Zeigaufgabe, Schwerpunkt auf die Zusatzaufgabe, gleiche Gewichtung.

8.6 Auswertung

Für den auch hier vorliegenden klassischen Fall eines Vergleichs von alternativen Bedienkonzepten umfasst das spezielle Evaluationskonzept damit vordringlich die Untersuchung des Faktors Bediengerät. In einem ersten Schritt ist zu prüfen, ob die Leistung in den Zeigaufgaben spezifisch von Kombinationen aus Bediengerät und Zusatzaufgabe abhängen, ob also verschiedene Zusatzbelastungen unterschiedlich auf Touchscreen und Trackball wirken. Um die Bandbreite realistischer Aufgabenkonstellationen im Cockpit realitätsnah abdecken zu können, muss untersucht werden, ob die Kontextmanipulation durch leichte und schwere Zusatzaufgaben erfolgreich ist.

In einem zweiten Schritt muss auf Ebene der einzelnen Zusatzaufgaben geprüft werden, inwieweit die willkürliche Zuwendung von Aufmerksamkeitskontingenten gelingt. Diese Untersuchung sollte hinsichtlich der Leistung in der Zeige- und der Zusatzaufgabe sowie der auftretenden Workload erfolgen.

Es liegen somit Fragestellungen vor, zu deren Beantwortung im Rahmen mehrfaktorieller Versuchsdesigns Daten erhoben werden. Durch die Menge an Faktoren und folglich von Kombinationen von Faktorstufen empfiehlt sich ein Design mit Messwiederholung. Zur Auswertung sollte daher eine mehrfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung auf allen Faktoren eingesetzt werden.

Um die Einflüsse der Faktoren nicht nur statistisch abzusichern werden zwei weitere grafische Auswertungen empfohlen. Diese sollen helfen, die Ergebnisse der statistischen Auswertung zu interpretieren und den Entscheidern zusätzliche Perspektiven auf die erhobenen Daten zu liefern. In POCs (vgl. Abschnitt 7.3) wird der Schwerpunkt auf die Güte der Mehrfachtätigkeit in Abhängigkeit des verwendeten Bedienelements gelegt. Dadurch ist leicht grafisch zu erkennen, ob differenzierte Effekte von Bediengerät und informatorischem Kontext vorliegen.

Unterstützt wird die Interpretation zusätzlich durch die Erhebung von Belastungsprofilen für die einzelnen Versuchsbedingungen, die in Abschnitt 9 beschrieben werden. Da die Befragung hier nicht die Objektivierung von Kontextbedingungen, sondern die Erhebung subjektiver informatorischer Beanspruchung zum Ziel hat, wird diese Variante des Belastungsprofils im Folgenden als »Workload-Profil« bezeichnet. Das Workload-Profil stellt die informatorische Beanspruchung in den einzelnen Versuchsbedingungen dar. Anhang B enthält den Fragebogen zur Erhebung des Workload-Profiles. Obwohl

8 *Spezielles Evaluationskonzept*

eine statistische Auswertung der Profile durchführbar ist, besteht auch ihre Funktion für diese Untersuchung darin, den von Schmidtke (vgl. 2003) betonten Schwierigkeiten der Beanspruchungsbestimmung durch das auf Wechselwirkung externer und interner Faktoren beruhenden Workload-Konzept Rechnung zu tragen und gemeinsam mit den POCs Interpretationsunterstützung zu bieten.

9 Informatorische Belastungs- / Beanspruchungsanalyse

Im Folgenden wird versucht, über die subjektive informatorische *Beanspruchung* auf die informatorische *Belastung* zu schließen. Es wird dabei eine enge Verbindung dieser beiden Konzepte vermutet. Es ist daher wie auch aus Gründen der begrifflichen Übersichtlichkeit angemessen, im Folgenden ausschließlich von »Belastung« zu sprechen, selbst wenn eine detailliertere Betrachtung eher die Bezeichnung »Beanspruchung« rechtfertigte. Für diesen geschärften Blickwinkel sei auf die Ausführungen in den Abschnitten 7.2.1, 7.2.2 und 8.3 verwiesen.

Es ist das Ziel dieser Analyse, eine informatorische Belastungsstruktur für die ausgewählten Anwendungsfälle zu ermitteln. Dazu werden als Anwendungsfälle zuerst drei Missionstypen vorgestellt. Die informatorischen Belastung zusammengefasst über den gesamten Missionstyp kann vermutlich nur schwer von den Piloten angegeben werden. Die Beurteilung erfolgt daher in zwei Schritten: Erst wird die informatorische Belastungsstruktur von allgemeinen Flugaufgaben erhoben, dann deren Relevanz für die drei Missionstypen. Diese Angaben werden dann zur jeweiligen Belastungsstruktur des Missionstyps integriert.

9.1 Anwendungsfälle: Missionstypen

Die folgenden Missionstypen wurden als Anwendungsfälle ausgewählt, um eine möglichst große Bandbreite von Anforderungen an den Piloten abzudecken. Aus Gründen der Geheimhaltung taktischer Flugmanöver können diese Missionstypen nicht weiter in Erfolgs- oder Misserfolgsszenarien gegliedert werden (vgl. Cockburn, 2001), die als Ausgangspunkt der Belastungsanalyse dienen können. Sie werden daher im Folgen-

den allgemein beschrieben, ohne näher auf die erzeugte informatorische Belastung einzugehen. Das geschieht im nächsten Abschnitt.

Combat Air Patrol – CAP

Der Luftüberwachungseinsatz (engl. *Combat Air Patrol*, CAP) soll ein bestimmtes Ziel oder Gebiet vor Luftangriffen schützen. Dazu fliegen die beteiligten Flugzeuge ein taktisches Muster entlang des zu schützenden Ziels. Im vorgegebenen Fall ist das die vordere Linie der eigenen Truppen (engl. *Forward Line of Own Troops*, FLOT). Der Anwendungsfall ist geprägt von intensiver Kommunikation der beteiligten Piloten, die ihre jeweiligen Überwachungsgebiete koordinieren müssen. Gleichzeitig ist der Luftraum auf ein mögliches Eindringen feindlicher Flugzeuge zu überwachen.

Air-to-Surface – A/S

Für den Angriff eines Bodenziels hält sich der Pilot an eine vorgegebene Flugroute. Dabei muss er die eigene Position und Geschwindigkeit überprüfen, um bestimmte Vorgaben und Sollwerte einzuhalten. Zusätzlich ist der Luftraum auf mögliche Bedrohungen zu überwachen und gegebenenfalls darauf zu reagieren.

Route Management – RM

Der Pilot erstellt, ändert und löscht Wegpunkte und Routen durch Auswahl von und Interaktion mit dem Routenplanungs-Format. Das Bearbeiten von Wegpunkten kann über Funk vorgegeben werden oder ergibt sich aus einer veränderten taktischen Situation.

Weitere Informationen zum militärischen Hintergrund der Anwendungsfälle liefert Kellerer (2010).

9.2 Allgemeine Flugaufgaben

Wickens (2003b) identifiziert folgende allgemeinen Flugaufgaben, die ein Pilot auszuführen hat (vgl. Abschnitt 4.2):

- *Aviation – AVI*: die Führung des Flugzeugs im eigentlichen Sinn

- *Navigation – NAV*: Bewegung von Punkt A nach Punkt B im dreidimensionalen Raum, Vermeidung von Bedrohung durch von Terrain, Wetter etc.
- *Communication – COM*: Kommunikation vorwiegend mit Flugsicherungsinstanzen
- *System Management – SYS*: Verwaltung von Flugzeugsystemen über spezielle Formate

Für den militärischen Flugeinsatz ist noch zu ergänzen:

- *Tactics/Threat Management – TAC*: taktischer Umgang mit militärischen Missionszielen und feindlichen Bedrohungen

Im Vorfeld der Untersuchungen konnte Hadwiger (2007) in einer Befragung von Testpiloten bestätigen, dass diese Einteilung nach Flugaufgaben nachvollziehbar ist und in Kombination das Aufgabenspektrum abbilden kann. Danach besitzt eine Flugmission ein Gewichtungsspektrum, das angibt, wie relevant einzelne Flugaufgaben für die Durchführung sind.

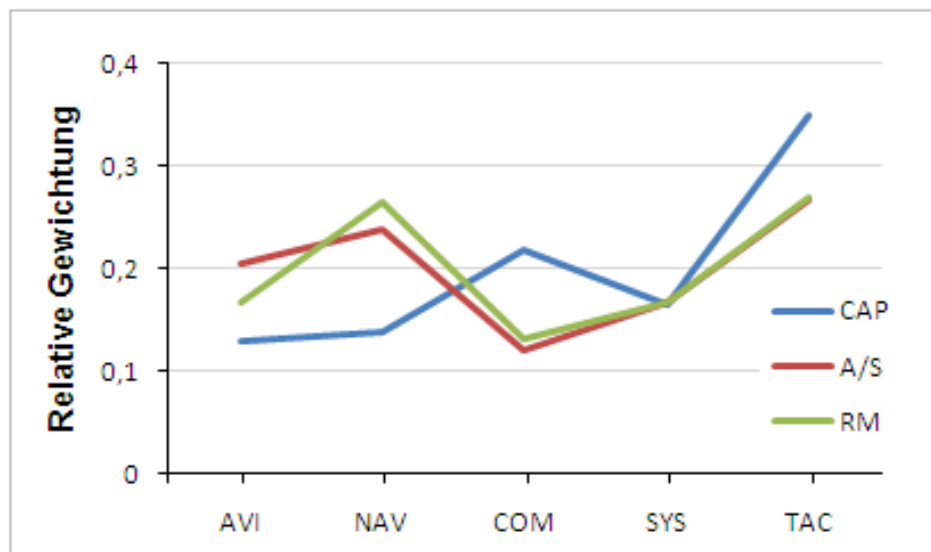


Abbildung 9.1: Gewichtung der betrachteten allgemeinen Flugaufgaben Aviation (AVI), Navigation (NAV), Communication (COM), System Management (SYS), Tactics (TAC); Verbindungen zwischen den Werten illustrieren die Form der Verteilung von Gewichtung; um die Darstellung übersichtlich zu halten wird auf Fehlerindikatoren verzichtet

Um das Gewichtungsspektrum für die eingesetzten Missionstypen zu ermitteln, wurden acht Testpiloten von EADS Military Air Systems in Manching befragt. Sie sollten beurteilen, wie wichtig oder relevant die einzelnen Flugaufgaben für die beschriebenen Anwendungsfälle sind. Die Urteile wurden anhand einer 21-stufigen Skala mit den verbalen Ankern *niedrig* und *hoch* abgegeben. Die Werte wurden über die Teilnehmer gemittelt und die Summe der Gewichte über die Flugaufgaben auf eins normiert. Das Gewichtungsspektrum für die untersuchten Anwendungsfälle zeigt Abbildung 9.1.

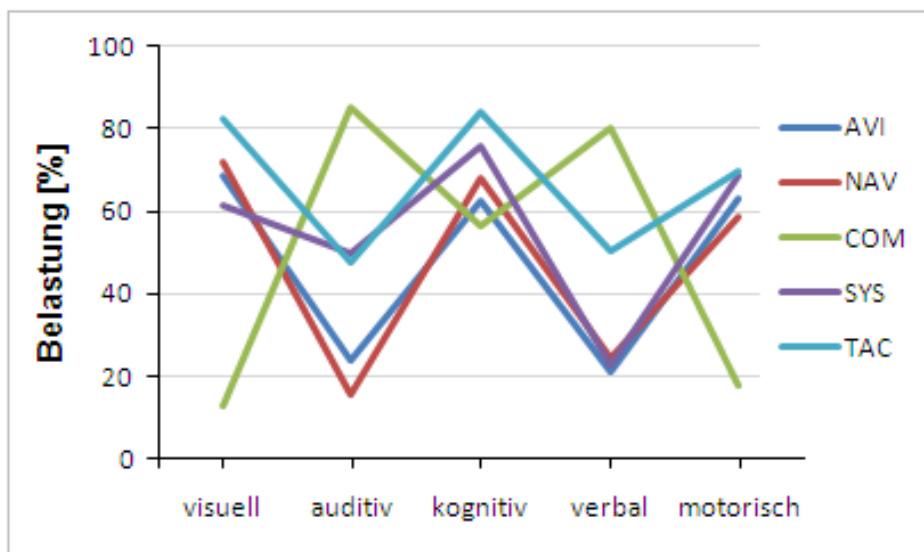


Abbildung 9.2: Belastungsstruktur nach Qualitäten der Informationsverarbeitung für die betrachteten allgemeinen Flugaufgaben Aviation (AVI), Navigation (NAV), Communication (COM), System Management (SYS), Tactics (TAC); Verbindungen zwischen den Werten illustrieren die Form der Verteilung von Gewichtung; um die Darstellung übersichtlich zu halten wird auf Fehlerindikatoren verzichtet

In der gleichen Befragung machten die Piloten Angaben zur informatorischen Belastungsstruktur der allgemeinen Flugaufgaben. Dazu wurden Zahlen von 0 bis 100 angegeben, die die prozentuale Auslastung in der jeweiligen Belastungsdimension repräsentieren. Die Ergebnisse in Abbildung 9.2 zeigen eine weitgehend übereinstimmende Struktur der Belastung über die allgemeinen Flugaufgaben. Es zeigen sich Belastungsspitzen für die visuelle, kognitive und motorische Belastung. Nur die Flugaufgabe „Kommunikation“ weist ein gegenläufiges Muster auf, das nachvollziehbar die auditive und verbale Belastung betont.

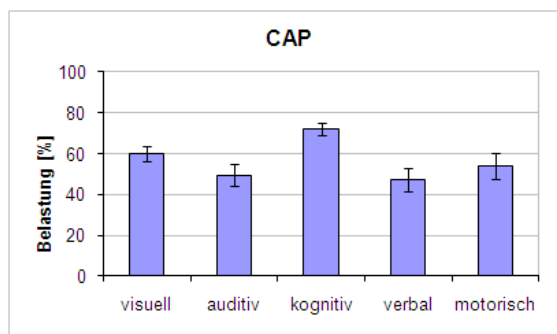
Die für eine Mission integrierte Belastung jeder einzelnen Dimension wird nach folgendem Vorgehen ermittelt:

$$L_{dim} = \sum_{task=1}^5 l_{dim,task} \cdot w_{task}$$

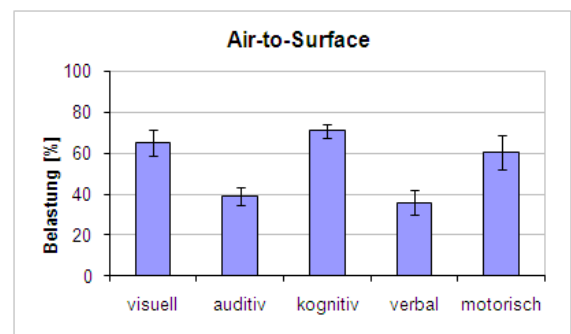
mit L_{dim} als integrierte Belastung einer Dimension dim für eine Mission, $l_{dim,task}$ als Belastung einer Dimension dim für die allgemeine Flugaufgabe $task$ und w_{task} als Gewicht der Flugaufgabe. Es gelten die Restriktionen $\sum_{task=1}^5 w_{task} = 1$ und $0 \leq w_{task} \leq 1$.

Abbildung 9.3 zeigt für die untersuchten Anwendungsfälle eine einheitliche Struktur der informatorischen Belastung. Vor allem werden die visuelle Informationsaufnahme, die zentrale Verarbeitung und die motorische Handlungsausführung beansprucht. Auditive Informationsaufnahme und verbale Handlungsausführung sind auf vergleichbar niedrigem Niveau. Da die Anwendungsfälle so gewählt wurden, dass sie ein breites Einsatzspektrum abdecken, ist davon auszugehen, dass die ermittelte Belastungsstruktur für andere Missionstypen ähnlich ist.

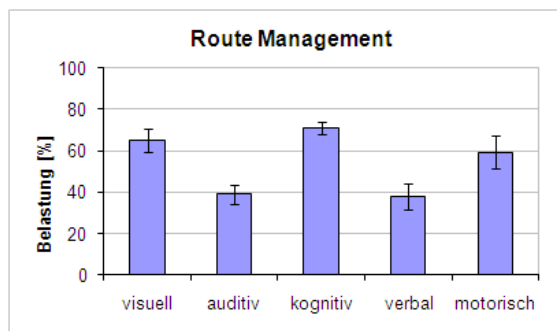
Als Konsequenzen für die Versuchsplanung ergeben sich aus der Belastungsanalyse: Der standardisierte Belastungskontext sollte die dominierenden Dimensionen der Informationsverarbeitung aufnehmen. Das sind für die untersuchten Anwendungsfälle die visuelle, kognitive und motorische Komponente des Informationsverarbeitungsmodells. Ein realitätsnaher Belastungskontext sollte diese drei Belastungsspitzen abbilden, dabei aber zugleich geringe auditive und verbale Belastungskomponenten berücksichtigen.



(a) Combat Air Patrol



(b) Air-to-Surface



(c) Route Management

Abbildung 9.3: Belastungsstruktur nach Qualitäten der Informationsverarbeitung für die betrachteten Missionstypen; dargestellt werden Mittelwerte und Standardfehler

10 Zusatzaufgaben zur Abbildung des Belastungskontextes

Zusatzbelastungen werden so gewählt, dass sie das Spektrum der Informationsverarbeitung von der sensorischen Aufnahme über die Wahrnehmung, der zentralen Verarbeitung bis zur resultierenden Handlung abdecken. In der geplanten Untersuchung werden die Schwerpunkte auf perzeptive, kognitive und motorisch ausführende Aspekte der Verarbeitung und bei der Wahrnehmung auf den dominierenden visuellen Kanal gelegt (vgl. ähnliche Ansätze von Card et al., 1983 und Wickens & Carswell, 2006). Eine ähnliche Kategorisierung verwenden auch McCracken und Aldrich (1984) für ihre Konstruktion von Skalen für die visuelle, auditive, kognitive und psychomotorische Belastung (McCracken & Aldrich, 1984).

Allgemeinen Zusatzaufgaben sollen die Dimensionen der Informationsverarbeitung möglichst spezifisch und isoliert abdecken. Die Schwierigkeit der Aufgaben muss manipuliert werden können und diese Manipulation soll möglichst fein-granular erfolgen können. Diese beiden Bedingungen ergeben sich direkt aus den Anforderungen des Abschnitts 8.4. Da sie als Standardaufgaben auch in anderen Kontexten Verwendung finden sollen, werden allgemein anerkannte und möglichst verbreitete experimentelle Paradigmen verwendet, die zudem in ausreichendem Maß untersucht und dokumentiert sind. Die Anforderungen an eine **komplexe Zusatzaufgabe** werden im entsprechenden Abschnitt formuliert.

10.1 Visuelle Zusatzaufgabe

10.1.1 Entwicklung und Struktur des Paradigmas

Nach einer Definition von Wickens ist die visuelle Suche »*an effort to detect or locate a target item whose presence or position in a search field is not known a priori.*« (Wickens & McCarley, 2008, p. 63). Viele alltägliche sowie beruflich spezialisierte Tätigkeiten beinhalten visuelle Suchvorgänge; Beispiele reichen von der Suche nach Bekannten in einer Menschenmenge bis zur Inspektion von Gepäckstücken an Flughäfen. Auch die erfolgreiche Fahr- und Flugzeugführung ist auf visuelle Suchprozesse angewiesen; sei es bei der Wahrnehmung und Identifizierung von Symbolen am Display oder dem Erkennen von situativen Gefahrenpotenzialen. Aufgrund dieser generellen Bedeutung für verschiedenste Tätigkeitsfelder ist die visuelle Suchaufgabe ein klassischer Untersuchungsansatz der visuellen Belastung in Zweitaufgaben-Szenarien (vgl. Wilschut, Rinkenauer, Brookhuis & Falkenstein, 2008; VanRullen, Reddy & Koch, 2004).

Der Ablauf einer visuellen Suche gliedert sich in folgende Stufen (vgl. Wickens & McCarley, 2008; Ware, 2004):

1. Während der ersten Fixation orientiert sich der Sucher innerhalb des Suchfeldes. Es wird versucht, den Gesamteindruck (engl. *gist*) der Szenerie möglichst schnell zu erfassen. Bereits während dieser Stufe der visuellen Suche beeinflussen *top-down*-Prozesse die Reizaufnahme. Grundlegende Merkmale des Zielreizes, wie eine bestimmte Farbe, Form oder Orientierung bewirken eine Schärfung der Wahrnehmung hinsichtlich dieser Attribute bereits während der ersten Reizaufnahme. Diese erste Stufe der parallelen Verarbeitung von visuellen Merkmalen wird häufig als *pre-attentive*, also unabhängig von Aufmerksamkeitsprozessen stattfindend, bezeichnet (vgl. Treisman & Gelade, 1980). Da aber bereits hier kognitive Prozesse eine große Rolle spielen, hält Ware (2008) diese Bezeichnung für unzutreffend und erklärt sie zu einem »*misnomer*« (S. 29).
2. Wenn das Ziel nicht unmittelbar entdeckt wird, folgt ein fokales serielles Scannen des Suchfeldes. Der Fixationspfad wird durch visuelle Eigenschaften des Suchfeldes (*bottom-up*) und Vorwissen und Strategie des Suchers (*top-down*) beeinflusst.

Für diesen Schritt spielt das nutzbare Sichtfeld (engl. *useful field of view*, UFOV; vgl. Wickens & McCarley, 2008) eine wichtige Rolle. Das UFOV ist der Bereich, in dem während einer Fixation Informationen aufgenommen werden. Die Größe des UFOV ist dabei von Charakteristiken des Reizmaterials, der Suchaufgabe sowie des Suchers abhängig. Kleine, von den Distraktoren kaum zu unterscheidende Ziele oder zusätzliche kognitive Belastung verringern die Größe des UFOV. Es folgt bei konstanter Fixationsdauer, dass sich die Suchdauer für kleinere UFOV erhöht.

3. Jedes potenzielle Ziel stößt einen Urteilsprozess an, der relevante visuelle Attribute des Ziels auf Übereinstimmungen prüft. Das Ergebnis dieses Mustervergleichs ist eine *ja/nein*-Entscheidung, die die Suche abbricht oder fortsetzt.

10.1.2 Charakteristik des gewählten Paradigmas

Die verschiedenen Stufen der visuellen Suche weisen einige wichtige Aspekte auf, die zu einer Differenzierung und Charakterisierung der Suchaufgabe herangezogen werden können. So ist die räumliche Struktur des Suchfeldes wichtig, um Blickbewegungen planen zu können. Ein hoch gegliedertes Suchfeld erlaubt es, Objekte zu gruppieren und zu organisieren. Diese visuelle Strukturierung erlaubt eine effizientere Planung von Fixationen, da so Erfahrung und Vorwissen als *top-down* Prozesse beitragen können, bestimmte Bereiche des Suchfeldes zu gewichten (vgl. hierzu das *SEEV*-Modell nach Horrey, Wickens & Consalus, 2006). Ein unstrukturiertes Suchfeld reduziert diese *top-down*-Prozesse. Vorwissen kann nicht eingesetzt werden, um planen zu können, bestimmte Abschnitte des Suchfeldes vorab mehr oder weniger zu beachten.

Auch der Grad der Bekanntheit des gesuchten Elements ist ein *top-down*-Faktor, der die Suche beeinflusst. Wenn die bestimmenden Attribute des Suchziels unbekannt sind und erst bei Auffinden bekannt werden, kann der visuelle Apparat nicht entsprechend vorbereitet werden. Ist hingegen das Suchziel bekannt, greifen Mustererkennungsprozesse und erhöhen so die Effizienz der Suche (Ware, 2004).

Das klassische Modell der visuellen Suche geht davon aus, dass die serielle Suche die Menge aller potenziellen Ziele erschöpft. Je nach Auftretenswahrscheinlichkeit und Vorwissen über diese Häufigkeiten werden vom Sucher komplexere Strategien und Heuristiken angewendet, um die Suche zu beenden (Wickens & McCarley, 2008).

Visuelle Verarbeitung einzelner visueller Merkmale ist qualitativ verschieden von Merkmalskonjunktionen. Die Suche nach Zielen, die durch Kombination mehrerer Merkmale definiert werden, verläuft im Allgemeinen langsamer als nach Zielen, die sich in nur einem Merkmal von der Umgebung unterscheiden (vgl. Treisman & Gelade, 1980). Aber selbst wenn nur ein visuelles Attribut zur Ziel-Bestimmung verwendet wird, kann sich die Suche schwierig gestalten: »*Search efficiency is modulated, for example, by the similarity between targets and distractors (...) such that even search for a basic visual feature can be slow if the target and distractors are highly similar*« (Wickens & McCarley, 2008, p. 73).

Diese Aspekte bilden ein breites Spektrum von unterschiedlich schwierigen Suchaufgaben. Wolfe (1998) bezeichnet dieses Spektrum der Komplexität von Suchaufgaben mit dem Begriff *Effizienz*. Die Effizienz einer Suche ist demnach abhängig von Bekanntheitsgrad und Anzahl der gesuchten Elemente, der Organisation des Suchfeldes, dem Unterschied Ziel–Distraktoren, der Homogenität der Distraktoren und der Stop-Strategie der Suche.

Vor diesem Hintergrund können die Eigenschaften der eingesetzten visuellen Suchaufgabe eingeordnet und hinsichtlich ihrer Komplexität beurteilt werden. Aus einer visuell dargebotenen Menge von gleichartigen Distraktoren ist ein Zielreiz zu identifizieren, der sich von den anderen Reizen nur hinsichtlich seiner Größe unterscheidet. Als Reize werden einheitlich graue Kreise verwendet. Der Größenunterschied zwischen Ziel- und Distraktor-Kreisen ist gering. Dadurch wird ein *pop-up* des Zielekreises durch rein parallele Prozesse vermieden.

10.2 Kognitive Zusatzaufgabe

10.2.1 Entwicklung und Struktur des Sternberg-Paradigmas

Die Frage nach seriellen oder parallelen Effekten auf Suchprozesse im Kurzzeitgedächtnis gab Anlass zur Entwicklung eines weiteren klassischen Untersuchungsparadigmas. Saul Sternberg (1966, 1969a, 2004) konzipierte eine Versuchsanordnung, bei der über die Erhebung von Reaktionszeiten Aussagen über Prozesse der zentralen Informationsverarbeitung getroffen werden konnten. Als Reizmaterial in der ursprünglichen Versuchsanordnung wurden die zehn Dezimalziffern verwendet. Bei jedem Versuchs-

durchgang wurde den Probanden eine Folge von Ziffern einzeln präsentiert. Nach einem kurzen Zeitintervall wurde eine Testziffer präsentiert, für die möglichst schnell zu entscheiden war, ob sie Element der Liste war oder nicht.

Sternberg integriert seine Untersuchungsergebnisse in ein Modell der Informationsverarbeitung mit folgenden Stufen (Sternberg, 1975; Proctor & Vu, 2006a):

1. **Target identification:** Der Testreiz wird wahrgenommen und mental repräsentiert; er wird *enkodiert*.
2. **Memory search:** Die mentale Repräsentation wird seriell mit jedem Element der gemerkten Liste verglichen; es findet also ein erschöpfender und kein selbstbeendender (engl. *exhaustive* i. g. z. *self-terminating*) Vergleich statt.
3. **Response selection:** Die Auswahl zwischen positiver oder negativer Reaktion wird getroffen.
4. **Response execution:** Die der Auswahl entsprechende Handlung wird ausgeführt.

Die experimentellen Befunde, die zu diesem Modell geführt haben, dokumentieren einen starken linearen Einfluss der Menge der memorierten Items. Jedes zusätzliche Item verlängert die Reaktionszeit um einen konstanten Wert. Eine Vergrößerung der Menge wirkt sich nur auf die Suche im Kurzzeitgedächtnis aus; die anderen Stufen bleiben unbeeinflusst. Die Hypothese paralleler Suchprozesse wurde daher verworfen.

Das *Sternberg-Paradigma* bietet auf solider theoretischer Grundlage die Möglichkeit, kognitive Prozesse zu beeinflussen und den Einfluss verschiedener Parameter auf die Leistung und damit auf die Prozesse der Informationsverarbeitung über Reaktionszeiten messen und interpretieren zu können.

Im Folgenden werden einige der wichtigsten dieser Einflussgrößen vorgestellt.

10.2.2 Charakteristik des gewählten Paradigmas

Die **Listenlänge** ist ein wichtiger Parameter, um die Schwierigkeit der Suchaufgabe zu beeinflussen. Längere Listen erhöhen die Dauer zentraler Suchprozesse. Auch wenn weitere experimentelle Befunde auf ein Abflachen des Einflusses der Listenlänge hinweisen (vgl. Burrows & Okada, 1975), bleibt dieser grundsätzlich Zusammenhang unumstritten.

Die Anzahl der gemerkten Items liegt üblicherweise unterhalb der maximal möglichen Listenlänge. Die Fehlerrate für diese *subspan lists* ist daher sehr gering und liegt meist deutlich unter 5 % (Kahana & Loftus, 1999).

Die Steigung des linearen Zusammenhangs zwischen Listenlänge und Reaktionszeit, zumindest für bis zu acht Items (vgl. Burrows & Okada, 1975), kann als Maß der Effizienz der Suchprozesse im Kurzzeitgedächtnis und der *Kapazität des Arbeitsgedächtnisses* interpretiert werden (vgl. Smith & Langolf, 1981). Items, die schwerer zu erlernen, zu merken und zu vergleichen sind, wie beispielsweise sinnlose Silben, führen zu einer erhöhten Steigung des Zusammenhangs (Cavanagh, 1972). Erhöhte **Wahrnehmungsanforderungen** verlängern den Enkodierprozess und somit auch die Reaktionszeit. (Sternberg, 1992).

Sternberg (1966) kann in seinen Untersuchungen keine seriellen **Positionseffekte** nachweisen. Spätere Experimente belegen einen Einfluss der Art des Reizmaterials sowie deren Präsentation (vgl. Monsell, 1978; McElree & Doshier, 1989): rasche Darbietung (< 500 msec) von Wörtern führt zu deutlichen *Recency*-Effekten. Die Verwendung von wohl bekannten Items hilft, Positionseffekte zu vermeiden (vgl. Kahana & Loftus, 1999).

Zwar verwendet die klassische Variante der Sternberg-Aufgabe eine visuelle Darbietung des Reizmaterials, viele experimentelle Ansätze präsentieren die Reize aber akustisch (vgl. Boyer & Charleston, 1985; Wickens, Hyman, Dellinger, Taylor & Meador, 1986). Die **Modalität** der Darbietung ist potenziell ein wichtiger Aspekt bei der Bearbeitung, der seine Bedeutung vor allem beim Einsatz der Aufgabe in Mehrfachaufgaben-Szenarios erhält. Zwischen visueller und akustischer Reizdarbietung gibt es keine großen Unterschiede, wenn einzig die Sternberg-Aufgabe bearbeitet wird. Aktuelle Forschung weist auf die Ähnlichkeit der internen kognitiven Vorgänge für beide Modalitäten hinsichtlich der Enkodierung und des Abrufs von Information hin (vgl. Visscher, Kaplan, Kahana & Sekuler, 2007): »These data imply that auditory and visual representations undergo very similar transformations while they are encoded and retrieved from memory.« (S. 662). Wird neben der Sternberg-Aufgabe eine weitere Aufgabe bearbeitet, ist eine um so bessere Zweifachaufgaben-Leistung zu erwarten, je weniger die selben Modalitäten beansprucht werden. Zwei schwerpunktmäßig visuelle Aufgaben interferieren unter sonst gleichen Bedingungen stärker als eine visuelle und eine auditive Aufgabe (vgl. Wickens, 2002).

Eine Variable mit großem Einfluss auf die Effizienz der Reaktionsauswahl ist die **Kompatibilität** von Reiz und Reaktion (engl. *stimulus-response* o. *SR compatibility*; vgl. Proctor & Vu, 2006b; Sanders, 1998). Die Kombination gleicher gegenüber unterschiedlicher Modalitäten verspricht Leistungsvorteile. So dokumentieren Chase und Calfee (1969) einen Vorteil entsprechender Modalitäten für die Präsentation der Listen- und des Vergleichs-Items der Sternberg-Aufgabe.

Positive Durchgänge, also Durchgänge, bei denen das Vergleichsitem Element der gemerkten Liste ist, werden geringfügig schneller beantwortet als **negative** Durchgänge. Die Sucheeffizienz, ausgedrückt durch die Steigung des linearen Zusammenhangs Listenlänge–Reaktionszeit, ist aber identisch (vgl. Kahana & Loftus, 1999). Die Dauer der Suche im Kurzzeitgedächtnis wird von der **Verteilung** möglicher Werte beeinflusst (Luce, 1986).

Bei der Durchführung der Sternberg-Aufgabe sind die Listenlänge, die Komplexität und Bekanntheit der Items, beanspruchte Modalitäten, die Reiz-Reaktions-Kompatibilität, das Verhältnis positiver zu negativer Durchgänge sowie die Verteilung der Werte der Testitems relevant, entsprechend zu gestalten und zu dokumentieren.

Die verwendete kognitive Aufgabe nach dem Sternberg-Paradigma ist entlang dieser Attribute so einzuordnen: Um zwei Komplexitätsstufen der Aufgabe zu definieren, wird die Länge der Listen manipuliert. Die leichtere Variante verwendet fünf, die schwere acht Items. Als Reizmaterial werden Dezimalziffern verwendet, um die Anforderungen an Wahrnehmung und Enkodierung und Positionseffekte zu minimieren. Die Items werden auditiv dargeboten. Die Reaktion der Probanden erfolgt verbal, um Reiz und Reaktion kompatibel zu gestalten. Positive und negative Versuchsdurchgänge werden in gleicher Häufigkeit in zufälliger Reihenfolge durchgeführt. Die Darbietung der Testitems erfolgt zufällig mit gleicher Wahrscheinlichkeit für jede Dezimalziffer.

10.3 Motorische Zusatzaufgabe

Um einige zentrale Begriffe erklären und einordnen zu können, wird zunächst der theoretische Rahmen abgesteckt, der den Erwerb und die Ausführung motorischer Fertigkeiten beschreibt.

10.3.1 Schema-Theorie motorischen Lernens

Vor allem die Beobachtung, dass bestimmte motorische Aktionen zu schnell ausgeführt werden, um von sensorischem Feedback beeinflusst werden zu können, führt Schmidt (1975) zur Veröffentlichung seiner Schema-Theorie für das Erlernen diskreter motorischer Fertigkeiten. Rasche Aktionen müssten demnach vorab organisiert und im Gedächtnis gespeichert werden. Die Strukturen, in denen motorische Aktionen dabei organisiert sind, werden nach Adams (1971) als *Motorprogramme* bezeichnet. Sie werden als Einheit unabhängig von sensorischen Feedback ausgeführt. Um Fragen der Kapazität und des Erlernens neuartiger Fertigkeiten begegnen zu können, erweitert Schmidt (1975) den theoretischen Ansatz um die Parametrisierung der Motorprogramme. Er geht von relativen Zeit-Invarianzen als der grundlegender Struktur oder Signatur eines *generalisierten* Motorprogramms aus, dessen wichtigste Parameter Dauer, Amplitude und Kraft der Bewegung sind. Bewegungen mit gleicher Zeitstruktur oder gleichem »Rhythmus« (Schmidt & Wrisberg, 2008) bilden eine eigene Klasse von Bewegungen.

Der Begriff des »Schemas« beschreibt allgemein die Verbindung der Ausführung eines Motorprogramms mit den Resultaten der Ausführung in der Umwelt. Unterschieden werden zwei Arten von Schemata (vgl. Schmidt, 2003): Ein *recall schema* beschreibt die Beziehung zwischen Programmparametern und den Ergebnissen des Programms; ein *recognition schema* beschreibt die Beziehung zwischen den vergangenen sensorischen Konsequenzen durch die Programmausführung und den Ergebnissen der Programms. Die Rolle für das motorische Lernen stellt Schmidt, 2003 heraus: »*Motor learning was conceptualized as the development of these schemata with practice and experience*« (S. 367). Der Erwerb eines neuen generalisierten Motorprogramms ist schwierig und zeitaufwändig, besonders wenn die auszuführende Aufgabe neu, von bereits gelernten verschieden und komplex ist. Das Lernen des Schemas, also die Parameter der Grundstruktur den Umgebungsanforderungen anzupassen, ist vergleichsweise einfach (Schmidt & Young, 2006).

10.3.2 Allgemeine Aspekte des Paradigmas

Vor dem Hintergrund der eingeführten theoretischen Erläuterungen können verschiedenen Aspekte identifiziert werden, die auf die Leistung Einfluss ausüben können. Für

das gewählte Paradigma der manuellen Steckaufgabe sollen diese Aspekte im Folgenden beschrieben werden. Sie dienen dazu, die eingesetzte Aufgabe in allen relevanten Belangen zu charakterisieren.

Aufgaben mit motorischer Komponente können entlang eines Kontinuums angeordnet werden, dessen Endpunkte von **diskreten** Aufgaben mit definiertem Start- und Endpunkt sowie **kontinuierlichen** Aufgaben ohne erkennbarem Beginn oder Ende gebildet werden (vgl. Proctor & Dutta, 1995). Zwischen diskreten und kontinuierlichen Aufgaben können verschiedene Varianten von seriellen oder sequentiellen Aufgaben eingeordnet werden. Hierbei sind eigentlich diskrete Einzelaufgaben in Folge auszuführen. Je nach Gestaltung der Aufgabenkomponenten und Taktung der Sequenzen sind die Übergänge zwischen diskreten, sequenziellen und kontinuierlichen Aufgaben fließend.

Bereits Poulton (1957) gliedert motorische Aufgaben und Fertigkeiten nach dem Grad der **Vorhersagbarkeit** der Aufgabenumgebung: *closed skills* werden danach in vorhersagbaren Settings angesprochen, deren Kontrollstruktur einem offenen Regelkreis (engl. *open loop*) entspricht. *Open skills* treten in Situationen mit großer Unsicherheit über die Umgebungsbedingungen auf, sind stark auf Feedback angewiesen und entsprechen daher einem geschlossenen Regelkreis (engl. *closed loop*). Zwischen diesen beiden extremen Ausprägungen sind die Übergänge fließend (vgl. Wickens & Hollands, 2000).

Von entscheidender Bedeutung bei der Einordnung von motorischen Aufgaben sind die verwendeten **Leistungsmaße**. Es werden üblicherweise klassische Maße der Effektivität und Effizienz wie Reaktionszeit, Bewegungsdauer oder diverse Fehler oder Distanzmaße eingesetzt, um motorische Leistung zu operationalisieren.

Hinsichtlich der Kontrolle von Bewegung kommt deren **Komplexität** eine große Bedeutung zu. Dabei können zwei verschiedene Perspektiven eingenommen werden. Zum einen kann die Komplexität anhand der Freiheitsgrade der Bewegung der eingesetzten Gelenke beschrieben werden: »*The constraint on an movement can thus be characterized by the degrees of freedom of the joints, with one degree of freedom associated with each dimension in which movement can occur*« (Proctor & Dutta, 1995, S. 103). Dem Schulter-Hand-System kommen für unbegrenzte Bewegung damit sieben Freiheitsgrad zu. Kann die Bewegung aus Sicht ihrer dreidimensionalen Zielposition aufgefasst werden, reduzieren sich die Freiheitsgrade auf drei Morasso, 1981. Die Anzahl

der Freiheitsgrade durch Einschränken der Bewegungsfreiheit reduziert werden. Von Bernstein (1967) wurde festgestellt, dass eine solche Reduktion für frühe Phasen des Bewegungslernens charakteristisch ist.

Sowohl zum Aufbau neuer Motorprogramme als auch zur Justierung von Bewegungsparameter ist **Feedback** über intrinsische und extrinsische Bewegungsaspekte wichtig (vgl. Proctor & Dutta, 1995). Wichtigste Quelle intrinsischer Rückmeldung ist das propriozeptive System zur Informationsaufnahme von Mechanorezeptoren der Muskeln, Gelenke und Haut. Extrinsisches Feedback erhält der Handelnde über nach außen gerichtete Sinne, wie Gesichts-, Gehör- oder Tastsinn. Es wird weiter gegliedert in *Wissen um die Ergebnisse* der Handlung und *Wissen um die Leistung* der Handlung. Intrinsische und extrinsische Rückmeldung können verglichen und zum Aufbau motorischer Schemata verwendet werden (vgl. Abschnitt 10.3.1). Wie bereits Pew (1966) experimentell dokumentiert, ist hochgradig automatisierte motorische Handlungsausführung weniger von Rückmeldung abhängig. In Übereinstimmung mit der Schematheorie wird Feedback um so weniger verwendet, je stärker der *open-loop*-Charakter einer Bewegung ist, »beginning with strict closed loop control and reaching levels of higher automatized action with occasional ›executive‹ monitoring« (Pew, 1966; S. 771). Wickens und Hollands (2000) weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass überlernte Fertigkeiten weniger auf visuelle als mehr auf propriozeptive Rückmeldung bauen. Nach Abrams und Pratt (1993) ist für diese Fertigkeiten eine effizientere Nutzung des sensorischen Feedbacks charakteristisch.

10.3.3 Spezielle Charakterisierung der Umsetzung

Die implementierte motorische Zusatzaufgabe ist eine Variante der klassischen Stecktafel-Aufgabe wie sie beispielsweise im Purdued oder Grooved Pegboard Test (vgl. z. B. Strenger, Niederberger & Seelhorst, 2002) eingesetzt wird. Für diese beiden standardisierten Tests werden mehrere kleine Stifte in Vertiefungen einer Lochmaske gesteckt. Für die aktuelle Umsetzung wird ein und derselbe Stift in eine Vertiefung gesteckt, wieder entnommen, in die nächste Vertiefung gesteckt usw. Die Vertiefungen sind in zwei parallelen Reihen angeordnet und ab definierter Startposition nacheinander im Uhrzeigersinn zu bearbeiten.

10 Zusatzaufgaben zur Abbildung des Belastungskontextes

Die Aufgabe ist somit eine Sequenz von diskreten Bewegungskomponenten, die sich nur in der geringfügig veränderten Position der Vertiefungen und damit des Bewegungsziels unterscheiden.

Den Versuchsteilnehmern wird kein visuelles Feedback während der Experimentaldurchgänge gewährt. Das Feedback beschränkt sich auf direkte und über den Griffel vermittelte taktile Hinweise und propriozeptive Reizung. Für die klassische *closed-loop*-Zielbewegung muss die visuelle Information so kompensiert werden.

Die damit steigende Komplexität der Bewegung wird reduziert, indem der Unterarm der Probanden auf Ebene der Lochmaske abgestützt werden. Zudem sind die Vertiefungen der Schablone in regelmäßigen Abständen angeordnet. Die Bandbreite der anzupassenden Bewegungsparameter des Motorprogramms sind damit begrenzt.

Die Aufgabenumgebung ist vorhersagbar; es werden *closed skills* abgefragt.

Die Schwierigkeit der Aufgabe wird beeinflusst, indem der Durchmesser der Bohrungen und der Radius des Griffels gezielt variiert werden.

Als Leistungsmaß wird die Anzahl korrekter Steckvorgänge pro Versuchsdurchgang verwendet.

10.4 Realitätskonforme komplexe Zusatzaufgabe

Eine im Vorfeld der experimentellen Evaluation durchgeführte Belastungsanalyse ergibt eine Dominanz der visuellen, kognitiven und motorischen Aspekte der Informationsverarbeitung. Visuelle Belastung tritt häufig gepaart mit motorischer Belastung auf. Auditive und verbale Belastung treten in geringem Maße und dann ebenfalls gepaart auf. Diese Belastungsstruktur ist konstant über alle betrachteten Anwendungsfälle (vgl. Abschnitt 9). Eine realitätskonforme Zusatzaufgabe muss diese Struktur abbilden. Eine einzelne Aufgabe reicht dazu nicht aus. Daher werden zwei verschiedene Aufgabenparadigmen kombiniert: Eine *Tracking*-Aufgabe und eine Gedächtnisaufgabe zum rückwärts Nachsprechen von Zahlenfolgen (engl. *backward digit span*), im Folgenden kurz als *Readback*-Aufgabe bezeichnet.

Die Trackingaufgabe kombiniert kontinuierliche visuelle und motorische Belastung (vgl. Wickens & Hollands, 2000). Die zusätzlich dargebotene Wiederholungsaufgabe erzeugt auditive Belastung durch das Abspielen einer Folge von Zahlen, kognitive

Belastung durch geforderte Manipulation des Gehörten, beispielsweise durch Sequenzumkehrung und verbale Belastung durch Wiedergabe der Zielsequenz .

Beide Aufgabenkomponenten kommen tatsächlichen Handlungsabläufen im Cockpit nahe. Die Trackingaufgabe bildet Eingabehandlungen ab, die der Pilot kontinuierlich am *Control Stick* ausführen muss. Die Sequenzwiederholung weist große Ähnlichkeit mit *Readback*-Anweisungen auf, bei denen der Pilot Handlungsanweisungen oder übermittelte Information per Funk zur Bestätigung wiederholt.

10.4.1 Tracking-Aufgabe

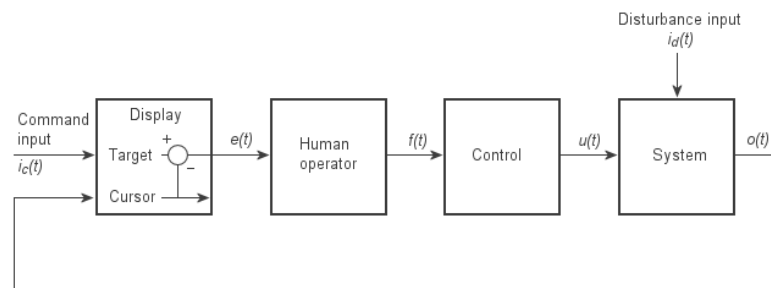


Abbildung 10.1: *Tracking Loop* nach Wickens und Hollands (2000)

Wickens und Hollands (2000) beschreiben Struktur und Ablauf der Tracking-Aufgabe in einem Regelkreis-Schema (vgl. 10.1). Durch diese abstrahierte Darstellung können zentrale Elemente und Einflüsse beschrieben und eingeordnet werden. Eine detailliertere Analyse des Tracking-Regelkreises im Kontext biologischer Servosysteme bietet Huang (1994).

Der menschliche Operator, also der Lenker des Fahrzeugs, der Prozesskontrolleur oder der Pilot, nimmt eine Abweichung aktueller und angestrebter Position, Spur oder Richtung wahr, die zeitlich variiert: $e(t)$. Um diesen Fehler zu reduzieren wird auf das Kontrollgerät, beispielsweise das Lenkrad, eine Kraft $f(t)$ ausgeübt. Diese Kraft erzeugt eine Bewegung des Kontrollgeräts $u(t)$. Der Zusammenhang zwischen aufgewendeter Kraft und Auslenkung des Kontrollgeräts wird als *Kontrolldynamik* definiert. Die Auslenkung des Kontrollgeräts bewirkt eine Positionsänderung, den *System-Output* $o(t)$. Der Zusammenhang zwischen Kontrollauslenkung und System-Output wird als *Systemdynamik* definiert. Die visuelle Repräsentation der Output-Position

an einem Display wird als *Cursor* bezeichnet. Eine erfolgreiche Korrekturhandlung wird die Abweichung von aktueller und angestrebter Position des Systems verringern. Die visuelle Repräsentation des angestrebten Ziels ist das *Target*. Die Differenz zwischen Cursor und Target bildet die Abweichung als den erneuten Ausgangspunkt des Regelkreises.

Fehler entstehen aus zwei Quellen: Befehlseingaben $i_c(t)$ verändern das Ziel, das nachgeführt werden soll. Störeingaben $i_d(t)$ wirken sich direkt auf das System aus. Diese Störungen können vorübergehend oder kontinuierlich auftreten. Kontinuierliche Störungen sind vorhersagbar und periodisch oder zufällig.

Eine wichtige Unterscheidung ist zu treffen zwischen Trackingaufgaben, bei denen Ziel und Cursor Störeinflüssen ausgesetzt sind und sich beide bewegen, sog. **verfolgendes Tracking** (engl. *pursuit tracking*), und Aufgaben mit fixiertem Ziel und beweglichem Cursor, der somit nur die Fehlerabweichung angibt, sog. **kompensatorisches Tracking** (engl. *compensatory tracking*; vgl. Roscoe, Corl & Jensen, 1981). Können in Systemen Störeinflüsse auf die Zielposition auftreten, ist für die Kontrolle eine Nachführanzeige der kompensatorischen Anzeige überlegen. Die verschiedenen Störquellen werden visuell getrennt dargestellt und können so durch den Operateur leichter verarbeitet werden (vgl. Wickens & Hollands, 2000).

Die Art der Tracking-Aufgabe beeinflusst direkt einen Aspekt der Reiz-Reaktions-**Kompatibilität**. Kompensatorische Bewegungen richten sich gegen die Bewegungsrichtung des Cursors. Verfolgendes Tracking bringt die Auslenkrichtung des Joysticks und die Bewegungsrichtung des Cursors in Übereinstimmung.

Ein weiterer Aspekt der Darstellung der Trackingaufgabe ist die **Größe des Displays**, an der diese bearbeitet wird. Mach Stelzer und Wickens (2006) nimmt die Tracking-Leistung mit steigender Displayfläche zu.

Die **Leistung** in der Tracking-Aufgabe wird über die Abweichung erhoben. In regelmäßigen Abständen wird die Abweichung der Ist- von der Sollposition (Ziel vs. Cursor) erhoben und diese Werte über ein Zeitintervall gemittelt. Ein häufig eingesetztes Abweichungsmaß mit langer Historie ist der sog. *Root Mean Square Error* (vgl. Noble, Fitts & Warren, 1955; für eine Beschreibung verschiedener Abweichungsmaße vgl. Hall & Brannick, 2008).

Im Rahmen des in Abbildung 10.1 dargestellten Regelkreises beschreiben **Transfer-Funktionen** die Beziehung zwischen Input und Output der Elemente. So bestehen funktionale Zusammenhänge beispielsweise zwischen Auslenkung und Systemposition, $u(t)-o(t)$ und zwischen Abweichung und Kraft, $e(t)-f(t)$, des Regelkreises. Nach Wickens und Hollands (2000) hängt die Tracking-Leistung entscheidend von diesen funktionalen Zusammenhängen ab.

Um menschliches Verhalten zu beschreiben wird meist darauf verzichtet, den Zusammenhang zwischen Kraft und Auslenkung, $f(t)-u(t)$, zu detaillieren, da diese Zuordnung automatisch erfolgt (vgl. Wickens & Hollands, 2000). Der Zusammenhang zwischen Abweichung und aufgewendeter Kraft ist eng mit den auftretenden Informationsverarbeitungsprozessen verknüpft und betrifft die eigentliche Leistungserbringung. Um den experimentellen Ansatz einzuordnen, ist vor allem die Beziehung zwischen Kontroll- und Systemposition, $u(t)-o(t)$, relevant.

Der **Verstärkungsfaktor** wirkt sich auf Genauigkeit und Geschwindigkeit der Aufgabe aus. Es ist abzuwägen, ob der motorische Aufwand bei niedrigem Verstärkungsfaktor den Zugewinn an Genauigkeit rechtfertigt.

Zeitverzögerung kann großen Einfluss auf die Trackingleistung nehmen. Wird die korrektive Eingabe durch den Probanden nicht unmittelbar von einer Systemreaktion begleitet, wird es Bestandteil der Aufgabe, statt des aktuellen den zukünftigen Zustand des Systems vorherzusagen. Forschungsergebnisse aus dem Bereich des Situationsbewusstseins dokumentieren, dass diese Antizipationsprozesse sehr beanspruchend sind (vgl. Endsley, 2000).

Je nach Gestaltung des Systems erfolgt dessen Kontrolle durch Manipulation der Cursor-Position, -Geschwindigkeit oder -Beschleunigung. Man spricht von Systemen nullter, erster oder zweiter **Ordnung** (vgl. Wickens & Hollands, 2000). Eine Trackingaufgabe kann als Kombination von Positions- und Geschwindigkeitskontrolle betrachtet werden. Diese Systeme sind hinsichtlich der Kontrollleistung durch den Operateur in etwa vergleichbar. Kontrollsysteme zweiter und höherer Ordnung sind nach Kelley (1968) hinsichtlich der Kontrollleistung generell schlechter als Systeme nullter und erster Ordnung. Sie erfordern einen weiteren Integrationsschritt nach der Zeit und erzeugen so zusätzliche Beanspruchung und Verzögerung. Dadurch werden antizipative Prozesse erforderlich, die zentral Verarbeitungsressourcen binden (s. o.).

In engem Zusammenhang mit der Ordnung des Systems steht die Wahl des **Bediengeräts**, mit dem die Aufgabe auszuführen ist (vgl. Wickens, 1976). So ist für die Kontrolle von Systemen nullter Ordnung die Maus eindeutig im Vorteil. Für die Kontrolle von Systemen erster Ordnung, muss eine definierte Nullposition der Maus existieren. Jede andere Position führt zu einer Bewegung der Maus. Für diese Art der Kontrolle hat der unter Federspannung stehende Joystick Vorteile. Wird auf ihn keine Kraft ausgeübt, geht er in die Nullposition zurück. Beinhaltet die Aufgabe große Anteile an Positionskontrolle, weist der Joystick Nachteile auf. Muss eine bestimmte Position unverändert eingenommen werden, ist dazu eine konstante Kraft auf den Joystick auszuüben. Die Eignung der Bediengeräte hängt daher von der Art der Trackingaufgabe, speziell von den Anteilen von der Positions- und Geschwindigkeitskontrolle, ab.

Die Tracking-Leistung ist im fovealen Blickfeld besser als im peripheren (vgl. Weinstein & Wickens, 1992). Sollen mehrere Größen gleichzeitig getrackt werden (sog. **Multiaxis Tracking**), ist daher die räumliche Trennung dieser Variablen von Bedeutung. Je weiter die Anzeigen voneinander entfernt sind, desto mehr Aufwand muss in Blickbewegungen investiert werden. Um die Separation der Anzeigen zu minimieren, können beide Variable integriert in einem zweidimensionalen Koordinatensystem dargestellt werden.

Sind Informationen entlang zweier Achsen zu verarbeiten, wird die Trackingleistung entlang einer der oder auch beider Achsen beeinträchtigt. Interferenzeffekte entstehen besonders bei Bearbeitung von Aufgaben unterschiedlicher Kontrolldynamik. Die Leistungsdefizite sind geringer, wenn die Kontrolle beider Variabler von gleicher Ordnung ist. Das gilt für Systeme nullter, erster oder zweiter Ordnung (vgl. Chernikoff, Duey & Taylor, 1960).

Für eine zweidimensionale Trackingaufgabe können Anzeige und Kontrolle nach Dimensionen getrennt werden. Dabei sind verschiedene Konstellationen und dadurch verschiedene Stufen der **Integration** möglich, die sich auf die Trackingleistung in absteigender Reihenfolge auswirken:

1. integrierte Anzeigedimensionen, integrierte Kontrolldimensionen
2. integrierte Anzeigedimensionen, getrennte Kontrolldimensionen
3. getrennte Anzeigedimensionen, integrierte Kontrolldimensionen
4. getrennte Anzeigedimensionen, getrennte Kontrolldimensionen

Sowohl für die Anzeige als auch für die Kontrolle von Trackingvariablen hat die Dimensionenverschränkung positive Effekte. Integrierte Anzeigedimensionen profitieren von der kombinierten Darstellung dabei mehr als integrierte Kontrolle (vgl. Fracker & Wickens, 1989). Bei der kompletten Separation der Dimensionen (Fall 4) sind besondere Interferenzen zu erwarten, wenn beide Kontrolldimensionen parallel angeordnet werden (vgl. Kelso, Southard & Goodman, 1979). Der Vorteil der integrierten Darstellung wird begründet mit der Wahrnehmung eines einzigen Objekts statt zweier verschiedener Größen und damit geringeren Bedarfs kognitiver Ressourcen (vgl. Kahneman & Treisman, 1984).

10.4.1.1 Einordnung

Das Tracking-Paradigma steht in engem Zusammenhang mit den allgemeinen Flugaufgaben des Piloten, insbesondere der Flugführung (engl. *aviation*) und der Navigation (vgl. Wickens, 2003b). So wird der in Abschnitt 10.4.1 beschriebene Tracking-Regelkreis von Wickens (2003b) für die Beschreibung von Aviation und Navigation mit Piloten als Operateuren verwendet.

Im klassischen kompensatorischen Fall (vgl. Cohen, Otakeno, Previc & Ercoline, 2001) wird entlang der horizontalen Achse die Abweichung von einer horizontalen Sollposition angezeigt. Diese wird über den Rollwinkel, den Querneigungswinkel, die Richtung und schließlich die Querabweichung des Flugzeugs beeinflusst. Neigungswinkel und dadurch die vertikale Geschwindigkeit beeinflussen die Abweichung von der vertikalen Sollposition (vgl. Wickens, 2003b und für Details Hess, 2003). Diese wird entlang der vertikalen Kontrollachse angezeigt.

Die gewählte Aufgabe entspricht damit realistischen Anforderungen, die an den Piloten bei der Ausführung seiner beiden wichtigsten Aufgaben, der Flugführung und der Navigation, gestellt werden. Aus diesem Grund gilt die Tracking-Aufgabe für Simulationsuntersuchungen im Flugumfeld als realitätsnahe Haupt- oder Zusatzaufgabe (vgl. Wierwille & Connor, 1983).

10.4.2 Readback-Aufgabe

Aufgaben zur Behaltensspanne beim Erinnern von Zahlenreihen, sog. *Digit Span Tasks*, werden in verschiedensten Bereichen zur Untersuchung des Kurzzeitgedäch-

nisses eingesetzt. Eine *Backward Digit Span Task* ist Bestandteil des Wechsler Intelligenztests für Erwachsene (Wechsler, 1939, 2007; Tewes, 1994). Verglichen mit dem einfachen Nachsprechen von Zahlenreihen erfordert das Nachsprechen rückwärts deutlich mehr kognitive Ressourcen, wie Terman bereits 1916 feststellt: »*It is less mechanical and makes much heavier demand on attention*« (S. 232).

Ablauf und Auswertung des Zahlennachsprechens rückwärts unterscheiden sich von Studie zu Studie. Wird die Aufgabe als Maß für eine Gedächtnisleistung verwendet erfolgt der Einsatz prototypisch nach folgendem Schema (nach Süß, Oberauer, Wittmann, Wilhelm & Schulze, 2002): Die Zahlen werden nacheinander für eine Sekunde am Bildschirm präsentiert. Unmittelbar im Anschluss an die Präsentation wiederholen die Teilnehmer die Zahlen in umgekehrter Reihenfolge, indem sie sie über einen Ziffernblock in eine Eingabemaske am Bildschirm tippen. Die Anzahl der Eingabemöglichkeiten entspricht der Anzahl der Ziffern.

Für die genauere Charakterisierung der Readback-Aufgabe ist eine Abgrenzung von Arbeits- und Kurzzeitgedächtnis hilfreich. Nach Hoshi et al. (2000) bietet das eher aktiv ausgerichtete Arbeitsgedächtnismodell nach Baddeley (2000) für viele Untersuchungsergebnisse bessere Erklärungen als das eher passive Konzept des Kurzzeitgedächtnisses. Die Übergänge zwischen beiden Systemen ist nach Klingberg (2008) fließend. Erfolgt eine Einteilung auf konzeptioneller Ebene, »*betrifft das Arbeitsgedächtnis dann solche Kurzzeitgedächtnisaufgaben, die entweder eine gewisse Art von Manipulation verlangen oder eine Form der Ablenkung enthalten bzw. ein gewisses Maß an Multitasking erfordern.*« (Klingberg, 2008, S. 39).

Im Gegensatz zum einfachen Nachsprechen von Zahlen wird beim Nachsprechen rückwärts eine Manipulation der Gedächtnisinhalte verlangt. Die Fähigkeiten, die für das Zahlennachsprechen rückwärts erforderlich sind, werden daher nun dem Konzept des Arbeitsgedächtnisses zugewiesen (Conklin, Curtis, Katsanis & Iacono, 2000; Hoshi et al., 2000).

Es konnten unterschiedliche Aspekte des Arbeitsgedächtnisses identifiziert werden, die für die Aufgabenleistung relevant sind. So sehen Conklin et al. (2000) die Leistung beim Nachsprechen vorwärts als Maß für die allgemeine Aufmerksamkeit und die Leistung beim Nachsprechen rückwärts als Maß für das verbale Arbeitsgedächtnis.

Auch Hoshi et al. (2000) und Oberauer, Süß, Schulze, Wilhelm und Wittmann (2000) ordnen die Leistung schwerpunktmäßig dem verbalen Arbeitsgedächtnis zu, betonen aber zusätzlich den visuell-räumlichen Aspekt dieser Aufgabe.

Conway et al. (2005) und Lehmann (2007) betonen den Aspekten der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses, der über das Nachsprechen rückwärts erhoben und nach Klingberg, Forssberg und Westerberg (2002) sogar trainiert werden kann.

Die Rolle der zentralen Exekutive (vgl. Baddeley, 2007; Abschnitt 5.2.1.2) als Kontroll- und Koordinierungsinstanz des Arbeitsgedächtnisses sehen Davis und Pratt (1995) und Rauschelbach, Widder und Cording (2007) für die Leistung bei dieser Aufgabe verantwortlich.

Larrabee und Kane (1986) fassen die breite Leistungsbasis dieser Aufgaben so zusammen: »*These results demonstrate that [repeating digit spans backwards] involves both verbal and visual cognitive, memory and attentional processes*« (S. 11).

Um die Anforderungen des Zahlennachsprechen rückwärts charakterisieren zu können, sind verschiedene Aspekte dieser Aufgabe wichtig. Der wichtigste Gesichtspunkt, der sich unmittelbar auf die Schwierigkeit der Aufgabe auswirkt, ist die **Länge** der Zahlenfolgen, die zu erinnern und umzudrehen sind. Wie obige Studien zeigen, ist dieser Längeneffekt direkt abhängig von der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses.

Insbesondere wenn die Aufgabe zusammen mit weiteren Aufgaben auszuführen ist, spielt die **Modalität** der Reizdarbietung eine wichtige Rolle: Werden die Ziffern visuell oder akustisch dargeboten? Dabei ist auch das **Präsentationsmedium** zu berücksichtigen.

Die **Antwort** der Versuchsteilnehmer kann verbal oder auch durch manuelles Eintippen erfolgen. In diesem Zusammenhang kann die Kompatibilität von Reizaufnahme und Handlungsausführung einen Einfluss auf die Aufgabenleistung ausüben (vgl. Proctor & Vu, 2006b; Sanders, 1998).

10.4.2.1 Einordnung der Aufgaben in den Flugkontext

Neben der Flugführung und der Navigation stellt die Kommunikation die wichtigste allgemeine Flugaufgabe sowohl in der zivilen als auch in der militärischen Luftfahrt dar. Der Pilot steht in Funkkontakt mit der Flugsicherung (engl. *air traffic control*,

ATC), um Informationen zur geforderten Flugrichtung, -geschwindigkeit oder -höhe zu erhalten. Die Informationen werden vom Piloten wiederholt. Er zeigt damit, dass er die Informationen auf sich bezieht und gibt der sendenden Stelle die Möglichkeit zu prüfen, ob die Informationen korrekt übermittelt und wahrgenommen worden sind. Dieses *Readback* der Informationen ist ein wichtiger Sicherheitsmechanismus in der Kommunikation Pilot–ATC. Die Identifikation des eigenen Callsigns im Funkverkehr sowie die Interpretation der übermittelten Informationen erfordert kognitiven Aufwand.

Fehler bei einer künstlichen Readback-Aufgabe als realitätsnahes Leistungskriterium für die Flugaufgabe Kommunikation verwenden Helleberg und Wickens (2003) und Wickens, Goh, Helleberg, Horrey und Talleur (2003).

Übermittelt ATC die Funkfrequenz des nächsten Funkfeuers, besteht die Readback-Aufgabe aus der Wiederholung der Frequenz, häufig einer vier- bis fünfstelligen Zahl. Die für die aktuelle Untersuchung eingesetzte Readback-Aufgabe »Zahlennachsprechen rückwärts« nimmt den Aspekt der Wiederholung von Information auf. Die kognitive Beanspruchung des realen Vorbilds wird durch die erforderliche Manipulation der Gedächtnisinhalte erzeugt.

11 Versuchsplanung

11.1 Untersuchungsdesign

Im Zentrum der Untersuchung stand der Leistungsvergleich von Trackball und Touchscreen als Eingabemedien für ein Großflächendisplay in einem hochagilen Flugzeug. Kontexteinflüsse wurden über experimentelle Manipulation von Zusatzbelastung abgebildet.

Dazu wurden die beiden Zeigaufgaben kombiniert mit einer von vier Zusatzaufgaben und je einmal ohne Zusatzaufgabe bearbeitet. Die Zusatzaufgaben wurden in zwei Schwierigkeitsstufen durchgeführt. Jede der Mehrfachaufgabenkonstellationen wurde unter drei Priorisierungsstufen bearbeitet: Schwerpunkt der Aufmerksamkeit auf die Zeigaufgabe oder auf die Zusatzaufgabe oder auf beide in gleichem Maß.

Jeder Versuchsteilnehmer bearbeitete alle experimentellen Bedingungen. Es wurde also ein Versuchsdesign mit Messwiederholung auf allen Faktoren eingesetzt.

Für die Untersuchung der Leistung in den Hauptaufgaben erweiterte die Kontextmanipulation die experimentelle Struktur zu folgendem Design: 2 Eingabegerät(e) \times 4 Zusatzaufgabe(n) \times 2 Schwierigkeit(ssstufen) \times 3 Priorisierung(en). Als abhängige Variable werden die jeweiligen Leistungsmaße der Zeige- und Zusatzaufgaben sowie Maße der Workload herangezogen. Deren Operationalisierung wird im Folgenden beschrieben.

11.2 Leistungs- und Workloadkriterien

Im Rahmen der Ausführungen zum speziellen Evaluationskonzept wurden grundlegende Aspekte der Aufgaben bereits erläutert (vgl. Abschnitt 8). Der Vergleich von

11 Versuchsplanung

Trackball und Touchscreen bei der Bearbeitung schneller Zeige- und Auswahlaufgaben stand im Fokus der Untersuchung. Über Zusatzaufgaben werden Kontextbedingungen systematisch variiert. Die folgenden Abschnitte erläutern die technische Umsetzung der Aufgaben.

11.2.1 Zeigeaufgaben

Es wurden Leistungsparameter in zwei verschiedenen Zeigeaufgaben erhoben, die unterschiedliche Anforderungen an die Bedienung stellen. Sie decken so eine große Bandbreite an standardisierten und repräsentativen Eingaben ab. Gemein ist beiden Aufgabentypen die geometrische Gestaltung der Zielschaltflächen.

11.2.1.1 Einfachziele

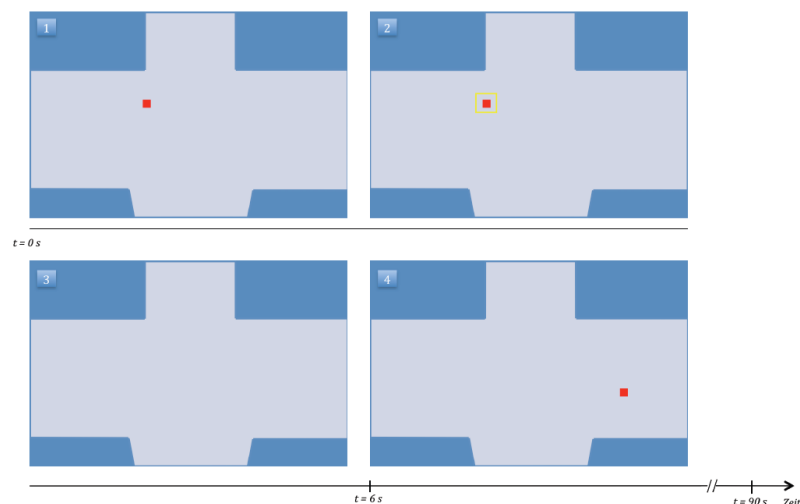


Abbildung 11.1: Ablauf der Zeigeaufgabe *Einfachziele* nach Kellerer (2010)

Auf zufälligen Positionen am Display werden einzelne Ziele angezeigt, die vom Versuchsteilnehmer auszuwählen sind. Die Eingabeflächen sind quadratisch mit 17 mm Kantenlänge. Auch die sichtbare Fläche ist quadratisch. Ihre Kantenlänge beträgt 7 mm. Die Geometrie der Ziele orientiert sich an Ergebnissen von Eichinger et al. (2008) und entspricht der Gestaltung von Schaltflächen des Bedienkonzepts für das Großflächendisplay.

11 Versuchsplanung

Die Versuchsteilnehmer werden instruiert, die Ziele möglichst schnell und genau auszuwählen. Nach 6 s wird ein neues Ziel dargestellt. Erfolgt innerhalb dieses Zeitraums keine Zielerwahl, wird das alte Ziel ausgeblendet und das neue dargestellt. Die aktuelle Position wird dem Probanden über ein weißes Kreuz als Cursor zurückgemeldet. Befindet sich der Cursor über einem Ziel, wird dieses mit gelber Umrandung dargestellt. Nach erfolgreicher Auswahl wird das Ziel entfernt. Erfolgreiche und fehlerhafte Eingaben werden aufgezeichnet. Ein Versuchsdurchgang dauert 90 s. Abbildung 11.1 zeigt einen beispielhaften Ablauf mit erfolgreicher Auswahl in Bildausschnitt 2.

11.2.1.2 Dynamische Mehrfachziele

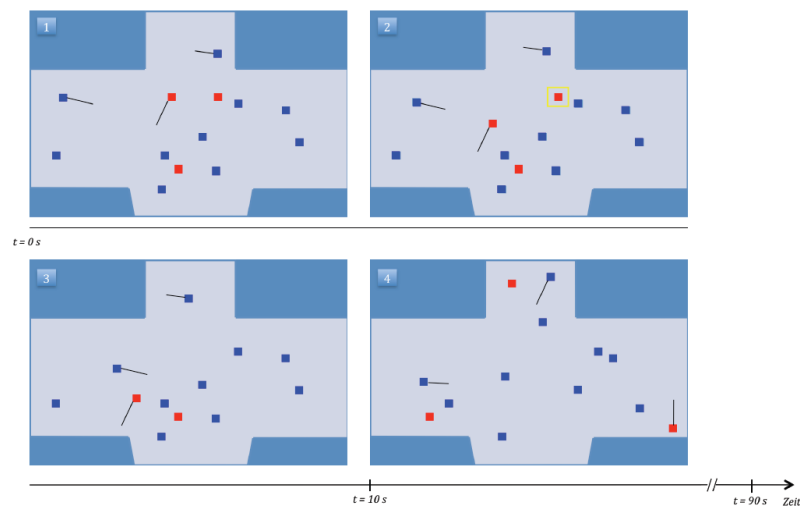


Abbildung 11.2: Ablauf der Zeigaufgabe *dynamische Mehrfachziele* nach Kellerer (2010)

Auch hier erfolgt die Positionierung der Ziele am Display zufällig. Es sollen drei Zielflächen angewählt werden. Gleichzeitig werden zehn Distraktorflächen angezeigt. Die Zielflächen sind farblich hervorgehoben. Eines der Ziele und zwei der Distraktoren bewegen sich auf einer geraden Trajektorie. Die Geschwindigkeit orientiert sich dabei an der realistischen Darstellung von fliegenden Zielen bei niedrigem Maßstab. Wie bei den Einfachzielen sind die Eingabeflächen quadratisch mit 17 mm Kantenlänge. Auch die sichtbare Fläche ist quadratisch mit Kantenlänge 7 mm.

Die Versuchsteilnehmer werden instruiert, die Ziele möglichst schnell und genau auszuwählen. Nach 10 s wird ein neues Ziel dargestellt. Erfolgt innerhalb dieses Zeitraums

11 Versuchsplanung

keine Zielanwahl, wird das alte Ziel ausgeblendet und das neue dargestellt. Die aktuelle Position wird dem Probanden über ein weißes Kreuz als Cursor zurückgemeldet. Befindet sich der Cursor über einem Ziel, wird dieses mit gelber Umrandung dargestellt. Nach erfolgreicher Anwahl wird das Ziel entfernt. Auch Eingaben, die kein oder das falsche Ziel auswählen, werden aufgezeichnet. Ein Versuchsdurchgang dauert 90 s. Abbildung 11.1 zeigt einen beispielhaften Ablauf mit Anwahl eines Ziels in Bildausschnitt 2.

11.2.1.3 Instrumente und Messmethoden



Abbildung 11.3: Aufbau des Mock-Ups, in dem die Versuche durchgeführt wurden nach Kellerer (2010)

Alle Versuche wurden in einem Cockpit-Mock-Up durchgeführt, das in relevanten Parametern der Geometrie im Cockpit entspricht. Die Sitzposition des Piloten im Eurofighter konnte durch den Einsatz eines elektrisch verstellbaren Schleudersitzes und von Fußauflagen nachgestellt werden, die der Pedalerie im Cockpit entsprach. Durch die Einstellmöglichkeiten des Sitzes wurde der Augpunkt über alle Probanden konstant gehalten.

Das Großflächendisplay wurde den geometrischen Anforderungen entsprechend im Bereich des Head-Down-Displays angebracht (vgl. Spinoni, Wadlow, Luceron & Hahn,

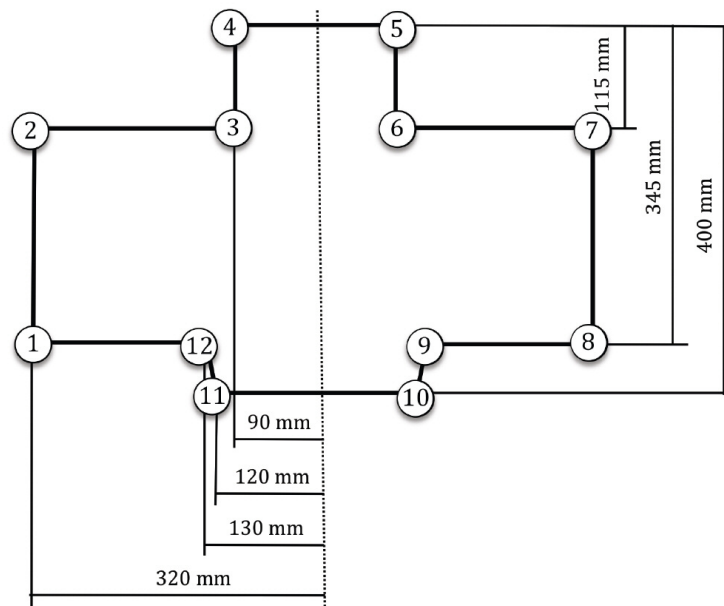


Abbildung 11.4: Maße des Großflächendisplays nach Kellerer (2010)

1986; für Details zur geometrischen Spezifikation des Aufbaus vgl. Abbildung 11.4 und Kellerer, 2010).

Beide Zeigeaufgaben wurden am Großflächendisplay bearbeitet. Als Display wurde ein 30" LC-Monitor mit einer Auflösung von 2560 mal 1600 Pixel und einem Seitenverhältnis von 16:10 verwendet. Die Touch-Funktionalität wurde über einen speziell für den Monitor angepassten Infrarot-Rahmen aus der Baureihe SlimLine der Firma IRTOUCH realisiert. Das dadurch erzeugte und berührungssensitive Gitter aus Infrarotstrahlen befand sich 2 mm bis 4 mm vor der Displayoberfläche. In der einen Bearbeitungsvariante wurde als Eingabemedium der Touchscreen, in der anderen Variante ein Trackball von Logitech der Baureihe Trackman[®] Marble[®] verwendet. Der Trackball wurde an der Position des Schubhebels auf der linken Seite der Teilnehmer positioniert. Da die rechte Hand im realen Cockpit den Steuerknüppel bedient, erfolgte für beide Medien die Bedienung mit der linken Hand.

Zur Darstellung der Zeigeaufgaben sowie zur Aufzeichnung der Benutzeraktionen kam die Software *Pandis Interact* in den Versionen 1.1 für Einfach- und 2.1 für Mehrfachziele zum Einsatz (vgl. Kellerer, 2010), die speziell für diese Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule St. Pölten entwickelt wurde. Durch die ebenfalls proprietäre Software *Pandis Multitouch* konnten Fingerpositionen ausgewertet

11 Versuchsplanung

und in Eingabeereignisse übersetzt werden. Dazu wurde die Letzt-Kontakt-Methode umgesetzt, bei der erst ein Entfernen des Fingers von der Touch-Oberfläche die Eingabehandlung auslöst. Die Software lief auf einem handelsüblichen PC mit vier Prozessoren.

11.2.1.4 Kriterien der Aufgabenleistung

Zur Erfassung der Bedienleistung wurden klassische Usability-Kriterien herangezogen. Effizienz wurde durch die Bedienzeit, Effektivität wurde durch die Fehlerrate abgebildet. Als Bedienzeit wurde die Zeit zwischen Erscheinen und richtiger Anwahl des bzw. der Ziele interpretiert. Als Fehlerrate galt die Anzahl der Eingaben ohne Zielauswahl.

11.2.2 Visuelle Zusatzaufgabe

Zur Manipulation der visuellen Belastung wurde eine visuelle Suchaufgabe bearbeitet, die in der Schwierigkeit variiert wurde (zum Hintergrund der Aufgabe vgl. Abschnitt 10.1).

11.2.2.1 Instrumente und Messmethoden

Die visuelle Suchaufgabe wurde im Head-Up-Bereich des Cockpit-Aufbaus dargestellt (vgl. Abb. 11.3). Dazu wurde ein 17" LC-Monitor mit einer Auflösung von 1024 mal 768 Pixel verwendet. Die visuelle Zusatzaufgabe wurde mit Hilfe der Software *Visual Task Version 2.1* der DaimlerChrysler AG aus dem Jahr 2004 angeboten, die auch die Benutzeraktionen in Log-Dateien sicherte. Die Software lief auf einem handelsüblichen Netbook.

11.2.2.2 Ablauf

Es wurden den Probanden 51 weiße Kreise auf schwarzem Hintergrund präsentiert. Die Anordnung der Kreise war zufällig. Einer der Kreise war etwas größer als die anderen Distraktorkreise. In der leichten Bedingung betrug der Durchmesser von Distraktoren und Zielkreis je 10 und 12.3 mm; in der schwierigen Bedingung je 11.2 und 12.3 mm. Diese Werte wurden in Vorversuchen ermittelt. In allen anderen Attributen stimmten Zielkreis und Distraktoren überein.

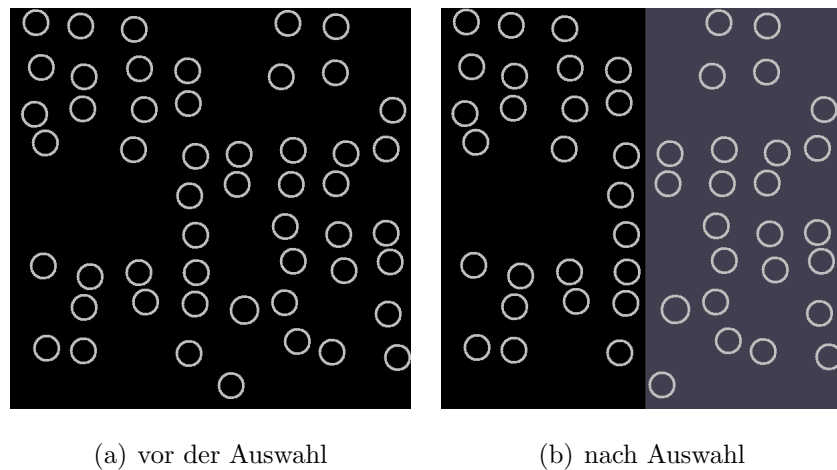


Abbildung 11.5: Schwere visuelle Zusatzaufgabe; *Hinweis: Der Zielkreis befindet sich in der ersten »Spalte« der ausgewählten Hälfte als zweiter Kreis von unten.*

Die Auswahl der linken oder rechten Bildschirmhälfte erfolgte durch Drücken der entsprechenden Cursortasten \leftarrow oder \rightarrow mit der rechten Hand. Die Tasten wurden so platziert, dass sie durch Bewegung der entsprechenden Finger betätigt werden konnten. Abbildung 11.5 zeigt für die schwere Bedingung die Situation vor und nach der Auswahl.

Nach Auswahl einer Bildschirmhälfte konnte der Proband seine Auswahl innerhalb von zwei Sekunden beliebig oft ändern. Nach Ablauf von zwei Sekunden ohne Änderung erschien eine neue Konfiguration von Kreisen. Nach Ablauf der 90 Sekunden, die durch die Zeigeaufgabe vorgegeben waren, wurde die Aufgabe beendet.

11.2.2.3 Kriterien der Aufgabenleistung

Das Leistungskriterium dieser Aufgabe war die Dauer bis zur korrekten Auswahl der Bildschirmhälfte. Als Dauer wurde die Zeit von der ersten Präsentation einer Kreiskonfiguration bis zur finalen Auswahl einer Bildschirmhälfte interpretiert. Das Leistungsmaß für eine Bearbeitung von 90 Sekunden war das arithmetische Mittel der einzelnen Konfigurationen. Zur Kontrolle wurde auch die Anzahl der Fehler erhoben; aufgrund der konstant geringen Fehlerzahl über alle Bedingungen wurden diese nicht weiter berücksichtigt.

Zeiten		
T0 (in s):	<input type="text" value="1"/>	(Zeit von Versuchsbeginn bis 1. Sequenz)
T1 (in s):	<input type="text" value="3"/>	(Zeit für kognitive Verarbeitung)
T2 (in s):	<input type="text" value="5"/>	(Zeit für VP zum Antworten)
T3 (in s):	<input type="text" value="3"/>	(Pause bis zum Abspielen nächster Sequenz)
Tds (in 1/10 s):	<input type="text" value="10"/>	(Abspieldauer einer Ziffer einer Sequenz)

Abbildung 11.6: Werte der Zeitparameter der kognitiven Zusatzaufgabe

11.2.3 Kognitive Zusatzaufgabe

Zur Manipulation der kognitiven Belastung wurde das Paradigma der Suche im Kurz- oder Arbeitsgedächtnis eingesetzt, die in der Schwierigkeit variiert wurde (zum Hintergrund der Aufgabe vgl. Abschnitt 10.2).

11.2.3.1 Instrumente und Messmethoden

Die visuelle Zusatzaufgabe wurde mit Hilfe der Software *Cognitive Tasks Version 1.1* dargeboten, die von der DaimlerChrysler AG 2004 entwickelt und 2008 für die vorliegende Untersuchung leicht modifiziert wurde. Die Benutzeraktionen wurden in Log-Dateien gesichert. Die Software lief auf einem handelsüblichen Notebook.

Die Einstellungen der einzelnen Zeitintervalle sind in Abbildung 11.6 dargestellt. Diese Werte sind für die leichte und die schwere Bedingung identisch.

11.2.3.2 Ablauf

Den Probanden wurde eine Menge von Zahlen zwischen null und zehn sequentiell akustisch dargeboten, mit der Instruktion, sich die Zahlen zu merken. Für eine weitere akustisch dargebotene Zahl war möglichst schnell und richtig zu entscheiden und mit der Aussage »ja« oder »nein« zu signalisieren, ob die Vergleichszahl ein Element der gemerkten Menge war. Die Vergleichsziffer wurde nach Zufall so ausgewählt, dass sie in je der Hälfte der Fälle Element bzw. nicht Element der Liste war. Die Urteile der Probanden wurden durch den Versuchsleiter über die Tastatur erfasst. Nach Ablauf

11 Versuchsplanung

der 90 Sekunden, die durch die Zeigeaufgabe vorgegeben waren, wurde die Aufgabe beendet. In der leichten Bedingung bestand die zu erinnernde Liste aus fünf, in der schweren aus acht Ziffern. Abbildung 11.7 stellt den Ablauf der Aufgabe für die leichte Bedingung dar.

11.2.3.3 Kriterien der Aufgabenleistung

Das Leistungskriterium dieser Aufgabe war die Dauer bis zur korrekten Beurteilung, ob die Vergleichsziffer der Liste entstammte oder nicht. Als Dauer wurde die Zeit von der Präsentation der Vergleichsziffer bis zur Eingabe des Urteils über die Tastatur interpretiert. Das Leistungsmaß für eine Bearbeitung von 90 Sekunden war das arithmetische Mittel über alle bearbeiteten Einzelaufgaben. Zur Kontrolle wurde auch die Anzahl Fehler erhoben; aufgrund der konstant geringen Fehlerzahl über alle Bedingungen wurden diese nicht weiter berücksichtigt.

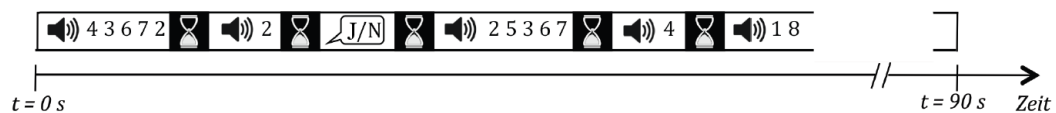


Abbildung 11.7: Ablauf der kognitiven Zusatzaufgabe in der leichten Bedingung nach Kellerer (2010)

11.2.4 Motorische Zusatzaufgabe

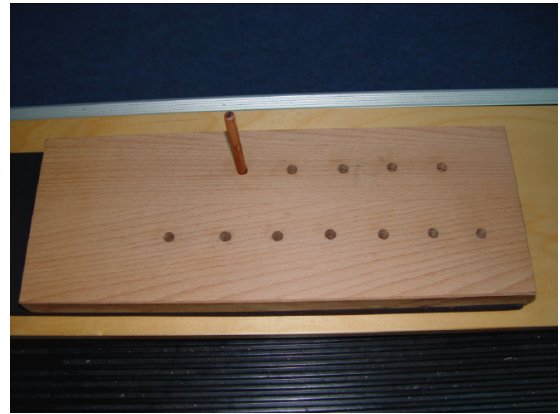
Zur Manipulation der motorischen Belastung wurde eine manuelle Steckaufgabe eingesetzt, die in der Schwierigkeit variiert wurde (zum Hintergrund der Aufgabe vgl. Kuhn, 2005 und Abschnitt 10.3).

11.2.4.1 Instrumente und Messmethoden

Um die einzelnen Steckereignisse nicht manuell erfassen und codieren zu müssen, wurden die Schablonen über einer flachen, flexiblen Tastatur angebracht, so dass jede Bohrung über einer Taste lag. Die Steckmuster wurden als Texteingaben in ASCII-Dateien gesichert und konnten so maschinell ausgewertet werden.



(a) leichte Bedingung



(b) schwere Bedingung

Abbildung 11.8: Die motorische Zusatzbelastung wurde über eine manuelle Steckaufgabe realisiert.

Es wurden je zwei verschiedene Schablonen und Griffel verwendet, um unterschiedlich schwere Bedingungen zu erzeugen. In der leichteren Bedingung betrug der Lochdurchmesser 25 mm; der Durchmesser des Griffels betrug 23 mm, sein Radius an der Kante 7 mm. In der schweren Bedingung war der Durchmesser der Bohrung 8 mm; der Griffeldurchmesser betrug 7 mm, sein Radius 0.5 mm.

Abbildung 11.8 zeigt die beiden Varianten der motorischen Zusatzaufgabe.

11.2.4.2 Ablauf

Die Versuchsteilnehmer mussten einen Holzgriffel im Uhrzeigersinn mit festgelegter Startposition in annähernd rechteckig angeordnete Zielvertiefungen einer Lochschablone stecken. Die Probanden bearbeiteten diese Aufgabe ohne visuelle Rückmeldung, also ohne auf die Schablone zu blicken. Die Instruktion an die Probanden lautete, die Aufgabe möglichst schnell und genau durchzuführen.

11.2.4.3 Kriterien der Aufgabenleistung

Das Leistungskriterium dieser Aufgabe war die Geschwindigkeit der Bearbeitung. Diese wurde umgesetzt als Anzahl korrekter Eingaben pro Versuchsdurchgang von 90 Sekunden. Zur Kontrolle wurde auch die Anzahl Fehler erhoben; aufgrund der konstant geringen Fehlerzahl über alle Bedingungen wurden diese nicht ausgewertet.

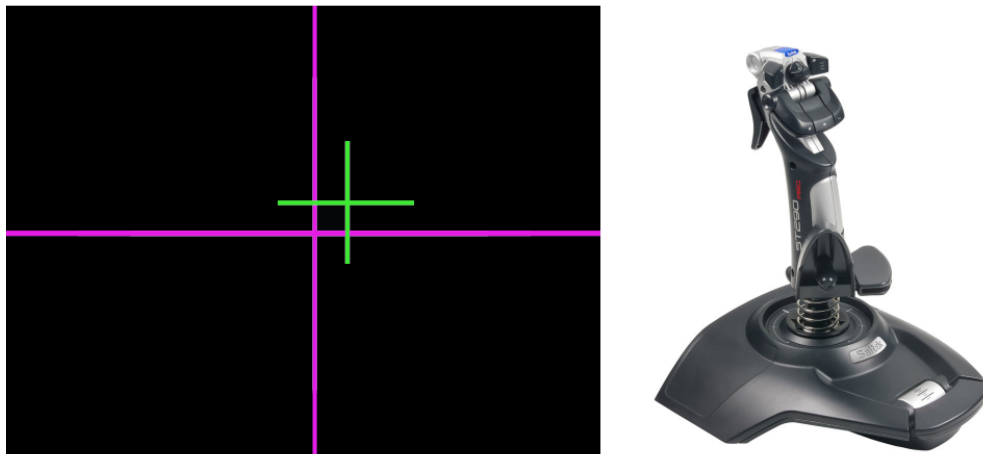


Abbildung 11.9: Die kompensatorische Trackingaufgabe wurde mit einem Joystick bearbeitet.

11.2.5 Realitätsnahe komplexe Zusatzaufgabe

Die komplexe Zusatzaufgabe sollte das gesamte Spektrum der Belastung im Cockpit abbilden, wie es in der informatorischen Beanspruchungsanalyse ermittelt wurde (vgl. Abschnitt 9). Dazu wurden zwei kompatible Einzelaufgaben kombiniert: eine Trackingaufgabe für visuelle und motorische mit einer invertierten Readbackaufgabe für auditive, kognitive und verbale Beanspruchung (zum Hintergrund der beiden Aufgaben vgl. Abschnitt 10.4).

11.2.5.1 Instrumente und Messmethoden

Die Trackingaufgabe wurde im Head-Up-Bereich des Cockpit-Aufbaus dargestellt (vgl. Abb. 11.3). Dazu wurde ein 17" LC-Monitor mit einer Auflösung von 1024 mal 768 Pixel verwendet. Die Ablenkfunktion des Cursors wurde realisiert durch die Kombination von fünf Sinus- und Cosinus-Funktionen, deren Argumente vor Beginn jedes Durchgangs zufällig bestimmt wurden. Die aktuelle Position des Cursors wurde zehnmal pro Sekunde relativ zur Sollposition bestimmt und mitgeloggt.

Die Software wurde proprietär realisiert durch eine Kombination von PHP5 und Javascript. Die Daten wurden in einer MySQL-Datenbank gespeichert. Abbildung 11.9 zeigt Anzeige und Eingabegerät der Trackingaufgabe.

Zeiten		
T0 (in s):	<input type="text" value="1"/>	(Zeit von Versuchsbeginn bis 1. Sequenz)
T1 (in s):	<input type="text" value="0"/>	(Zeit für kognitive Verarbeitung)
T2 (in s):	<input type="text" value="8"/>	(Zeit für VP zum Antworten)
T3 (in s):	<input type="text" value="2"/>	(Pause bis zum Abspielen nächster Sequenz)
Tds (in 1/10 s):	<input type="text" value="10"/>	(Abspieldauer einer Ziffer einer Sequenz)

Abbildung 11.10: Werte der Zeitparameter der Readbackaufgabe

Die Readbackaufgabe wurde mit Hilfe der Software *Cognitive Tasks Version 1.1* angeboten, die von der DaimlerChrysler AG 2004 entwickelt und 2008 für die vorliegende Untersuchung leicht modifiziert wurde. Die Benutzeraktionen wurden in Log-Dateien gesichert. Die Software lief auf einem handelsüblichen Notebook.

Die Einstellungen der einzelnen Zeitintervalle für die Readbackaufgabe sind in Abbildung 11.10 dargestellt. Diese Werte waren für die leichte und die schwere Bedingung identisch.

11.2.5.2 Ablauf

Beide Teilaufgaben wurden gleichzeitig gestartet. Mit der rechten Hand bediente der Versuchsteilnehmer den Joystick, um die Trackingaufgabe zu bearbeiten. Dazu musste der Joystick entgegen der Auslenkung des Cursors bewegt werden, um diese zu kompensieren und das Fadenkreuz möglichst nahe der Sollposition in der Bildschirmmitte zu bringen. Im Vergleich zur leichten Trackingaufgabe wurde die Auslenkung in der schweren Bedingung um konstant 40 % erhöht.

Parallel dazu wurden den Probanden Sequenzen von Zufallszahlen zwischen eins und zehn akustisch dargeboten, die verbal in umgekehrter Reihenfolge zu wiederholen waren. Die Urteile der Probanden wurden durch den Versuchsleiter über die Tastatur erfasst. Die Versuchsteilnehmer wurden instruiert, die umgekehrte Sequenz möglichst vollständig und richtig wiederzugeben. Nach Ablauf der 90 Sekunden, die durch die Zeigeaufgabe vorgegeben waren, wurde die Aufgabe beendet. In der leichten Bedingung bestand die zu wiederholende Liste aus vier, in der schweren aus sechs Ziffern.

11 Versuchsplanung

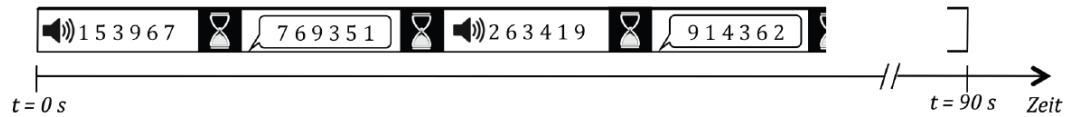


Abbildung 11.11: Ablauf der invertierten Readbackaufgabe in der leichten Bedingung nach Kellerer (2010)

Abbildung 11.11 stellt den Ablauf der Aufgabe für die leichte Bedingung dar. Die Teilnehmer wurden angehalten, beide Aufgabenteile gleich zu gewichten.

11.2.5.3 Kriterien der Aufgabenleistung

Das Leistungskriterium der Readbackaufgabe wurde in Vorversuchen und aufgrund theoretischer Vorüberlegungen folgendermaßen festgelegt:

$$E = \frac{Z + O}{n + \frac{1}{2}n(n-1)},$$

wobei

E : Erfüllungsgrad der Aufgabe E ,

Z : Anzahl korrekt wiederholter Ziffern,

O : Anzahl korrekter ordinaler Einzelvergleiche innerhalb der wiedergegeben Liste und n : Anzahl der Ziffern.

Der Erfüllungsgrad der Aufgabe ist damit auf 100 % normiert. Das Leistungsmaß für eine Bearbeitung von 90 Sekunden war das arithmetische Mittel der Erfüllungsgrade über alle bearbeiteten Einzelaufgaben.

Trackingaufgabe werden im Allgemeinen so gestaltet, dass sie nicht perfekt bearbeitet werden können. Der Cursor weist so zu den meisten Zeitpunkten der Aufzeichnung einen absoluten, euklidischen Abstand von der Sollposition auf. Werden diese Abstände quadriert, über die Zeitpunkte der Erhebung summiert und an deren Anzahl relativiert, erhält man den mittleren quadrierten Fehler (oder *Mean Square Error*, MSE). Die Wurzel aus dieser Größe ist der *Root Mean Square Error* (kurz RMSE), der als Maß der Abweichung beobachteter Daten von einer Modellvorhersage interpretiert wird und für Trackingaufgaben ein Standardmaß der Leistung darstellt. Für den Fall zweier zweidimensionaler Parametervektoren θ_1 und θ_2 , von denen der eine

11 Versuchsplanung

die zweidimensionale Soll- und der andere die zweidimensionale Ist-Position darstellt, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\text{RMSE}(\theta_1, \theta_2) = \sqrt{\text{MSE}(\theta_1, \theta_2)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^2 (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{2}}.$$

Der RMSE kann in etwa als mittlere Abweichung der Ist- von der Soll-Position in Pixel bzw. Millimeter interpretiert werden, wobei durch die Quadrierung größere Abstände besonders betont werden.

11.2.6 Workload

Den Ausführungen in Abschnitt 7 entsprechend wurde Workload als mehrdimensionales Konstrukt interpretiert und sollte daher über ein Messinstrument erfasst werden, das diese Mehrdimensionalität abbildet und insbesondere den Aspekt der von außen wirkenden Einflüsse, auf die durch Beanspruchung reagiert wird, aufgreift. Der NASA Task Load Index (kurz NASA TLX) entspricht diesen Anforderungen (vgl. Hart & Staveland, 1988; Hart, 2006). Der Fragebogen besteht aus drei Subskalen mit anforderungsbezogener Ausrichtung: geistige, körperliche, zeitliche Anforderungen und drei mit verhaltens- bzw. interaktionsbezogener Ausrichtung: Ausführung, Anstrengung, Frustration. Für die vorliegende Studie wurde eine ins Deutsch übersetzte Version des NASA TLX verwendet (vgl. Seifert, 2002).

Die einzelnen Subskalen haben 21 Abstufungen und können so als ganze Zahlen von 0 bis 20 oder als Intervall von 0 bis 10 mit Abstufungen von 0.5 interpretiert werden. In der Originalversion umfasst die Anwendung des TLX eine Paarvergleichsprozedur zur Gewichtung der einzelnen Skalen. Byers, Bittner und Hill (1989) dokumentieren eine sehr hohe Korrelation zwischen TLX-Werten mit und ohne Gewichtung sowie vergleichbare Mittelwerte und Standardabweichungen. Für eine vereinfachte Anwendung empfehlen sie, die Gewichtung wegzulassen. Ergebnisse von Fairclough (1991) unterstützen diese Empfehlung. Für den Einsatz in der vorliegenden Untersuchung wurde daher auf die Gewichtung verzichtet. Die aggregierten Werte der Subskalen wurden auf den Bereich von 0 bis 10 normiert.

Zusätzlich zum NASA TLX wurde der in Abschnitt 9 vorgestellte Fragebogen zur informatorischen Beanspruchungsanalyse eingesetzt; diesmal mit dem Ziel, die informatorische Beanspruchung spezifisch für jede experimentelle Bedingung zu ermitteln.

11.3 Fragestellungen

Auch wenn für die vorliegende Untersuchung Hypothesen im engeren Sinn des experimentellen Paradigmas nur eingeschränkt aufgestellt werden können, da der Schwerpunkt der Arbeit auf der Gestaltung und Realisierung eines Evaluationskonzeptes liegt, lassen sich trotzdem Fragen formulieren, die im Zuge der Untersuchung zu beantworten sind.

Wie in Abschnitt 8 beschrieben, werden Untersuchungen über die Zusatzaufgaben hinweg sowie aus Perspektive jeder einzelnen Zusatzaufgabe durchgeführt. Es sollen damit auf Ebene der Hauptaufgabe folgende Fragen beantwortet werden:

1. a) Besteht über die Zusatzaufgaben und Schwierigkeitsstufen hinweg ein Leistungsunterschied zwischen der Verwendung von Touchscreen und Trackball bei den **Zeigeaufgaben**?
- b) Besteht über die Zusatzaufgaben und Schwierigkeitsstufen hinweg ein **Workload**unterschied zwischen der Verwendung von Touchscreen und Trackball?
2. a) Übt die Manipulation der Aufgabenschwierigkeit über die Zusatzaufgaben und Eingabegeräte hinweg einen Einfluss auf die **Zeigeleistung** aus?
- b) Übt die Manipulation der Aufgabenschwierigkeit über die Zusatzaufgaben und Eingabegeräte hinweg einen Einfluss auf die **Workload** aus?
3. a) Wirken sich die verschiedenen Zusatzaufgaben über die Bediengeräte und Schwierigkeitsstufen hinweg unterschiedlich auf die **Zeigeleistung** aus?
- b) Wirken sich die verschiedenen Zusatzaufgaben über die Bediengeräte und Schwierigkeitsstufen hinweg unterschiedlich auf die **Workload** aus?
4. a) Wirken sich die verschiedenen Zusatzaufgaben über die Schwierigkeitsstufen hinweg in Abhängigkeit vom verwendeten Bediengerät differenziert auf die **Zeigeleistung** aus?
- b) Wirken sich die verschiedenen Zusatzaufgaben über die Schwierigkeitsstufen hinweg in Abhängigkeit vom verwendeten Bediengerät differenziert auf die **Workload** aus?

Auf Ebene der einzelnen Zusatzaufgabe sollen folgende Fragen beantwortet werden:

11 Versuchsplanung

5.
 - a) Besteht über die Schwierigkeits- und Priorisierungsstufen hinweg ein Leistungsunterschied bei den **Zeigeaufgaben** zwischen der Verwendung von Touchscreen und Trackball?
 - b) Besteht über die Schwierigkeits- und Priorisierungsstufen hinweg ein Leistungsunterschied bei den **Zusatzaufgaben** zwischen der Verwendung von Touchscreen und Trackball?
 - c) Besteht über die Schwierigkeits- und Priorisierungsstufen hinweg ein **Workload**unterschied zwischen der Verwendung von Touchscreen und Trackball?
6.
 - a) Übt die Manipulation der Aufgabenschwierigkeit über die Eingabegeräte und Priorisierungsstufen hinweg einen Einfluss auf die **Zeigeleistung** aus?
 - b) Übt die Manipulation der Aufgabenschwierigkeit über die Eingabegeräte und Priorisierungsstufen hinweg einen Einfluss auf die Leistung in der **Zusatzaufgabe** aus?
 - c) Übt die Manipulation der Aufgabenschwierigkeit über die Eingabegeräte und Priorisierungsstufen hinweg einen Einfluss auf die **Workload** aus?
7.
 - a) Wirken sich die Priorisierungsstufen über die Eingabegeräte und Schwierigkeitsstufen hinweg unterschiedlich auf die **Zeigeleistung** aus?
 - b) Wirken sich die Priorisierungsstufen über die Eingabegeräte und Schwierigkeitsstufen hinweg unterschiedlich auf die Leistung in der **Zusatzaufgabe** aus?
 - c) Wirken sich die Priorisierungsstufen über die Eingabegeräte und Schwierigkeitsstufen hinweg unterschiedlich auf die **Workload** aus?

Zusammenfassend für mögliche Interaktionen:

8. Bestehen differenzierte Abhängigkeiten zwischen den untersuchten Faktoren hinsichtlich der Leistung in Zeige- oder Zusatzaufgabe und Workload?

11.4 Stichprobenkonstruktion und -beschreibung

Als Voraussetzung für die Teilnahme an der geplanten Untersuchung sollten potenzielle Teilnehmer ein Auswahlverfahren für Piloten erfolgreich durchlaufen haben. So konnte gewährleistet werden, dass die untersuchte Stichprobe hinsichtlich grundlegender Informationsverarbeitungsleistung einheitlich hohen Standards entspricht und re-

11 Versuchsplanung

präsentativ für die Zielpopulation ist. Um diese Zielpopulation auch bezüglich der operativen Erfahrung im Cockpit möglichst gut abzubilden, sollten Piloten aller Alters- und Erfahrungsstufen an der Studie teilnehmen.

Der zentrale Vergleich der Studie erfolgte zwischen Trackball und Touchscreen. Da hinsichtlich der Leistungsparameter deutliche Unterschiede zwischen beiden Bedienelementen erwartet wurden (vgl. Schedlbauer et al., 2006) und ein Messwiederholungsdesign eingesetzt wurde, konnte die Anzahl der erforderlichen Teilnehmer auf minimal zehn, besser elf Probanden festgelegt werden (vgl. Bortz & Döring, 2006), um die erwarteten starken Effekte auf einem Signifikanzniveau von 5 % mit einer Teststärke von 80 % statistisch nachweisen zu können.

An den Untersuchungen nahmen neun Mitarbeiter der EADS Military Air Systems in Manching, acht davon Testpiloten sowie zwei Piloten der Wehrtechnischen Dienststelle 61 der Bundeswehr in Manching, somit also elf Personen im Alter von 28 bis 53 Jahren teil. Alle Teilnehmer waren männlich. Einer der Probanden war Linkshänder. Die Sehfähigkeit jedes Probanden war normal oder korrigiert. Die Flugerfahrung der Teilnehmer betrug im Mittel etwa 3.100 Stunden.

11.5 Untersuchungsdurchführung

Die Versuche wurden 2009 im Zeitraum von vier Monaten in Laborräumen der Abteilung Human Factors Engineering der EADS Military Air Systems in Manching durchgeführt. Für jeden Teilnehmer wurden die Versuche an zwei Terminen durchgeführt, die individuell vereinbart wurden. Jeder einzelne Durchgang dauerte etwa 4,5 bis 5,5 Stunden. Um die Motivation und Leistungsfähigkeit der Probanden aufrecht zu erhalten, wurden während jedes Termins zwei Pausen eingelegt, bei denen auch der Flüssigkeits-, Koffein- und Zuckerhaushalt von Teilnehmern und Versuchsleitern ausgeglichen werden konnte.

Es ist in diesem Zusammenhang das besondere Engagement der Versuchsteilnehmer herauszustellen, die trotz der fordernden Versuche und insbesondere der langen Dauer der Experimente mit großem Einsatz an der Evaluation teilnahmen. So wurde auch von keinem Teilnehmer der Versuch abgebrochen oder der zweite Versuchstermin nicht wahrgenommen.

11.6 Ablauf

Es galt bei der Planung des Versuchsablaufs, die zu variierenden Faktoren so zu kombinieren, dass Erfahrungs- und Ermüdungseffekte die Datenerhebung nicht systematisch verzerrten. Dazu wurden mit großem technischen Aufwand die Versuchsaufbauten so gestaltet, dass für jeden einzelnen Versuchsdurchgang die Faktoren Eingabegerät, Nebenaufgabe, Schwierigkeit und Priorisierung manipuliert werden konnten. Dadurch war es möglich die Kombinationen dieser Faktoren komplett zufällig zu gestalten. Aus technischen Gründen war es nicht möglich, im gleichen Zug die Bearbeitung der Zeigeaufgaben zu randomisieren. Um Lerneffekte zu minimieren, bearbeitete eine Hälfte der Probanden zuerst die Einfachziele, während die andere Hälfte mit der Bearbeitung der dynamischen Mehrfachziele begann.

Ein Versuchstermin folgte diesem Ablaufschema:

1. Begrüßung
2. Beschreibung von Hintergrund, Aufgaben und Versuchsablauf
3. Trainingsphase
4. Bearbeitung von ca. 20 Durchgängen; jeweils anschließend Ausfüllen des Workload-Fragebogens
5. Pause
6. Bearbeitung von ca. 20 Durchgängen; jeweils anschließend Ausfüllen des Workload-Fragebogens
7. Pause
8. Bearbeitung von ca. 10-20 Durchgängen; jeweils anschließend Ausfüllen des Workload-Fragebogens
9. Debriefing und Ausfüllen von Usability-Fragebögen zu den Bediengeräten
10. Verabschiedung

Zur Kombination der Faktorstufen kamen die Durchgänge hinzu, in denen ausschließlich Zeige- und Zusatzaufgaben in den beiden Schwierigkeitsstufen bearbeitet wurden. In Summe waren zehn Einzeldurchgänge plus 48 Aufgabenkombinationen beim ersten Termin und weitere 48 Aufgabenkombinationen beim zweiten Termin zu bearbeiten, von denen jeder 90 Sekunden dauerte.

12 Ergebnisse

Nach einer kurzen Beschreibung von Eigenschaften der Versuchsteilnehmer werden die Untersuchungsergebnisse dargestellt. Diese werden nach der Art der eingesetzten Zeigaufgabe gegliedert. Innerhalb dieser beiden Blöcke werden Ergebnisse erst aus Perspektive der Zeigaufgabe dargestellt, die die globalen Einflüsse von Bediengerät, Schwierigkeit und Art der Zusatzaufgabe auf Leistung und Workload umfassen. Im Weiteren erfolgt eine Gliederung nach Art der Zusatzaufgabe. Zusätzlich zu den Einflüssen von Bediengerät und Schwierigkeit der Zusatzaufgabe wird der Einfluss der Priorisierung der einzelnen Aufgabenteile untersucht. Die jeweiligen Leistungsmaße der Zusatzaufgabe ergänzen die Untersuchung als zusätzliche Kriterien.

Zu den folgenden Auswertungen und Arten der graphischen Darstellung ist Folgendes anzumerken:

- Für alle Prüfungen auf Signifikanz wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ verwendet.
- Die Ergebnisse umfassen neben F-Werten mit Irrtumswahrscheinlichkeit eine Schätzung der Effektstärke η_p^2 und der Teststärke $1 - \beta$.
- Für alle vorgenommenen varianzanalytischen Auswertungen wurden bei Verletzung der Sphärizitätsannahme die Freiheitsgrade nach der Methode von Greenhouse-Geisser korrigiert.
- Die Fehlerbalken in den Grafiken umfassen ein Intervall von je einem Standardfehler um den Mittelwert.
- In den Abbildungen werden die Versuchsbedingungen abgekürzt: TS steht für *Touchscreen*, CCD für das *Cursor Control Device*, im vorliegenden Fall realisiert durch den Trackball. Die Zusatzaufgaben werden durch ihre Anfangsbuchstaben abgekürzt.

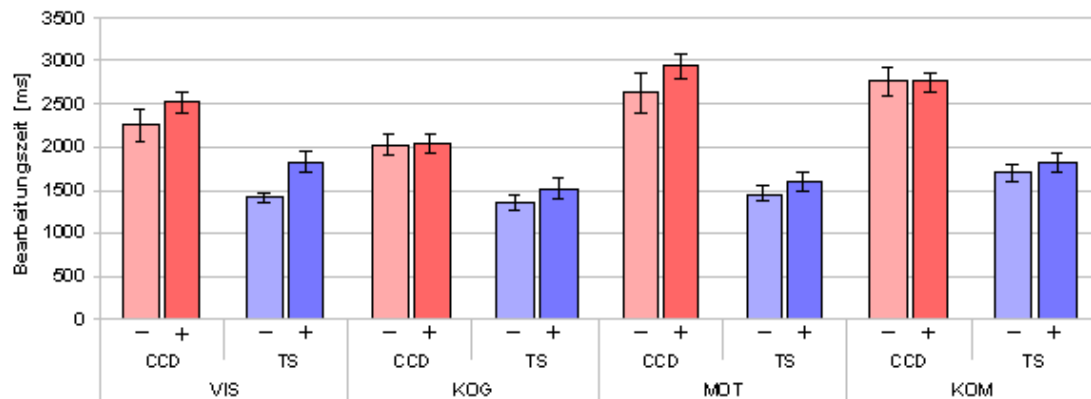


Abbildung 12.1: Bedienzeit für die Zeigeaufgabe *Einfachziele* in Abhängigkeit von Bediengeräten, Zusatzaufgaben und deren Schwierigkeitsstufe

12.1 Einfachziele

Zuerst wird geprüft, ob die Faktoren Zusatzaufgabe, Schwierigkeit der Zusatzaufgabe und Eingabegerät einen Einfluss auf Leistung in der Zeigeaufgabe und Workload während der Mehrfachtätigkeit ausüben. Anschließend bilden die verwendeten Zusatzaufgaben die Gliederung für die Analyse, inwieweit die Probanden in der Lage waren, die Aufmerksamkeit zwischen Zeige- und Zusatzaufgabe zu verteilen, und welchen Einfluss die Schwierigkeit der Zusatzaufgabe und das Eingabegerät haben.

12.1.1 Leistung in der Zeigeaufgabe

Für diese Untersuchung wurden die Werte gleicher Priorisierung zwischen Zeige- und Zusatzaufgaben herangezogen. Es konnte eine differenzierte Wirkung der Art des Bedienelements in Abhängigkeit von der Zusatzaufgabe nachgewiesen werden: $F(3,30)=15.58$, $p<.001$, $\eta_p^2=.61$, $1 - \beta>.999$. Zudem konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den Bediengeräten nachgewiesen werden: $F(1,10)=115.72$, $p<.001$, $\eta_p^2=.92$, $1 - \beta>.999$. Die Art der Zusatzaufgabe übte einen signifikanten Einfluss auf die Bedienzeit aus: $F(3,30)=16.91$, $p<.001$, $\eta_p^2=.63$, $1 - \beta>.999$. Der Einfluss der Aufgabenschwierigkeit war signifikant: $F(1,10)=11.70$, $p=.007$, $\eta_p^2=.54$, $1 - \beta=.868$.

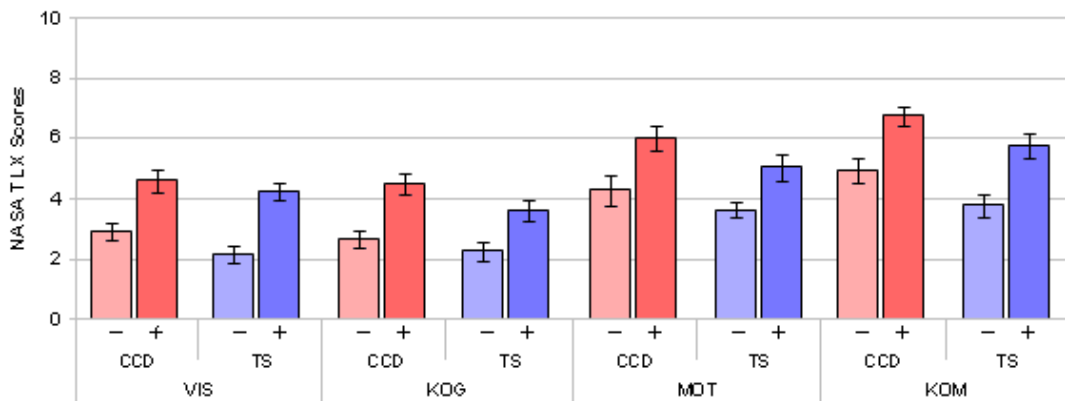


Abbildung 12.2: Workload-Werte des NASA-TLX für die Zeigeaufgabe *Einfachziele* in Abhängigkeit von Bediengeräten, Zusatzaufgaben und deren Schwierigkeitsstufe

Einzelvergleiche der Zusatzaufgaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen der kognitiven und allen anderen Aufgaben sowie zwischen der visuellen und der komplexen Zusatzaufgabe.

12.1.2 Workload

Auch für die Untersuchung der Workload wurden die Werte gleicher Priorisierung zwischen Zeige- und Zusatzaufgaben herangezogen. Keine der vier möglichen Interaktionen erster und zweiter Ordnung zwischen den Faktoren beeinflusste die Workload-Werte signifikant. Hingegen konnten alle drei möglichen Haupteffekte statistisch nachgewiesen werden. Bediengeräte: $F(1,10)=37.70$, $p<.001$, $\eta_p^2=.79$, $1 - \beta>.999$; Art der Zusatzaufgabe: $F(3,30)=48.20$, $p<.001$, $\eta_p^2=.83$, $1 - \beta>.999$; Aufgabenschwierigkeit: $F(1,10)=71.38$, $p<.001$, $\eta_p^2=.88$, $1 - \beta>.999$.

Einzelvergleiche der Zusatzaufgaben zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen der kognitiven der visuellen Bedingung. Alle anderen Einzelvergleiche sind signifikant.

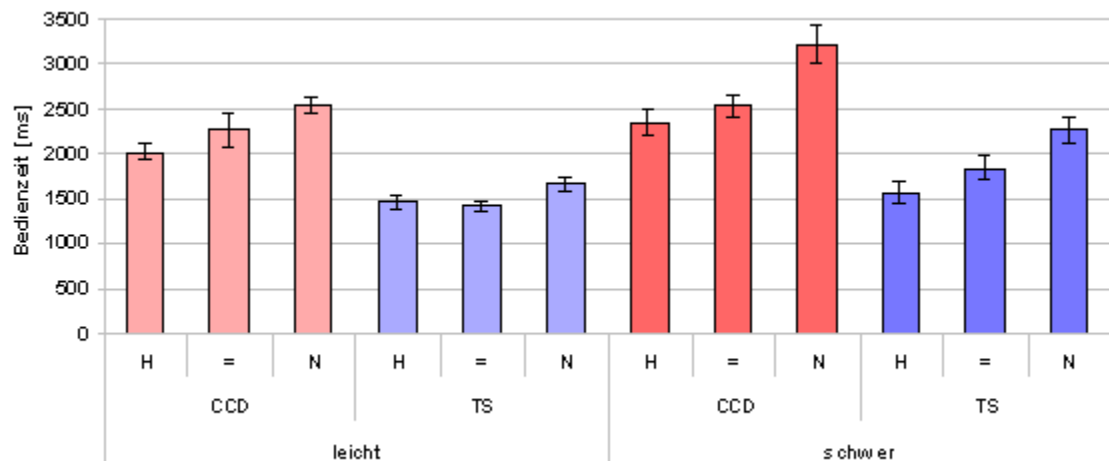


Abbildung 12.3: Bedienzeit für die Zeigeaufgabe *Einfachziele* für die Bearbeitung der visuellen Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

12.1.3 Visuelle Aufgabe

12.1.3.1 Leistung in der Zeigeaufgabe

Die Interaktion Priorisierung \times Schwierigkeit übte einen signifikanten Einfluss auf die Leistung in der Zeigeaufgabe unter visueller Zusatzbelastung aus: $F(2,20)=4.45$, $p=.025$, $\eta_p^2=.31$, $1 - \beta=.70$. Die drei Haupteffekte konnten statistisch nachgewiesen werden: Bediengerät: $F(1,10)=96.73$, $p<.001$, $\eta_p^2=.91$, $1 - \beta>.999$; Schwierigkeit: $F(1,10)=63.70$, $p<.001$, $\eta_p^2=.86$, $1 - \beta>.999$; Priorisierung: $F(2,20)=22.34$, $p<.001$, $\eta_p^2=.69$, $1 - \beta>.999$. Es bestand ein statistisch signifikanter linearer Trend innerhalb des Faktors Priorisierung: $F(1,10)=28.52$, $p=.009$, $\eta_p^2=.74$, $1 - \beta=.998$. Alle Einzelvergleiche zwischen den Priorisierungsstufen waren signifikant.

12.1.3.2 Leistung in der Zusatzaufgabe

Keine der vier möglichen Interaktionen erster und zweiter Ordnung zwischen den Faktoren beeinflusste die Leistungsvariable in der visuellen Suchaufgabe signifikant. Der Einfluss der Schwierigkeitsmanipulation und der Priorisierung konnten statistisch nachgewiesen werden: $F(1,10)=328.82$, $p<.001$, $\eta_p^2=.97$, $1 - \beta>.999$ bzw. $F(2,20)=7.12$, $p<.001$, $\eta_p^2=.42$, $1 - \beta=.89$. Einzelvergleiche der Priorisierungsstufen

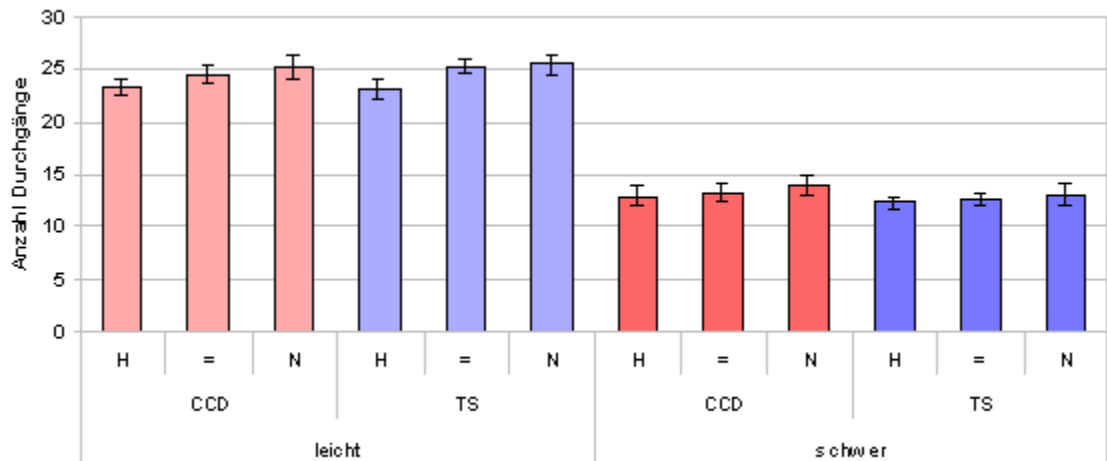


Abbildung 12.4: Anzahl der Durchgänge der visuellen Zusatzaufgabe für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe *Einfachziele* in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen der Gleichgewichtung der Aufgaben und der Betonung der Zusatzaufgabe. Die anderen Einzelvergleiche sind signifikant. Es konnte ein linearer Trend innerhalb des Faktors Priorisierung nachgewiesen werden: $F(1,10)=10.47$, $p=.009$, $\eta_p^2=.51$, $1 - \beta=.83$. Zwischen Trackball und Touchscreen konnte kein signifikanter Unterschied in der visuellen Aufgabenleistung festgestellt werden.

12.1.3.3 Workload

Zwischen Schwierigkeit und Priorisierung wurde eine signifikante Interaktion festgestellt: $F(2,20)=3.98$, $p=.035$, $\eta_p^2=.29$, $1 - \beta=.645$. Es konnte ein signifikanter Einfluss des Bediengeräts auf die Workload nachgewiesen werden: $F(1,10)=17.75$, $p=.002$, $\eta_p^2=.64$, $1 - \beta=.996$. Auch der Einfluss der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe war signifikant: $F(1,10)=79.54$, $p<.001$, $\eta_p^2=.89$, $1 - \beta>.999$. Die Priorisierungsstufen unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Es konnte hier auch kein linearer Trend festgestellt werden.

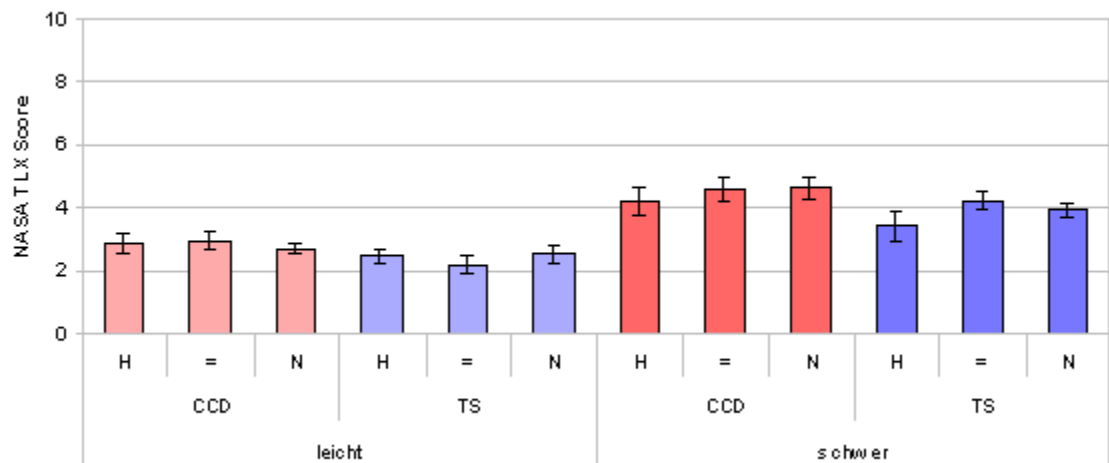


Abbildung 12.5: Workload-Werte des NASA-TLX für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe *Einfachziele* und der visuellen Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

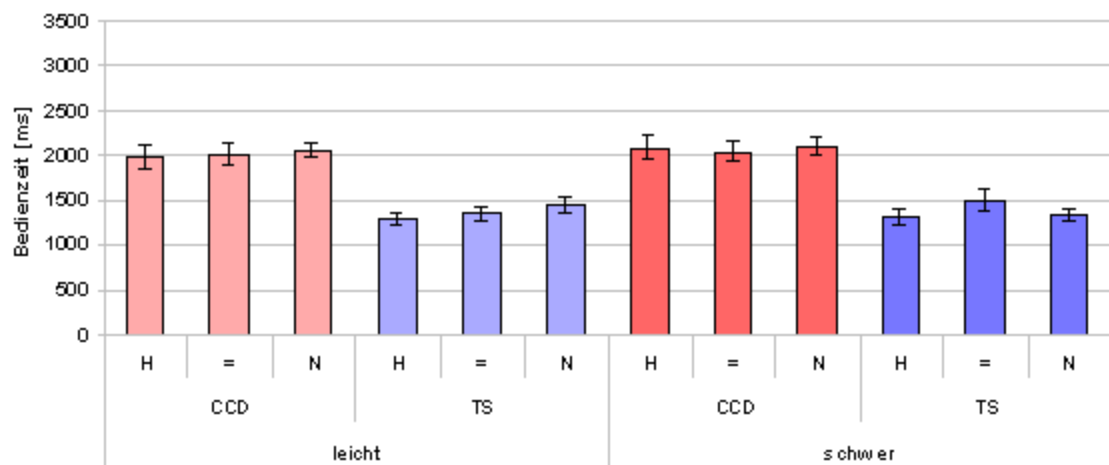


Abbildung 12.6: Bedienzeit für die Zeigeaufgabe *Einfachziele* für die Bearbeitung der kognitiven Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

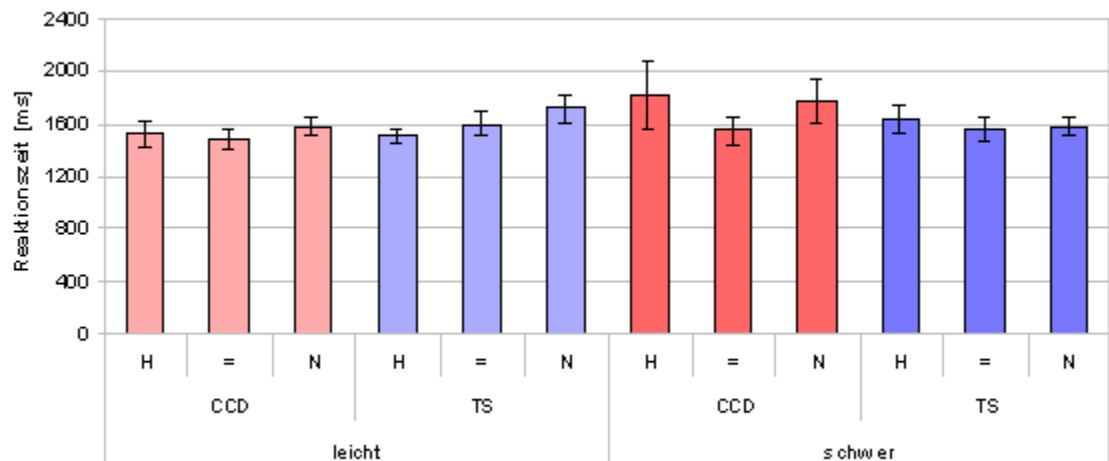


Abbildung 12.7: Reaktionszeit bei der kognitiven Zusatzaufgabe für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe *Einfachziele* in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

12.1.4 Kognitive Aufgabe

12.1.4.1 Leistung in der Zeigeaufgabe

Es konnte ein signifikanter Einfluss des Bediengeräts auf die Leistung in der Zeigeaufgabe nachgewiesen werden: $F(1,10)=188.30$, $p<.001$, $\eta_p^2=.95$, $1 - \beta>.999$.

12.1.4.2 Leistung in der Zusatzaufgabe

Keine der untersuchten Faktoren und Faktor-Interaktionen übte einen signifikanten Einfluss auf die Leistung in der Zusatzaufgabe aus.

12.1.4.3 Workload

Der Unterschied zwischen der leichten und schweren Zusatzaufgabe war signifikant: $F(1,10)=53.55$, $p<.001$, $\eta_p^2=.84$, $1 - \beta>.999$.

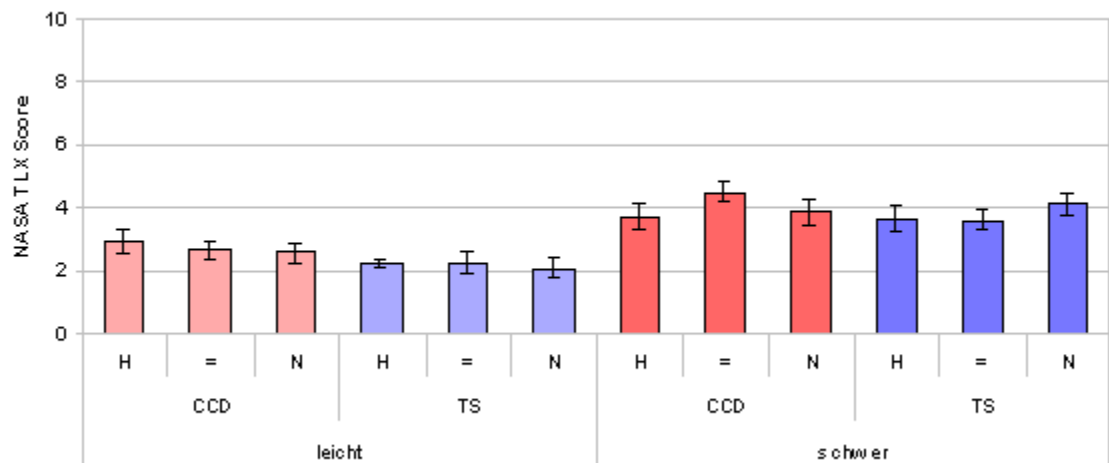


Abbildung 12.8: Workload-Werte des NASA-TLX für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe *Einfachziele* und der kognitiven Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

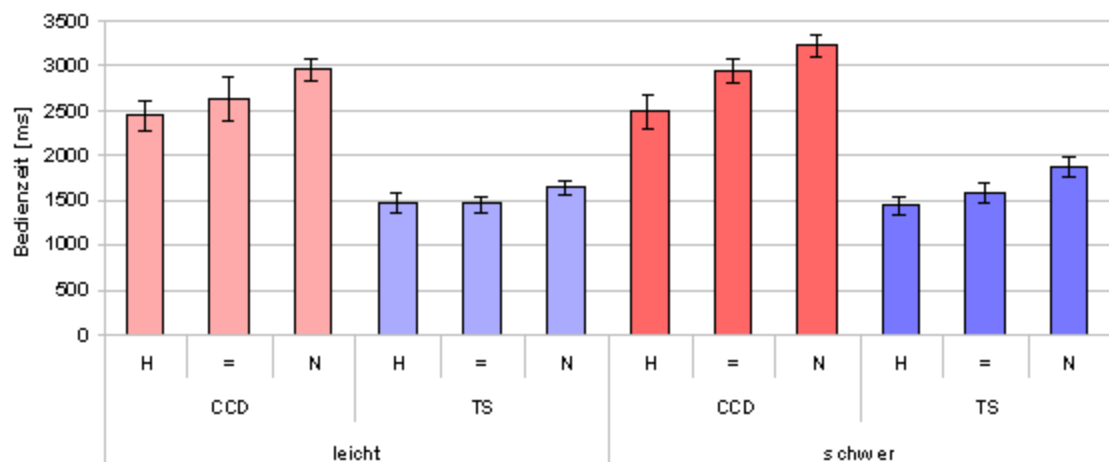


Abbildung 12.9: Bediendzeit für die Zeigeaufgabe *Einfachziele* für die Bearbeitung der motorischen Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

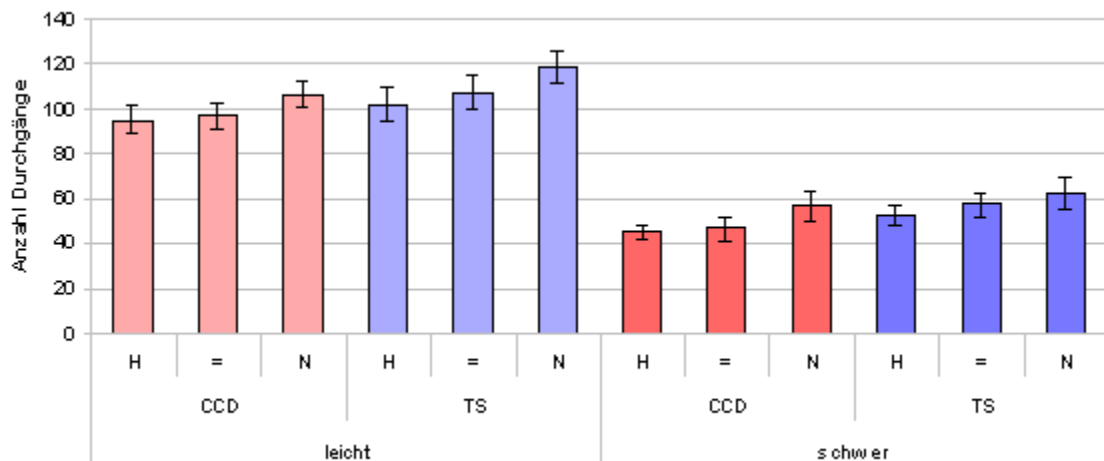


Abbildung 12.10: Leistung in der motorischen Zusatzaufgabe für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe *Einfachziele* in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

12.1.5 Motorische Aufgabe

12.1.5.1 Leistung in der Zeigeaufgabe

Zwischen Bediengerät und Priorisierung wurde eine signifikante Interaktion festgestellt: $F(2,20)=4.96$, $p=.018$, $\eta_p^2=.33$, $1 - \beta > .746$. Die drei Faktoren übten je einen signifikanten Einfluss auf die Zeigeleistung aus. Schwierigkeit: $F(1,10)=15.13$, $p=.003$, $\eta_p^2=.60$, $1 - \beta=.938$. Bediengerät: $F(1,10)=183.84$, $p<.001$, $\eta_p^2=.95$, $1 - \beta>.999$. Priorisierung: $F(2,20)=18.05$, $p<.001$, $\eta_p^2=.64$, $1 - \beta>.999$. Zwischen den Stufen der Priorisierung bestand ein signifikanter linearer Trend: $F(1,10)=41.73$, $p<.001$, $\eta_p^2=.81$, $1 - \beta>.999$. Die Leistung mit Aufmerksamkeitsschwerpunkt auf der Zusatzaufgabe unterschied sich signifikant von der in den beiden anderen Priorisierungsstufen.

12.1.5.2 Leistung in der Zusatzaufgabe

Die drei Faktoren übten je einen signifikanten Einfluss auf die Leistung in der motorischen Zusatzaufgabe aus. Schwierigkeit: $F(1,10)=335.16$, $p<.001$, $\eta_p^2=.97$, $1 - \beta>.999$. Bediengerät: $F(1,10)=15.10$, $p=.003$, $\eta_p^2=.60$, $1 - \beta=.937$. Priorisierung: $F(2,20)=5.04$, $p=.039$, $\eta_p^2=.34$, $1 - \beta=.587$. Zwischen den Stufen der Priorisierung bestand ein signifikanter linearer Trend: $F(1,10)=5.37$, $p=.043$, $\eta_p^2=.35$, $1 - \beta=.553$. Die Leistung mit

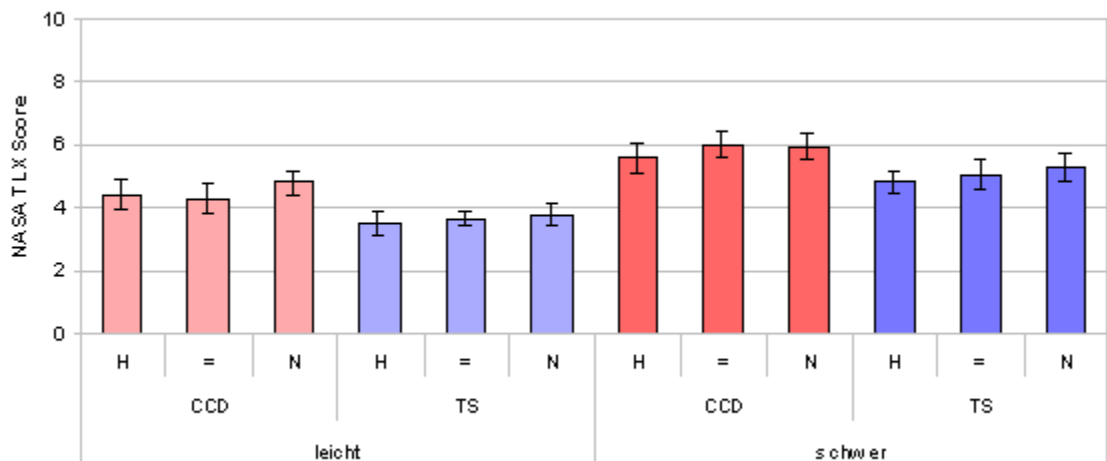


Abbildung 12.11: Workload-Werte des NASA-TLX für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe *Einfachziele* und der motorischen Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

Aufmerksamkeitsschwerpunkt auf der Zusatzaufgabe unterschied sich signifikant von der in der Bedingung mit gleich verteilter Aufmerksamkeit.

12.1.5.3 Workload

Die Schwierigkeit der Zusatzbedingungen unterschied sich signifikant: $F(1,10)=58.58$, $p<.001$, $\eta_p^2=.85$, $1-\beta>.999$. Der Faktor Bediengerät übte einen signifikanten Einfluss auf die Workload aus: $F(1,10)=21.11$, $p=.001$, $\eta_p^2=.68$, $1-\beta=.985$.

12.1.6 Komplexe Aufgabe

12.1.6.1 Leistung in der Zeigeaufgabe

Die Schwierigkeitsmanipulation der Zusatzaufgabe bewirkte keinen signifikanten Effekt auf die Leistung in der Zeigeaufgabe, im Gegensatz zu Bediengerät und Priorisierung: $F(1,10)=132.72$, $p<.001$, $\eta_p^2=.93$, $1-\beta>.999$ bzw. $F(2,20)=8.56$, $p=.002$, $\eta_p^2=.46$, $1-\beta=.939$. Es bestand ein statistisch signifikanter linearer Trend innerhalb des Faktors Priorisierung: $F(1,10)=13.01$, $p=.005$, $\eta_p^2=.57$, $1-\beta=.901$. Die Zeigeleis-

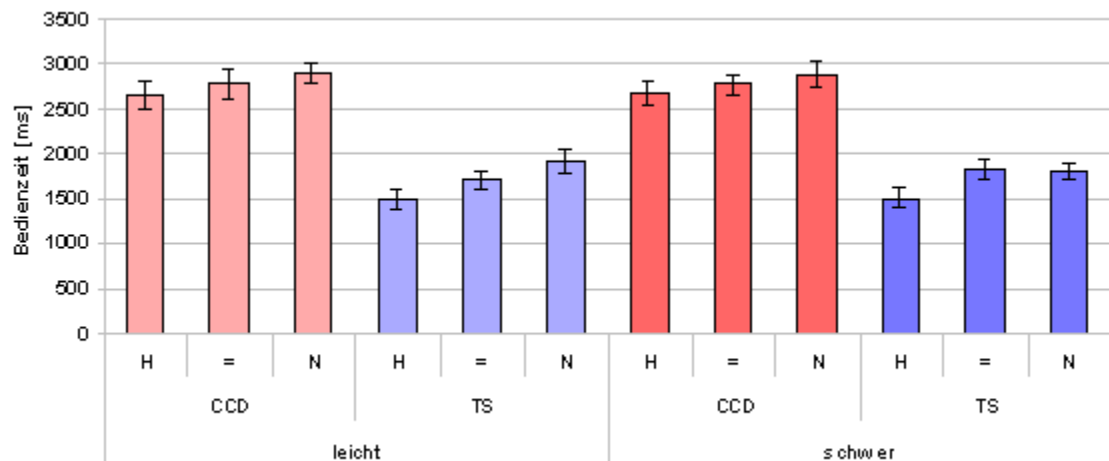


Abbildung 12.12: Bedienzeit für die Zeigeaufgabe *Einfachziele* für die Bearbeitung der komplexen Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

tung für die Übergewichtung der Zeigeaufgabe war signifikant niedriger als für die Betonung der Zusatzaufgabe.

12.1.6.2 Leistung in der Zusatzaufgabe

Tracking Der Einfluss der einzelnen Priorisierungsstufen hing signifikant vom verwendeten Bediengerät ab: $F(2,20)=4.41$, $p=.026$, $\eta_p^2=.31$, $1 - \beta=.692$. Schwierigkeit der Zusatzaufgabe und Bediengerät übten einen signifikanten Einfluss auf die Trackingleistung aus: $F(1,10)=5.06$, $p=.048$, $\eta_p^2=.37$, $1 - \beta=.529$ bzw. $F(1,10)=34.06$, $p<.001$, $\eta_p^2=.77$, $1 - \beta=.999$. Es war ein linearer Trend innerhalb der Stufen des Faktors Priorisierung nachzuweisen: $F(1,10)=9.25$, $p=.012$, $\eta_p^2=.48$, $1 - \beta=.782$.

Readback Es bestand ein signifikanter Unterschied in der Leistung zwischen der leichten und schweren Zusatzaufgabe: $F(1,10)=13.36$, $p=.004$, $\eta_p^2=.57$, $1 - \beta=.908$. Weder die Art der Bedienung noch die Priorisierung übten einen signifikanten Einfluss auf die Leistung aus.

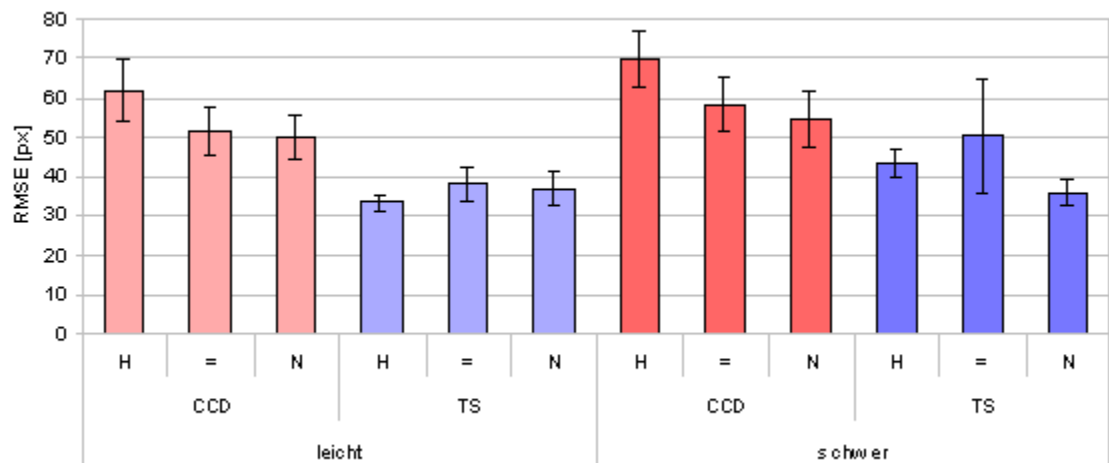


Abbildung 12.13: Leistung in der Trackingaufgabe für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe *Einfachziele* in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

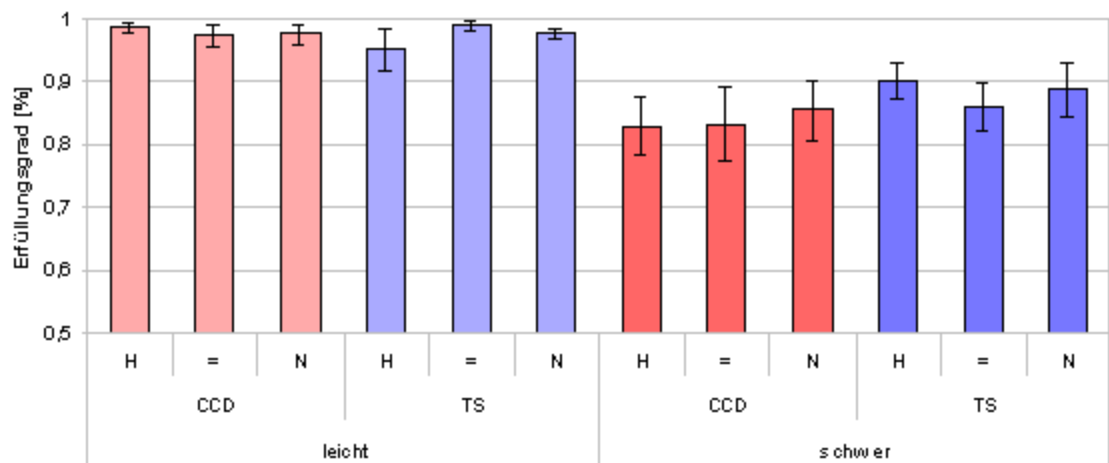


Abbildung 12.14: Leistung in der Readbackaufgabe für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe *Einfachziele* in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

12.1.6.3 Workload

Die Schwierigkeit der Zusatzaufgabe und Bediengerät übten einen signifikanten Einfluss auf die Trackingleistung aus: $F(1,10)=50.62$, $p<.001$, $\eta_p^2=.84$, $1 - \beta>.999$ bzw.

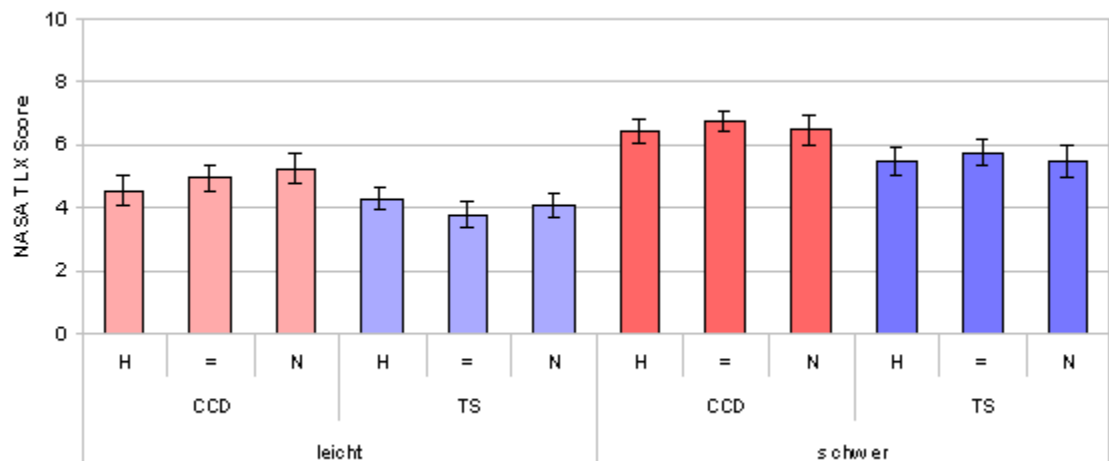


Abbildung 12.15: Workload-Werte des NASA-TLX für die Bearbeitung der Zeigaufgabe *Einfachziele* und der komplexen Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

$F(1,10)=43.66$, $p<.001$, $\eta_p^2=.81$, $1 - \beta>.999$. Die Priorisierungsstufen wirkten sich nicht signifikant auf die Workload aus.

12.2 Mehrfachziele

Wie für die Untersuchung der Einfachziele wird zuerst geprüft, ob die Faktoren Zusatzaufgabe, Schwierigkeit der Zusatzaufgabe und Eingabegerät einen Einfluss auf Leistung in der Zeigaufgabe und Beanspruchung während der Mehrfachtigkeit ausüben. Anschließend bilden die verwendeten Zusatzaufgaben die Gliederung für die Analyse, inwieweit die Probanden in der Lage waren, die Aufmerksamkeit zwischen Zeige- und Zusatzaufgabe zu verteilen, und welchen Einfluss Schwierigkeit der Zusatzaufgabe und Eingabegerät haben.

12.2.1 Leistung in der Zeigaufgabe

Für diese Untersuchung wurden die Werte gleicher Priorisierung zwischen Zeige- und Zusatzaufgaben herangezogen. Es konnte eine differenzierte Wirkung der Art

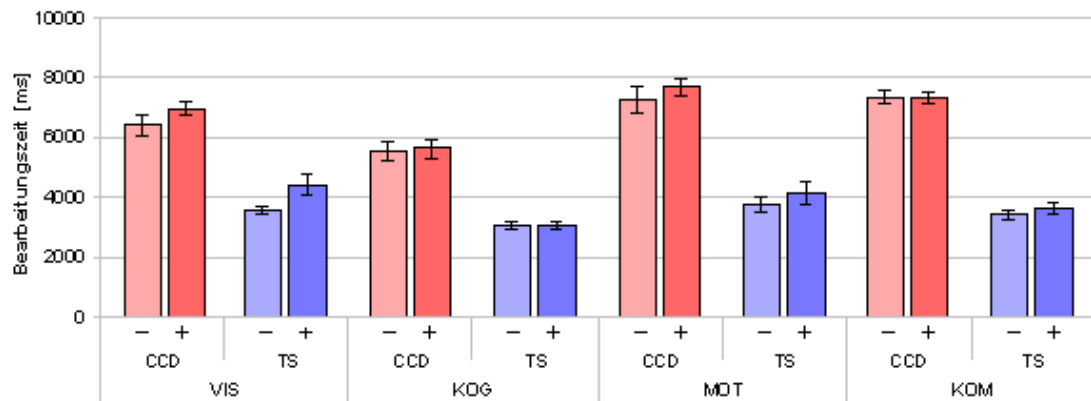


Abbildung 12.16: Bedienzeit für die Zeigeaufgabe *Mehrziele* in Abhängigkeit von Bediengeräten, Zusatzaufgaben und deren Schwierigkeitsstufe

des Bedienelements in Abhängigkeit von der Zusatzaufgabe nachgewiesen werden: $F(2.03, 20.29) = 8.23$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .45$, $1 - \beta = .932$. Zudem konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den Bediengeräten nachgewiesen werden: $F(1, 10) = 648.60$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .99$, $1 - \beta > .999$. Die Art der Zusatzaufgabe übte einen signifikanten Einfluss auf die Bedienzeit aus: $F(3, 30) = 22.46$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .69$, $1 - \beta > .999$. Der Einfluss der Aufgabenschwierigkeit war signifikant: $F(1, 10) = 14.08$, $p = .004$, $\eta_p^2 = .59$, $1 - \beta = .921$.

Einzelvergleiche der Zusatzaufgaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen der kognitiven und allen anderen Zusatzaufgaben.

12.2.2 Workload

Auch für die Untersuchung der Workload wurden die Werte gleicher Priorisierung zwischen Zeige- und Zusatzaufgaben herangezogen.

Es konnte eine differenzierte Wirkung der Art des Bedienelements in Abhängigkeit von der Art der Zusatzaufgabe und von der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe nachgewiesen werden: $F(3, 30) = 4.40$, $p = .011$, $\eta_p^2 = .31$, $1 - \beta = .829$ bzw. $F(1, 10) = 5.84$, $p = .036$, $\eta_p^2 = .37$, $1 - \beta = .588$.

Alle drei möglichen Haupteffekte konnten statistisch nachgewiesen werden. Bediengeräte: $F(1, 10) = 8.19$, $p = .017$, $\eta_p^2 = .45$, $1 - \beta = .732$; Art der Zusatzaufgabe:

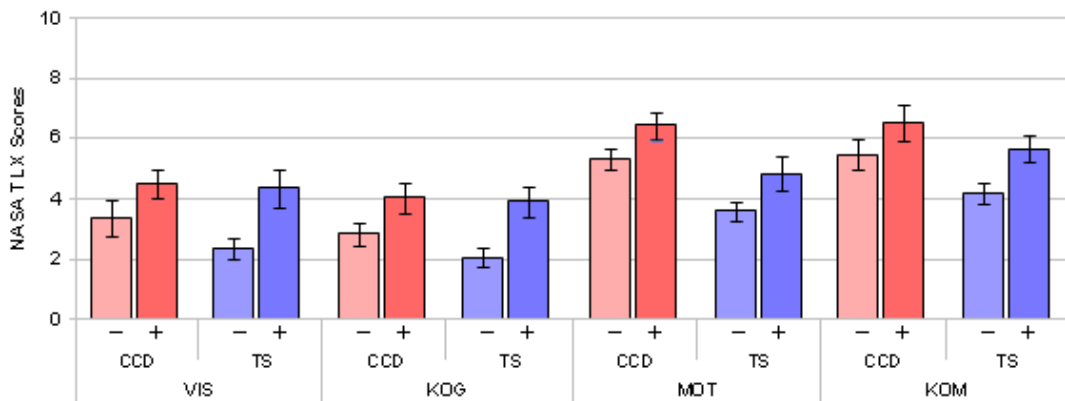


Abbildung 12.17: Workload-Werte des NASA-TLX für die Zeigeaufgabe *Mehrfachziele* in Abhängigkeit von Bediengeräten, Zusatzaufgaben und deren Schwierigkeitsstufe

$F(3,30)=14.88$, $p<.001$, $\eta_p^2=.59$, $1 - \beta>.999$; Aufgabenschwierigkeit: $F(1,10)=40.69$, $p<.001$, $\eta_p^2=.88$, $1 - \beta>.999$.

Einzelvergleiche der Zusatzaufgaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen der motorischen und der kognitiven, der kognitiven und der komplexen sowie der visuellen und der komplexen Zusatzaufgabe.

12.2.3 Visuelle Aufgabe

12.2.3.1 Leistung in der Zeigeaufgabe

Die Interaktion Priorisierung \times Schwierigkeit übte einen signifikanten Einfluss auf die Leistung in der Zeigeaufgabe unter visueller Zusatzbelastung aus: $F(2,20)=4.62$, $p=.021$, $\eta_p^2=.32$, $1 - \beta=.71$. Die drei Haupteffekte konnten statistisch nachgewiesen werden: Bediengerät: $F(1,10)=850.70$, $p<.001$, $\eta_p^2=.99$, $1 - \beta>.999$; Schwierigkeit: $F(1,10)=74.54$, $p<.001$, $\eta_p^2=.88$, $1 - \beta>.999$; Priorisierung: $F(2,20)=11.45$, $p<.001$, $\eta_p^2=.53$, $1 - \beta=.983$. Es bestand ein statistisch signifikanter linearer Trend innerhalb des Faktors Priorisierung: $F(1,10)=19.80$, $p=.001$, $\eta_p^2=.66$, $1 - \beta=.979$. Einzelvergleiche der Priorisierungsstufen zeigen nur zwischen Schwerpunkt Zeigeaufgabe und Schwerpunkt Zusatzaufgabe einen signifikanten Unterschied.

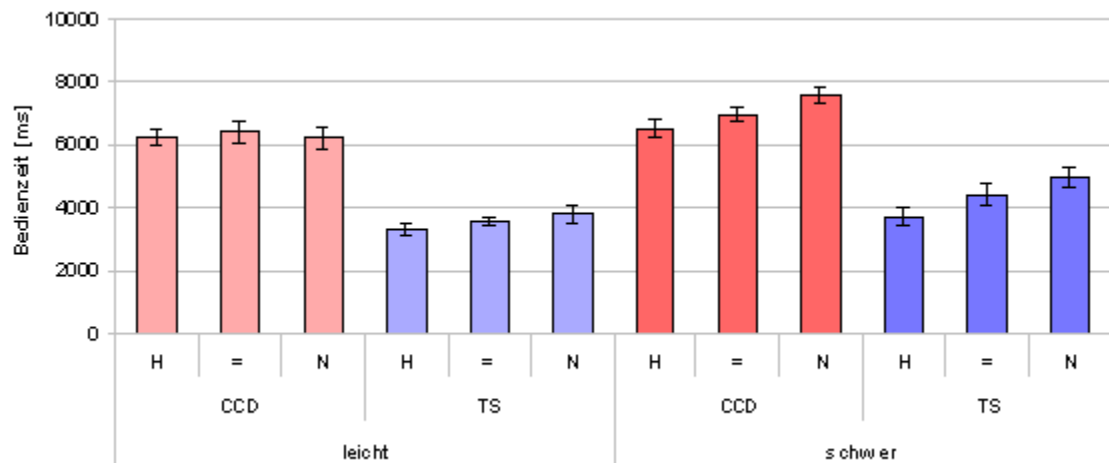


Abbildung 12.18: Bediendzeit für die Zeigeaufgabe *Mehrfachziele* für die Bearbeitung der visuellen Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

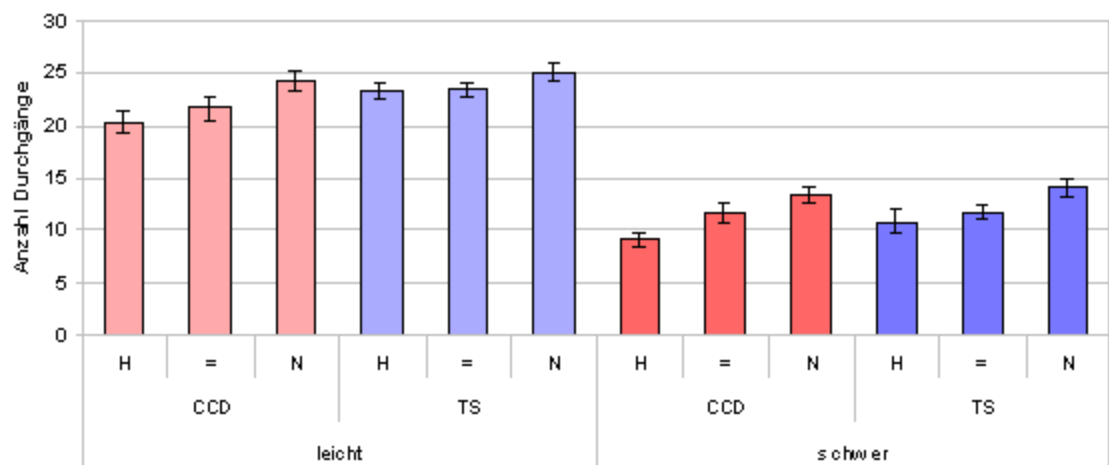


Abbildung 12.19: Anzahl der Durchgänge der visuellen Zusatzaufgabe für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe *Mehrfachziele* in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

12.2.3.2 Leistung in der Zusatzaufgabe

Keine der vier möglichen Interaktionen erster und zweiter Ordnung zwischen den Faktoren beeinflusste die Leistungsvariable in der visuellen Suchaufgabe signifi-

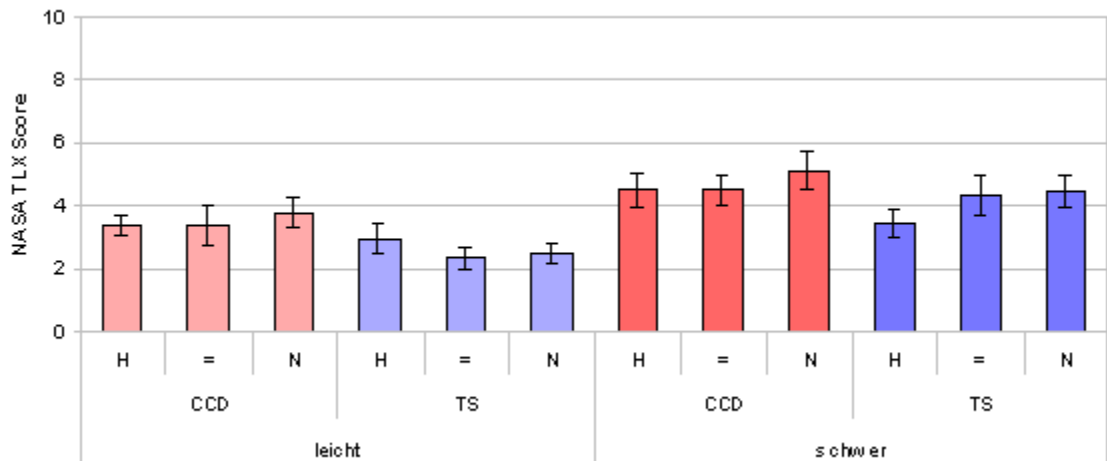


Abbildung 12.20: Workload-Werte des NASA-TLX für die Bearbeitung der Zeigaufgabe *Mehrfachziele* und der visuellen Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

kant. Der Einfluss der Schwierigkeitsmanipulation und der Priorisierung konnten statistisch nachgewiesen werden: $F(1,10)=293.57$, $p<.001$, $\eta_p^2=.97$, $1 - \beta>.999$ bzw. $F(2,20)=23.93$, $p<.001$, $\eta_p^2=.71$, $1 - \beta=.992$. Zwischen Trackball und Touchscreen konnte ein signifikanter Unterschied in der visuellen Aufgabenleistung festgestellt werden: $F(1,10)=23.93$, $p<.001$, $\eta_p^2=.71$, $1 - \beta>.992$. Einzelvergleiche der Priorisierungsstufen zeigen signifikante Unterschiede zwischen allen Priorisierungen. Es konnte ein linearer Trend innerhalb des Faktors Priorisierung nachgewiesen werden: $F(1,10)=10.47$, $p=.009$, $\eta_p^2=.51$, $1 - \beta=.83$.

12.2.3.3 Workload

Es konnte ein signifikanter Einfluss des Bediengeräts auf die Workload nachgewiesen werden: $F(1,10)=10.37$, $p=.009$, $\eta_p^2=.51$, $1 - \beta=.830$. Auch der Einfluss der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe war signifikant: $F(1,10)=22.57$, $p<.001$, $\eta_p^2=.69$, $1 - \beta=.989$. Die Priorisierungsstufen unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Es konnte hier auch kein linearer Trend festgestellt werden.

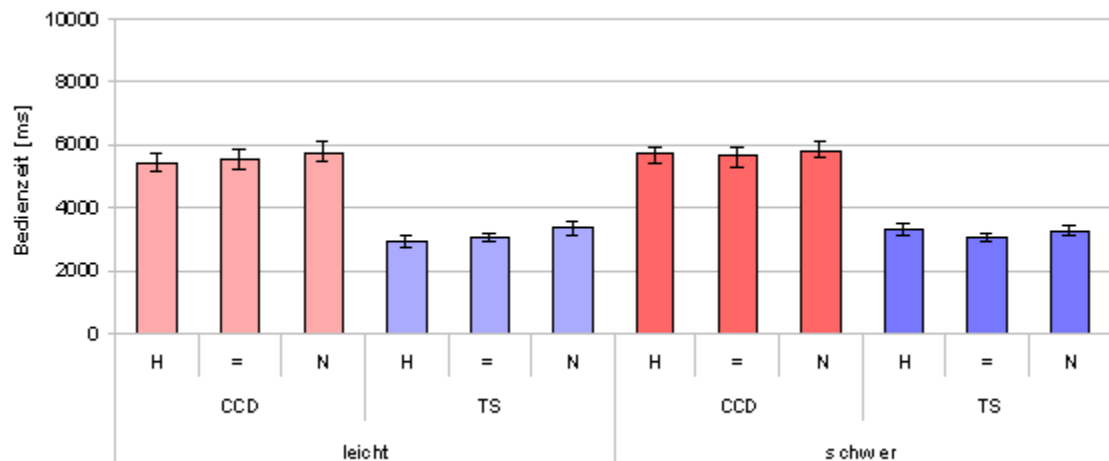


Abbildung 12.21: Bedienzeit für die Zeigeaufgabe *Mehrfachziele* für die Bearbeitung der kognitiven Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

12.2.4 Kognitive Aufgabe

12.2.4.1 Leistung in der Zeigeaufgabe

Die Interaktion zwischen der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe und den Priorisierungsstufen war signifikant: $F(2,20)=6.05$, $p=.009$, $\eta_p^2=.38$, $1 - \beta=.830$. Die drei Faktoren übten einen signifikanten Einfluss auf die Zeigeleistung aus. Bediengerät: $F(1,10)=5.35$, $p=.049$, $\eta_p^2=.34$, $1 - \beta=.527$; Schwierigkeit: $F(1,10)=131.18$, $p<.001$, $\eta_p^2=.93$, $1 - \beta>.999$; Priorisierung: $F(2,20)=4.46$, $p=.025$, $\eta_p^2=.31$, $1 - \beta>.614$. Es konnte ein linearer Trend innerhalb des Faktors Priorisierung nachgewiesen werden: $F(1,10)=6.206$, $p=.032$, $\eta_p^2=.38$, $1 - \beta=.614$. Kein Einzelvergleich von Priorisierungsstufen ergab einen signifikanten Unterschied.

12.2.4.2 Leistung in der Zusatzaufgabe

Es konnte ein signifikanter Einfluss der Schwierigkeitsmanipulation auf die kognitive Leistung nachgewiesen werden: $F(1,10)=5.45$, $p=.042$, $\eta_p^2=.35$, $1 - \beta=.559$.

12 Ergebnisse

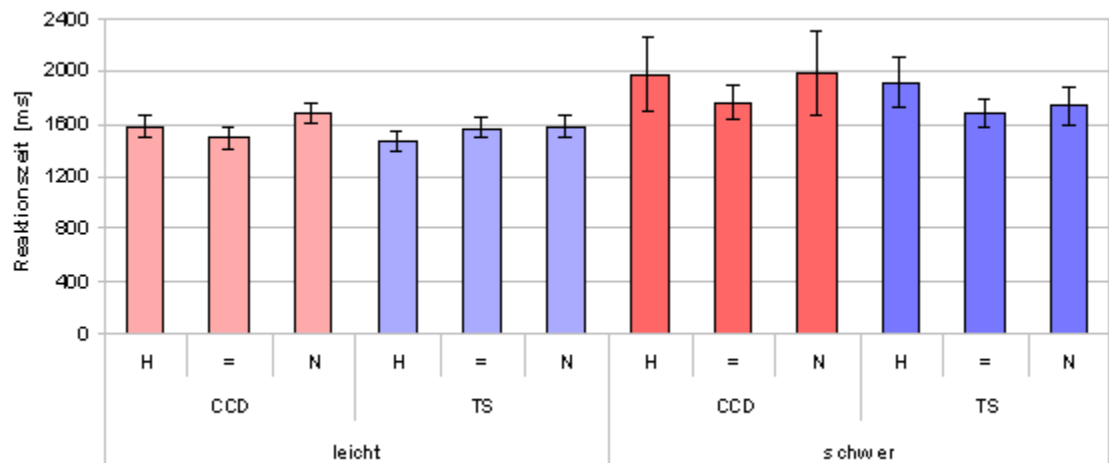


Abbildung 12.22: Reaktionszeit bei der kognitiven Zusatzaufgabe für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe *Mehrfachziele* in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

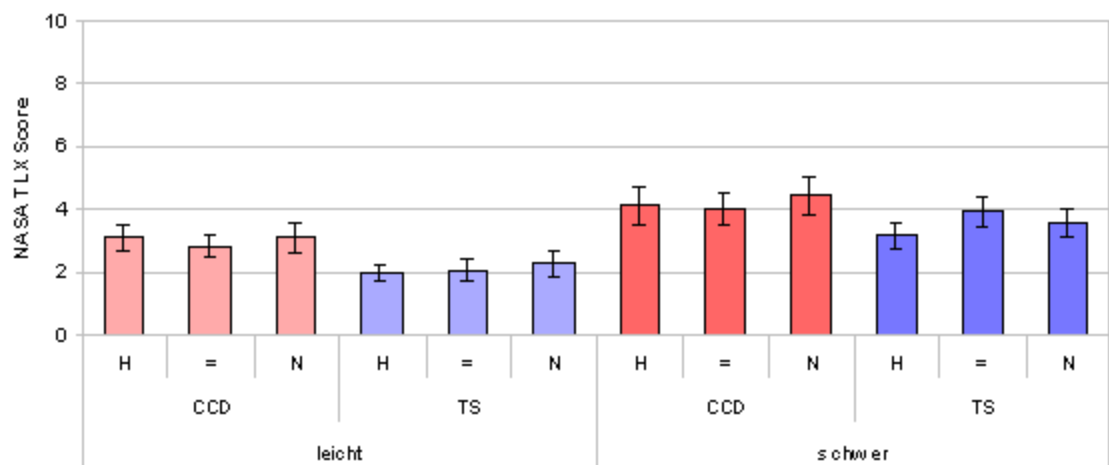


Abbildung 12.23: Workload-Werte des NASA-TLX für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe *Mehrfachziele* und der kognitiven Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

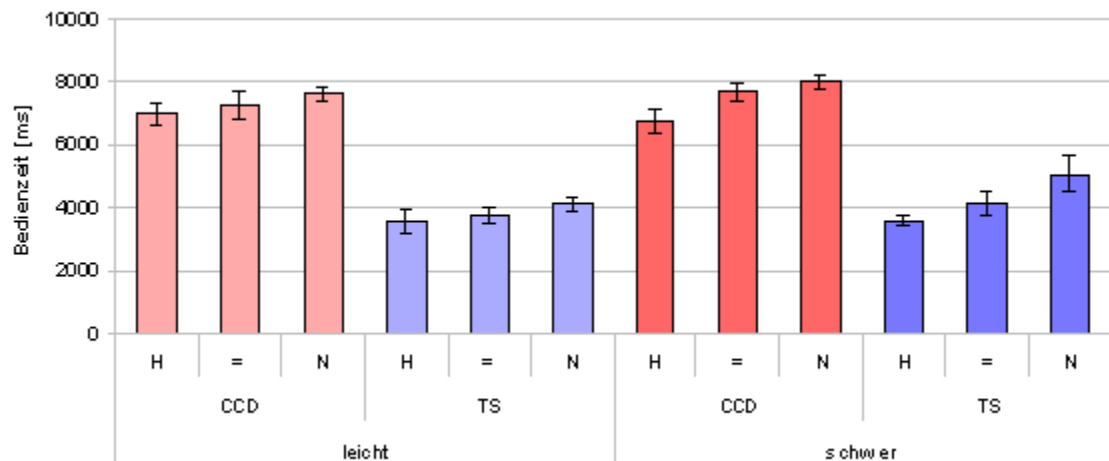


Abbildung 12.24: Bediendzeit für die Zeigeaufgabe *Mehrfachziele* für die Bearbeitung der motorischen Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

12.2.4.3 Workload

Der Unterschied zwischen der leichten und schweren Zusatzaufgabe war signifikant: $F(1,10)=18.00$, $p=.002$, $\eta_p^2=.64$, $1 - \beta=.969$. Ebenso konnte ein signifikanter Unterschied zwischen der Bedienung mit Touchscreen und Trackball nachgewiesen werden: $F(1,10)=7.97$, $p=.018$, $\eta_p^2=.44$, $1 - \beta=.721$.

12.2.5 Motorische Aufgabe

12.2.5.1 Leistung in der Zeigeaufgabe

Die drei Faktoren übten je einen signifikanten Einfluss auf die Zeigeleistung aus. Schwierigkeit: $F(1,10)=5.01$, $p=.049$, $\eta_p^2=.33$, $1 - \beta=.524$. Bediengerät: $F(1,10)=172.23$, $p<.001$, $\eta_p^2=.95$, $1 - \beta>.999$. Priorisierung: $F(1,18,11.83)=15.76$, $p<.001$, $\eta_p^2=.61$, $1 - \beta=.969$. Zwischen den Stufen der Priorisierung bestand ein signifikanter linearer Trend: $F(1,10)=22.08$, $p<.001$, $\eta_p^2=.69$, $1 - \beta=.988$. Die Leistung mit Aufmerksamkeitsschwerpunkt auf der Zeigeaufgabe unterschied sich signifikant von der in den beiden anderen Priorisierungsstufen.

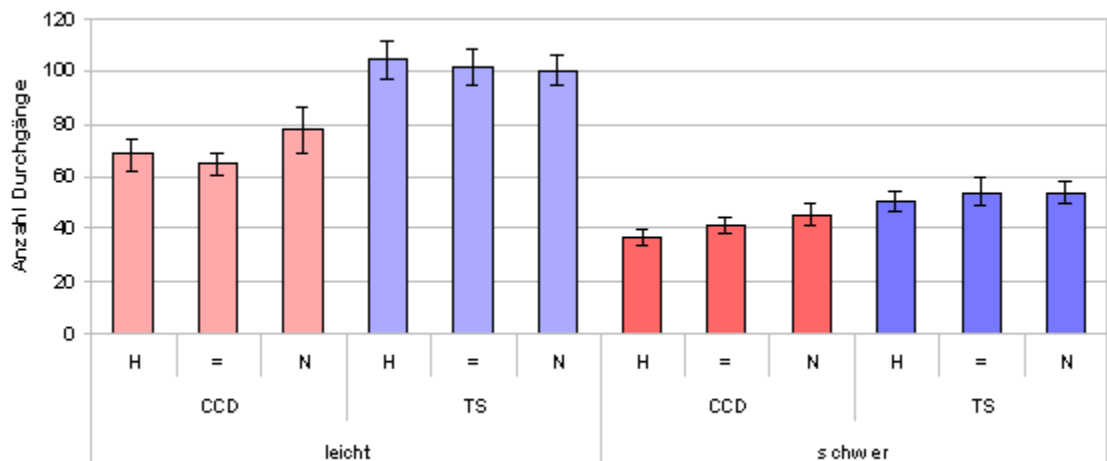


Abbildung 12.25: Leistung in der motorischen Zusatzaufgabe für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe *Mehrfachziele* in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

12.2.5.2 Leistung in der Zusatzaufgabe

Die motorische Leistung war abhängig von der differenzierten Wirkung von Bediengerät und Schwierigkeit: $F(1,10)=33.51$, $p<.001$, $\eta_p^2=.77$, $1 - \beta>.999$. Von den drei drei Faktoren übte nur die Priorisierung keinen signifikanten Einfluss auf die Leistung in der motorischen Zusatzaufgabe aus. Schwierigkeit: $F(1,10)=130.61$, $p<.001$, $\eta_p^2=.93$, $1 - \beta>.999$. Bediengerät: $F(1,10)=146.08$, $p<.001$, $\eta_p^2=.94$, $1 - \beta>.999$. Zwischen den Stufen der Priorisierung bestand kein signifikanter linearer Trend.

12.2.5.3 Workload

Die Schwierigkeit der Zusatzbedingungen unterschied sich signifikant: $F(1,10)=58.58$, $p<.001$, $\eta_p^2=.85$, $1 - \beta>.999$. Der Faktor Bediengerät übte einen signifikanten Einfluss auf die Workload aus: $F(1,10)=21.11$, $p=.001$, $\eta_p^2=.68$, $1 - \beta=.985$.

12 Ergebnisse

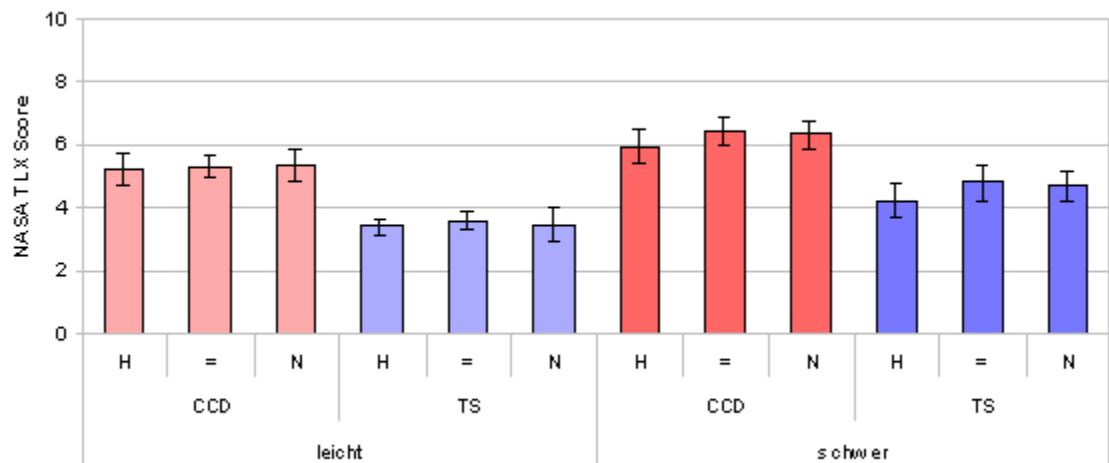


Abbildung 12.26: Workload-Werte des NASA-TLX für die Bearbeitung der Zeigaufgabe *Mehrfachziele* und der motorischen Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

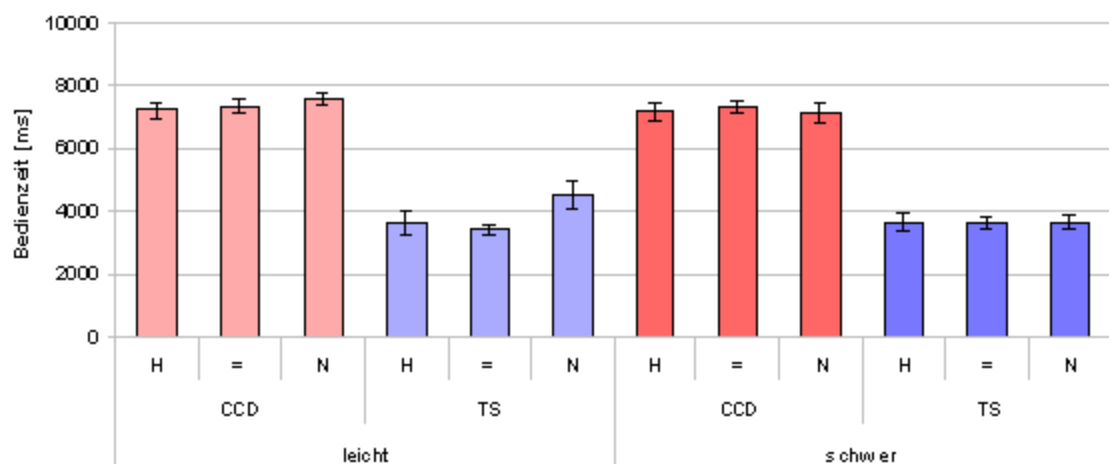


Abbildung 12.27: Bedienzeit für die Zeigaufgabe *Mehrfachziele* für die Bearbeitung der komplexen Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

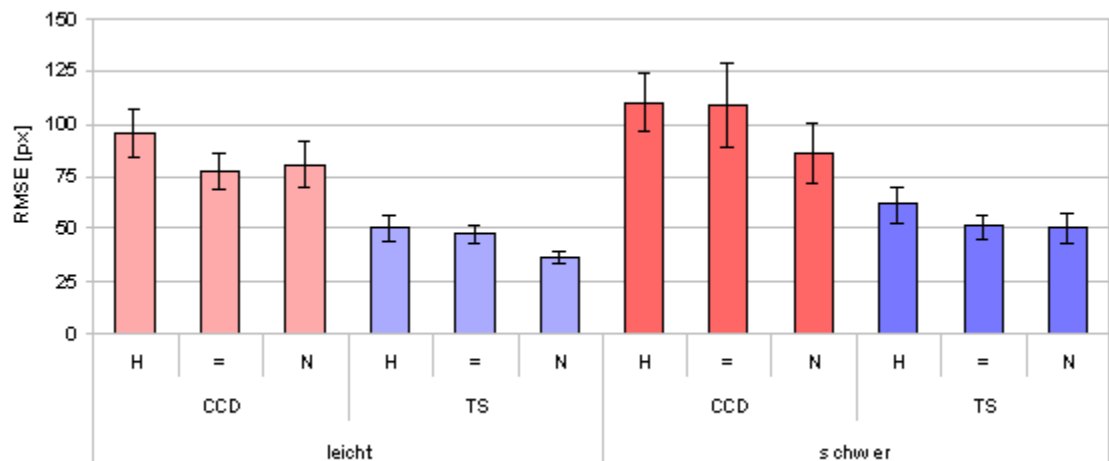


Abbildung 12.28: Leistung in der Trackingaufgabe für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe *Mehrfachziele* in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

12.2.6 Komplexe Aufgabe

12.2.6.1 Leistung in der Zeigeaufgabe

Der Einfluss der Priorisierungsstufen war abhängig von der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe: $F(2,20)=3.56$, $p=.048$, $\eta_p^2=.26$, $1 - \beta=.592$. Die Schwierigkeitsmanipulation der Zusatzaufgabe und die Priorisierung bewirkten keinen signifikanten Effekt auf die Leistung in der Zeigeaufgabe, im Gegensatz zur Art der Bedienung: $F(1,10)=222.51$, $p<.001$, $\eta_p^2=.96$, $1 - \beta>.999$.

12.2.6.2 Leistung in der Zusatzaufgabe

Tracking Bediengerät und Priorisierung übten einen signifikanten Einfluss auf die Trackingleistung aus: $F(1,10)=5.06$, $p=.048$, $\eta_p^2=.37$, $1 - \beta>.999$ bzw. $F(2,20)=5.47$, $p=.013$, $\eta_p^2=.35$, $1 - \beta=.789$. Es war ein linearer Trend innerhalb der Stufen des Faktors Priorisierung nachzuweisen: $F(1,10)=8.56$, $p=.015$, $\eta_p^2=.46$, $1 - \beta=.751$. Die Trackingleistung für die Übergewichtung der Zeigeaufgabe war signifikant niedriger als für die Betonung der Zusatzaufgabe.

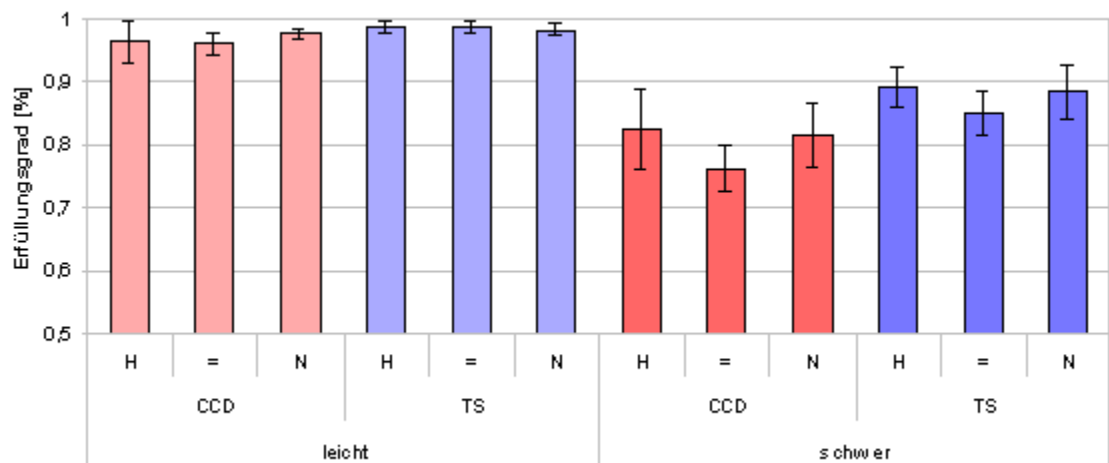


Abbildung 12.29: Leistung in der Readbackaufgabe für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe *Mehrfachziele* in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

Readback Der Einfluss der Schwierigkeitsmanipulation war abhängig vom verwendeten Bediengerät: $F(1,10)=5.22$, $p=.045$, $\eta_p^2=.34$, $1 - \beta=.541$. Es bestand ein signifikanter Unterschied in der Leistung zwischen der leichten und schweren Zusatzaufgabe: $F(1,10)=13.36$, $p=.004$, $\eta_p^2=.57$, $1 - \beta=.908$. Die Art der Bedienung übte einen signifikanten Einfluss auf die Readback-Leistung aus: $F(1,10)=12.20$, $p=.006$, $\eta_p^2=.55$, $1 - \beta=.882$. Die Priorisierung übte keinen signifikanten Einfluss auf die Leistung aus.

12.2.6.3 Workload

Die Schwierigkeit der Zusatzaufgabe und Bediengerät übten einen signifikanten Einfluss auf die Trackingleistung aus: $F(1,10)=12.99$, $p=.005$, $\eta_p^2=.57$, $1 - \beta=.900$ bzw. $F(1,10)=6.38$, $p=.030$, $\eta_p^2=.39$, $1 - \beta=.625$. Die Priorisierungsstufen wirkten sich nicht signifikant auf die Workload aus.

12.3 Übersicht über alle Effekte

Die Fülle der untersuchten Effekte macht es nicht leicht, den Überblick über die Ergebnisse der Varianzanalysen zu behalten. Abbildung 12.31 stellt die signifikanten

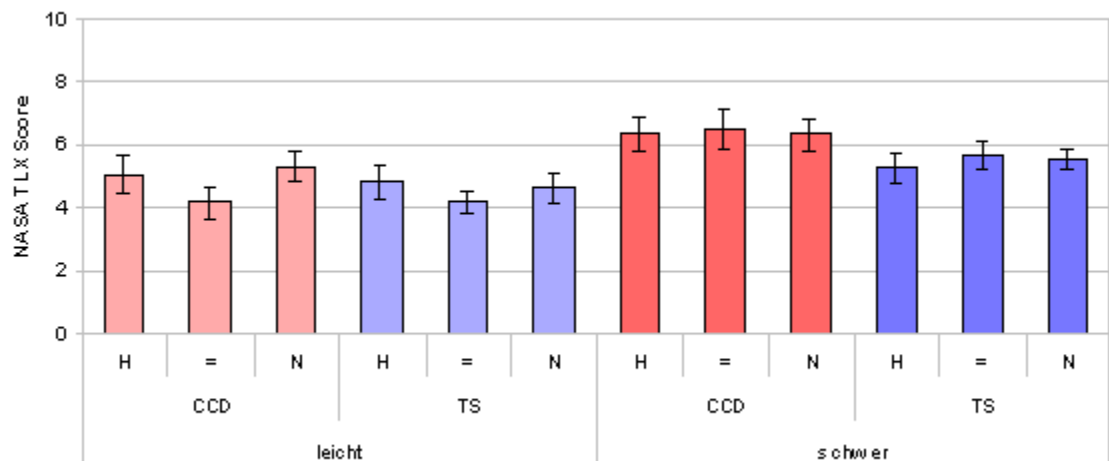


Abbildung 12.30: Workload-Werte des NASA-TLX für die Bearbeitung der Zeigaufgabe *Mehrfachziele* und der komplexen Zusatzaufgabe in Abhängigkeit von Bediengeräten, Priorisierung und Schwierigkeit der Zusatzaufgaben

Einflüsse für Einzel- und Mehrfachaufgabe gegliedert nach Art der Zusatzaufgabe und untersuchtem Kriterium dar. Die verschiedenen Farbschattierungen stehen für verschiedene Kategorien von Effektstärken des Maßes η_p^2 .

12.4 Qualitative Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse präsentiert, die vor allem helfen sollen, die statistischen Auswertungen der vorhergehenden Abschnitte einzuordnen und zu interpretieren. Diese Ergebnisse werden grafisch präsentiert.

12.4.1 Fehler in den Zeigaufgaben

Wie bereits angesprochen und wie auch in den Skaleneinteilungen zu erkennen ist, wurden in den Zeigaufgaben sehr wenig Fehler gemacht. Die relativ großen Standardfehler weisen auf eine trotzdem ausgeprägte interindividuelle Variabilität hin.

Einfachziele

Zusatzaufgabe	Kriterium	Bediengt.	Schwierigkt.	Priorisng.	lin. Trend	Bed. x Schw.	Schw. x Prio.	Bed. x Prio.
VIS	Zeige							
	Zusatz							
	Workload							
KOG	Zeige							
	Zusatz							
	Workload							
MOT	Zeige							
	Zusatz							
	Workload							
KOMP	Zeige							
	Tracking							
	Readback							
	Workload							

Mehrfachziele

VIS	Zeige							
	Zusatz							
	Workload							
KOG	Zeige							
	Zusatz							
	Workload							
MOT	Zeige							
	Zusatz							
	Workload							
KOMP	Zeige							
	Tracking							
	Readback							
	Workload							

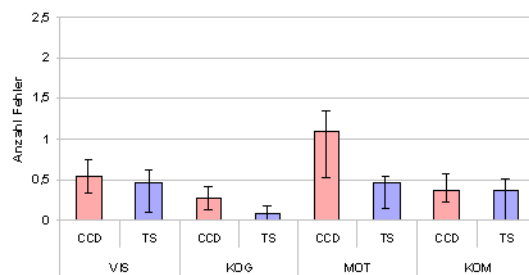
η_p^2

>.9
.8-.9
.7-.8
.6-.7
.5-.6
.4-.5
.3-.4
.2-.3

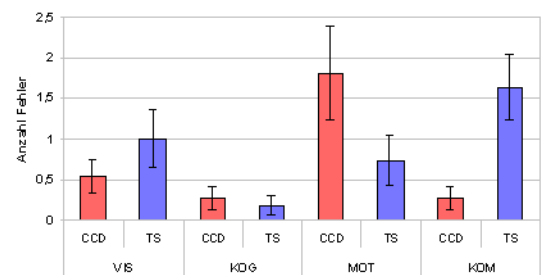
Abbildung 12.31: Übersicht über alle Effekte der varianzanalytischen Auswertung gegliedert nach Zeigeaufgabe, Zusatzaufgabe und Leistungskriterien. Die Farbschattierung deutet die Stärke des Effekts η_p^2 an.

Abbildung 12.32 zeigt die durchschnittliche Anzahl Fehler pro Versuchsdurchgang für die Bearbeitung der Einfach- und Mehrfachziele. Die Darstellung gliedert nach Art und Schwierigkeit der Zusatzaufgabe und Bediengerät.

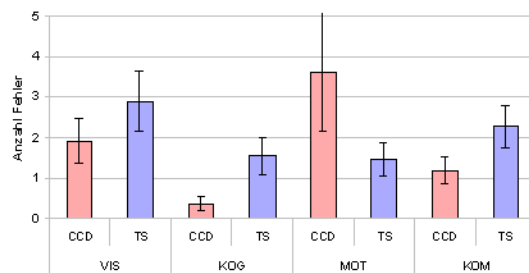
Weitere Darstellungen der Fehler bei der Zeigeaufgabe Einfach- und Mehrfachziele nach Art und Schwierigkeit der Zusatzaufgabe, Bediengerät und Priorisierung finden sich in Anhang D.



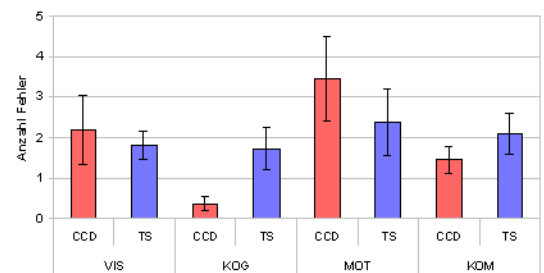
(a) Einfachziele, leichte Zusatzaufgabe



(b) Einfachziele, schwere Zusatzaufgabe



(c) Mehrfachziele, leichte Zusatzaufgabe



(d) Mehrfachziele, schwere Zusatzaufgabe

Abbildung 12.32: Fehler bei den Zeigaufgaben Einfach- und Mehrfachziele nach Bediengerät, Art und Schwierigkeit der Zusatzaufgabe

12.4.2 Performance Operating Characteristics - POCs

POCs sind grafische Hilfsmittel, um zu beurteilen, wie gut zwei verschiedene Aufgaben gleichzeitig bearbeitet werden können (vgl. dazu die Ausführungen in Abschnitt 7.3). Die verwendeten Leistungsmaße sind unterschiedlich gepolt. Ein Mehr des Kriteriums bedeutet nicht immer auch eine bessere Leistung in der Aufgabenbearbeitung. Um eine einheitliche Darstellung zu gewährleisten und um so alle POCs gleichsinnig interpretierbar zu machen, wurden die Kriterien, bei denen ein höherer Wert einem Leistungsmalus entspricht, transformiert. Das betrifft zum einen die Leistung in den Zeigeaufgaben, zum anderen die Leistung bei der kognitiven und der Tracking-Komponente der komplexen Zusatzaufgabe. Es wurde versucht, die Werte so zu transformieren, dass der vermittelte visuelle Eindruck möglichst den tatsächlichen Gegebenheiten entsprach.

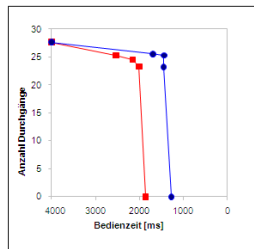
Zur Transformation der Leistungen L wurden folgende Vorschriften verwendet:

- Zeigeaufgabe Einfachziele: $L'_{einfach} = 4000 - L_{einfach}$
- Zeigeaufgabe Mehrfachziele: $L'_{mehrfach} = 8000 - L_{mehrfach}$
- Kognitive Zusatzaufgabe: $L'_{kog} = 2000 - L_{kog}$
- Trackingaufgabe: $L'_{track} = 70 - L_{track}$

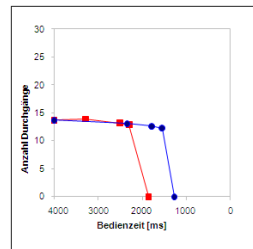
Durch diese Vereinheitlichung der Leistungskriterien, sind alle folgenden POC-Darstellungen einheitlich so zu interpretieren: Die Leistung des entlang der Abszisse dargestellten Kriteriums nimmt von links nach rechts zu. Die Leistung des entlang der Ordinate dargestellten Kriteriums nimmt von unten nach oben zu. In Kombination beider Maße nimmt die Leistung in der Zweifachaufgabensituation von links unten nach rechts oben zu.

Abbildung 12.33 zeigt alle POC-Kurven für alle Kombinationen von Zeigeaufgabe mit Einfachzielen und Zusatzaufgabe. Die Darstellung gliedert nach Schwierigkeit der Zusatzaufgabe und Bediengerät.

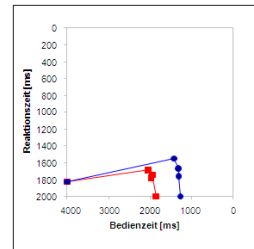
Abbildung 12.34 zeigt alle POC-Kurven für alle Kombinationen von Zeigeaufgabe mit Mehrfachzielen und Zusatzaufgabe. Die Darstellung gliedert nach Schwierigkeit der Zusatzaufgabe und Bediengerät.



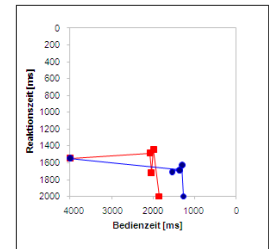
(a) Leicht visuell



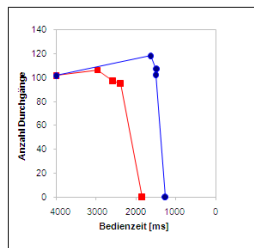
(b) Schwer visuell



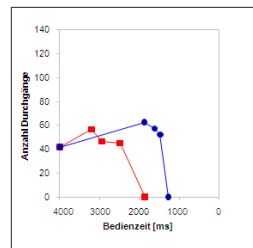
(c) Leicht kognitiv



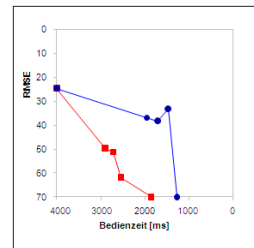
(d) Schwer kognitiv



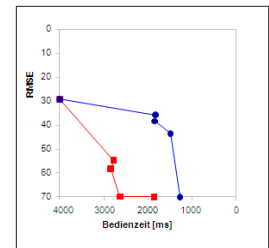
(e) Leicht motorisch



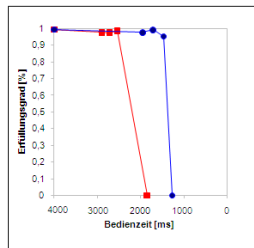
(f) Schwer motorisch



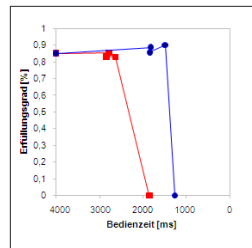
(g) Leicht Tracking



(h) Schwer Tracking

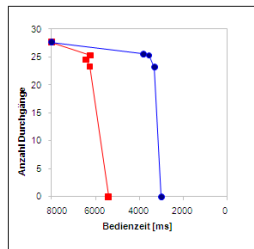


(i) Leicht Readback

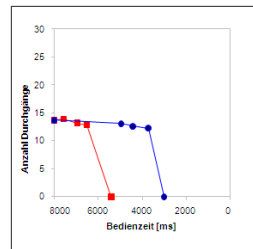


(j) Schwer Readback

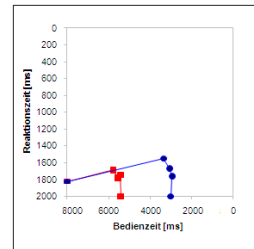
Abbildung 12.33: POCs für Einfachziele; in der Darstellung rot sind die Werte bei Verwendung des Trackballs, blau bei Verwendung des Touchscreens.



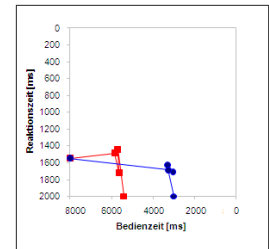
(a) Leicht visuell



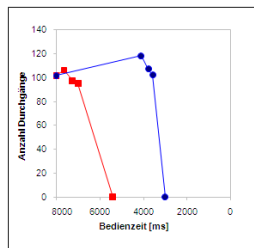
(b) Schwer visuell



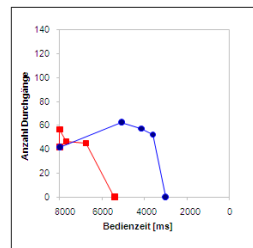
(c) Leicht kognitiv



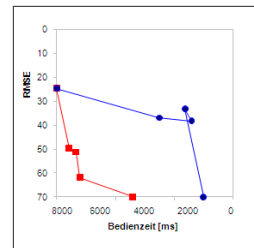
(d) Schwer kognitiv



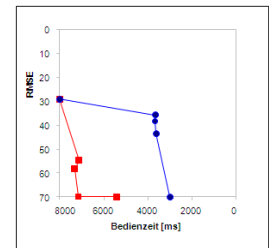
(e) Leicht motorisch



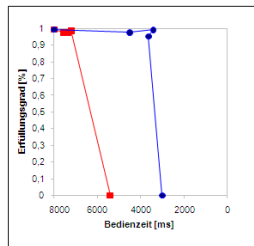
(f) Schwer motorisch



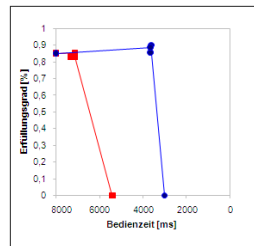
(g) Leicht Tracking



(h) Schwer Tracking



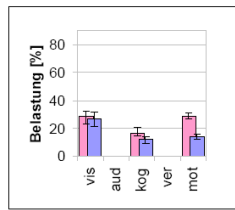
(i) Leicht Readback



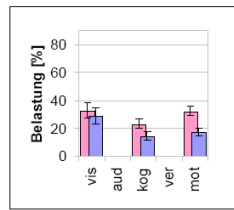
(j) Schwer Readback

Abbildung 12.34: POCs für Mehrfachziele; in der Darstellung rot sind die Werte bei Verwendung des Trackballs, blau bei Verwendung des Touchscreens.

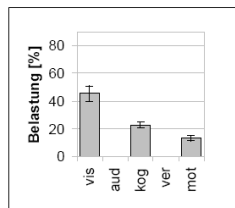
12 Ergebnisse



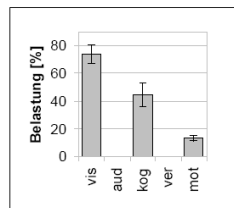
(a) Einfachziele



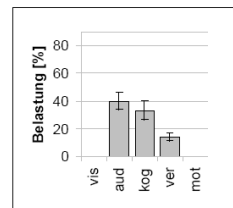
(b) Mehrfachziele



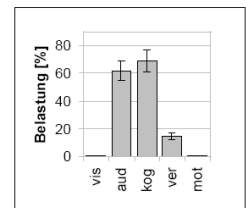
(c) Leicht visuell



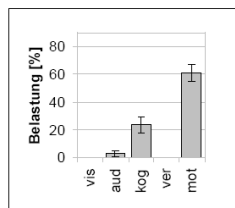
(d) Schwer visuell



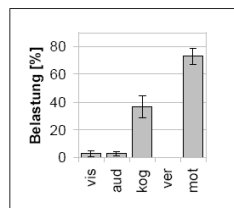
(e) Leicht kognitiv



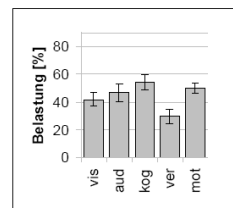
(f) Schwer kognitiv



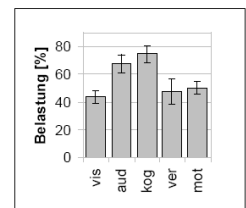
(g) Leicht motorisch



(h) Schwer motorisch



(i) Leicht komplex



(j) Schwer komplex

Abbildung 12.35: Workload-Profil für die einzelnen Aufgaben bei ausschließlicher Bearbeitung.

12.4.3 Workload-Profil

Abbildung 12.35 zeigt die Workload-Profile für die Bearbeitung einzelner Aufgaben ohne weitere Zeige- bzw. Zusatzaufgabe. Die Abbildungen 12.36 und 12.37 zeigen alle Profile für die Zweifachaufgaben-Szenarien bei der Bearbeitung der Einfach- und der Mehrfachziele. Um die Darstellung nicht zu überfrachten und übersichtlich zu halten, zeigen die Abbildungen nur die Profile für die Gleichgewichtung von Zeige- und Zusatzaufgabe.

12 Ergebnisse

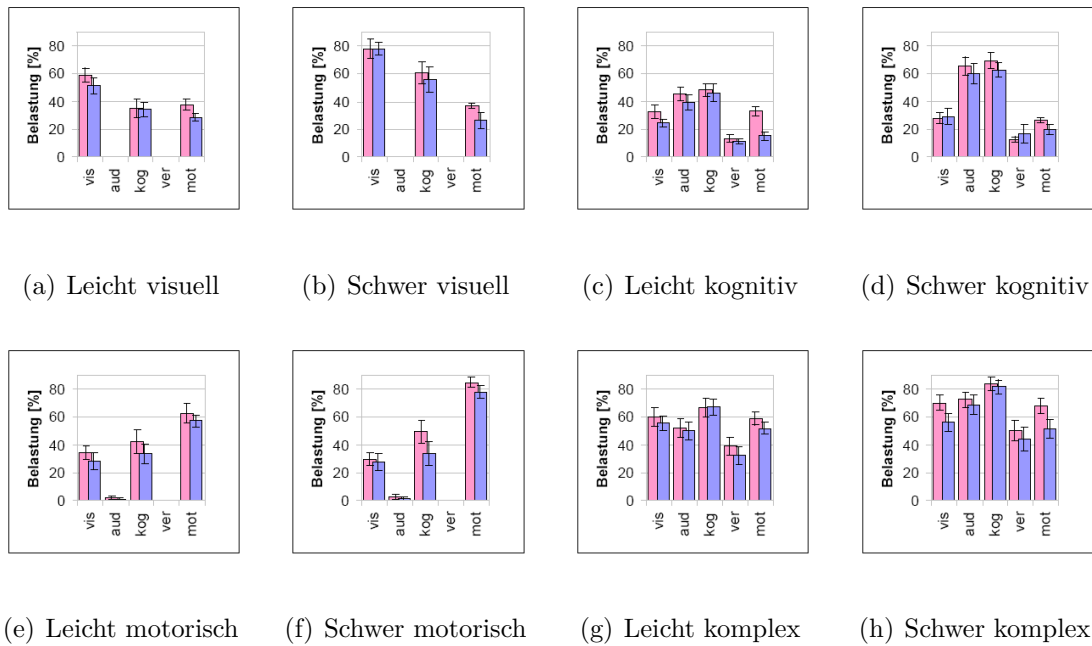


Abbildung 12.36: Workload-Profile für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe Einfachziele und der jeweiligen Zusatzaufgabe.

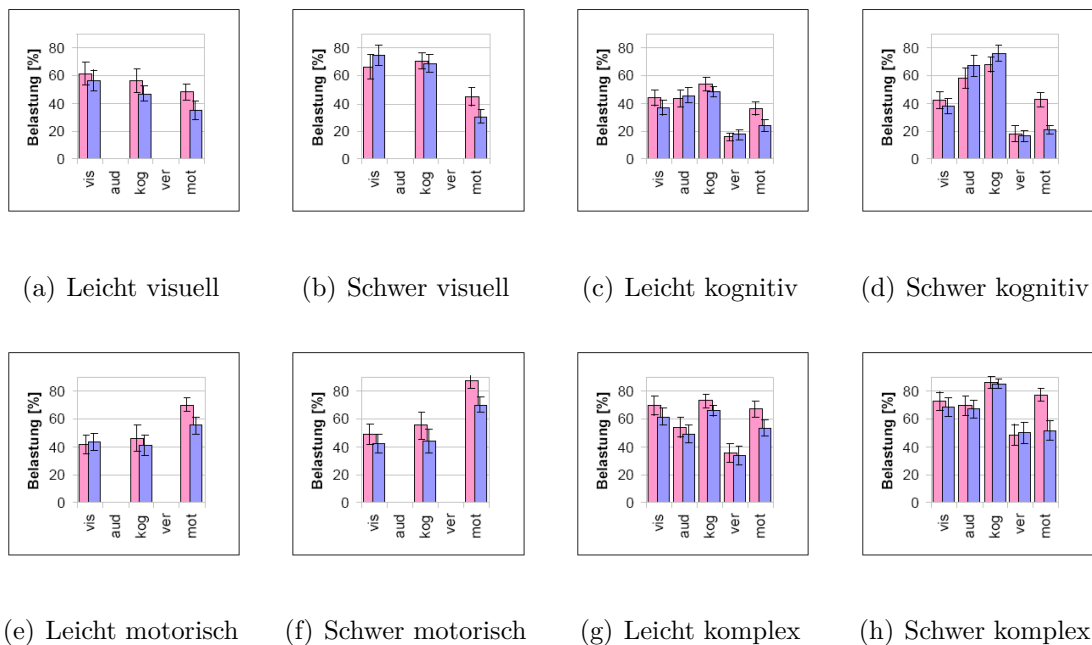


Abbildung 12.37: Workload-Profile für die Bearbeitung der Zeigeaufgabe Mehrfachziele und der jeweiligen Zusatzaufgabe.

13 Interpretation und Diskussion

Die folgenden Abschnitte interpretieren und diskutieren die Ergebnisse aus Abschnitt 12 und sind analog strukturiert. Sie geben Antwort auf die in Abschnitt 11.3 formulierten Fragen, die jeweils in Klammern angegeben werden. Zusätzlich wird das Evaluationskonzept bewertet und diskutiert. Es wird geprüft, inwieweit jede einzelne Zusatzaufgabe zur standardisierten und komplexen Kontextabbildung geeignet ist.

Die Analyse der Einflussstruktur, die durch das Evaluationskonzept festgelegt ist, liefert folgende Resultate.

Der Unterschied zwischen Touchscreen und Trackball bei der Bedienleistung ist abhängig von der Art der Zusatzaufgabe (4 a). Aufgaben mit motorischer Komponente scheinen eine besonders ausgeprägte Leistungsdifferenz zu Gunsten des Touchscreens zu induzieren. Diese differenzierte Wirkung des informatorischen Kontextes findet aber in der subjektiven Workload keine Entsprechung. Hier sind die Unterschiede zu Gunsten des Touchscreens unabhängig von der Qualität des Belastungskontextes (4 b).

Die beobachtete Interaktion zwischen Bediengerät und Zusatzaufgabe ist ordinal bezüglich beider Faktoren. Die Haupteffekte können daher ohne Einschränkungen interpretiert werden. Die Haupteffekte von Bediengerät, Schwierigkeit und Art der Zusatzaufgabe finden sich in der Leistungserhebung und der subjektiven Workload. Über alle Bedingungen weist der Touchscreen einen deutlichen Leistungsvorteil gegenüber dem Trackball auf, der zudem mit geringerer Workload einhergeht (1 a,b).

Die Zusatzaufgaben können erfolgreich in ihrer Schwierigkeit manipuliert werden. Dieser Effekt zeigt sich deutlich an den erhobenen Leistungs- und Workloadmaßen in der erwarteten Richtung (2 a,b).

Auch die Induzierung von informatorischer Zusatzbelastung zeigt einen starken Effekt in den Leistungs- und Workloadmaßen. Durch die Manipulation der Schwierig-

keit der Zusatzaufgaben können die erwarteten starken Effekt in Bedienleistung und Workload erreicht werden (3 a,b).

Diese statistische Bewertung aus Perspektive der Hauptaufgabe über alle Zusatzaufgaben hinweg liefert Ergebnisse, die es gestatten, die beobachteten Effekte auf Ebene der einzelnen Zusatzaufgaben detaillierter zu untersuchen.

13.1 Visuelle Zusatzbelastung

13.1.1 Einfachziele

Es besteht eine differenzierte Abhängigkeit der Priorisierung von der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe, die darauf hindeutet, dass die willkürliche Ressourcenverteilung für die schwere Zusatzaufgabe einen deutlicheren Einfluss auf die Zeigeleistung nimmt (8). Für beide Faktoren gilt, dass sich die Reihenfolge der Stufen des jeweils anderen Faktors nicht ändert. Bestehende Haupteffekte können also ohne Einschränkung interpretiert werden.

Für die Zeigeleistung ist die Priorisierung in beiden Schwierigkeitsstufen erfolgreich und folgt dem erwarteten Verlauf (7 a). Dieses Ergebnis wird durch die Leistung in der visuellen Suchaufgabe gespiegelt (7 b). Für die Workload ist die Interaktion Schwierigkeit \times Priorisierung disordinal auf dem Faktor Priorisierung. Die Interpretation der Priorisierung ist daher nur schwer möglich. Sie folgt nicht dem linearen Trend der Zeigeleistung (7 c). Es kann daher angenommen werden, dass für die visuelle Zusatzaufgabe die einzelnen Priorisierungsstufen nicht zu systematischen Verschiebungen der Workload führt.

Die Manipulation der Schwierigkeit erreicht den erwarteten Effekt, der sich in einer Verringerung der Aufgabenleistungen und einer Erhöhung der Workload zeigt (6 a,b,c). Die Erhöhung der Workload ist vorwiegend begründet in einer gestiegenen Beanspruchung der visuellen und kognitiven Komponente der Informationsverarbeitung, die motorische Komponente bleibt konstant (vgl. Abb. 12.36(a), 12.36(b), 12.37(a), 12.37(b)).

Ein Unterschied zwischen den Bediengeräten zu Gunsten des Touchscreens wird deutlich in der Zeigeleistung und der verbundenen Workload, nicht jedoch in der Leistung

bei der visuellen Suche (5 a,b,c). Zu erwähnen ist die leicht erhöhte Fehlerrate bei der Touchscreenbedienung unter schwerer Zusatzbelastung. Die Fehlerrate ist für beide Eingabevarianten allgemein sehr niedrig.

Die POC-Darstellungen in den Abbildungen 12.33(a) und 12.33(b) verdeutlichen und relativieren den Effekt der Priorisierung in den Leistungsmaßen. Demnach schlägt sich die Aufmerksamkeitsverschiebung vorwiegend in der Zeigeleistung und der Leistung in der leichten visuellen Zusatzaufgabe nieder. Für die schwere Zusatzbedingung besteht nahezu keine Variabilität in der Suchleistung. Gleichzeitig führt die Erhöhung der visuellen Zusatzbelastung zu einer Akzentuierung der Unterschiede zwischen Touchscreen und Trackball und zu deutlicheren Unterschieden in den Priorisierungsstufen hinsichtlich der Zeigeleistung, die auch für die Fehler in der Zeigeaufgabe markant werden. Die Leistungen bei beiden Aufgaben entsprechen bei leichter Zusatzbelastung dem klassischen Ressourcen-limitierten Verlauf (vgl. Abschnitt 6 und Norman & Bobrow, 1975). Unter schwerer Zusatzbelastung zeigt die Leistung der visuellen Zusatzaufgabe einen klassisch Daten-limitierten Verlauf, während die Ressourcen-Abhängigkeit der Zeigeleistung verstärkt wird.

Eine mögliche Erklärung für diese reduzierte Variabilität und die konstant hohe Leistung in der visuellen Suche über alle Priorisierungsstufen könnte darin bestehen, dass die Aufgabe zu einfach gestaltet ist. Die persönlichen Eindrücke der Versuchsleiter während der Durchführung, vor allem aber die Struktur der Workloadmaße, deuten jedoch in eine andere Richtung. Gegenüber der einfachen Zusatzaufgabe steigt die Workload stark an; insbesondere die visuelle und kognitive Beanspruchung. Die Piloten scheinen die Leistung in der visuellen Suchaufgabe unter erhöhter Workload abzusichern. Darauf weisen auch die ausgeprägten Kosten der Gleichzeitigkeit bei der Zeigeaufgabe hin (vgl. Abschnitt 7.3).

13.1.2 Mehrfachziele

Die Struktur der Ergebnisse für die Bearbeitung der Mehrfachaufgabe ist nahezu identisch mit der bei Bearbeitung der Einfachziele. Darstellungen der POCs finden sich in den Abbildungen 12.34(a) und 12.34(b). Die Ausführungen des vorhergehenden Abschnitts gelten entsprechend. Die leicht erhöhten visuellen kognitiven und motorischen Anforderungen der Zeigeaufgabe führen zudem offenbar zu einem deutlichen

Unterschied zwischen den Bediengeräten, der sich in der Leistung der Zusatzaufgabe niederschlägt.

13.1.3 Weitere Bewertung

Erwartungsgemäß ist die visuelle Suchaufgabe in der Lage, visuelle Zusatzbelastung zu erzeugen. Die Belastung ist nicht eindimensional, sondern enthält eine starke kognitive Komponente. Bei einer Steigerung der Aufgabenschwierigkeit ändert sich die Natur der Aufgabe. Das kann je nach Einsatzzweck der Aufgabe gewollt oder störend sein. Im Flugkontext ist das Entdecken visueller Ziele im Head-up Bereich eine wichtige und oft entscheidende Anforderung. Besonders unter gesteigerter Workload ist es für den Piloten wichtig, diese sich schnell und häufig ändernde Anzeige oft zu prüfen. Die visuelle Zusatzaufgabe scheint demnach diesen Aspekt valide abgebildet zu haben. Problematisch ist dieser Umstand allerdings, wenn die Variabilität der Suchleistung an sich interpretiert werden soll. Hierzu bindet dieser Aufgabentyp im untersuchten Kontext zu viele Aufmerksamkeitsressourcen. Zur Induzierung von visueller Beanspruchung und Erzeugung von Variabilität in den verwendeten Zeigeaufgaben ist sie jedoch sehr gut geeignet. Damit wird deutlich, dass auch eine hochgradig standardisierte Zusatzaufgabe starke Relevanz bezüglich diverser Kontextaspekte haben kann, die zu berücksichtigen sind, wie beispielsweise die differenzierte Wirkung von Positionierung und Art der Aufgabe. Eine Suche im Head-Down Bereich lässt erwarten, dass die beschriebenen Absicherungseffekte weniger stark auftreten.

In allen Bedingungen mit visueller Zusatzbelastung ist die Eingabeleistung mittels Touchscreen besser als die mit Hilfe des Trackballs. Dabei werden mit beiden Bediengeräten wenig Fehler gemacht. Die Workload bei der Touchscreenbedienung ist konstant niedriger als bei der Verwendung des Trackballs. Die ausgeprägtere kognitive Komponente für den Trackball liefert hier einen Erklärungsansatz.

Das Workload-Profil der visuellen Zusatzaufgabe weist eine dominierende visuelle, aber auch eine deutliche kognitive Komponente auf. Für die Interpretation der Zusatzbelastung kann dieser Umstand wichtig sein; besonders wenn eine gleichzeitig auszuführende Aufgabe höhere kognitive Anforderungen stellt, wie sie beispielsweise zur Aufrechterhaltung des situativen Verständnisses in simulierten Szenarien zu erwarten sind.

13.2 Kognitive Zusatzbelastung

13.2.1 Einfachziele

Einflüsse im Zusammenhang mit der kognitiven Zusatzbelastung können nur in sehr beschränktem Umfang nachgewiesen werden. So zeigt sich weder für die Zeigeleistung noch für die Bearbeitungszeit der Sternberg-Aufgabe ein Effekt der Manipulation von Schwierigkeit oder Priorisierung (6 a,b; 7 a,b). Allein die Art der Bedienung weist den erwartet deutlichen Effekt bei der Bearbeitung der Zeigeleistung auf (5 a); dieser Effekt bleibt auf die Zeigaufgabe beschränkt (5 b,c). Obwohl die Steigerung der Aufgabenschwierigkeit keine Leistungsänderungen bewirkt, führt sie zu einer erhöhten Workload (6 c). Die Workload-Profile zeigen Anstiege in der auditiven und kognitiven Komponente der informatorischen Beanspruchung, die diese Erhöhung erklären können. Die Ausprägungen der anderen Komponenten bleiben konstant. Ebenso wie bei visueller wird auch bei kognitiver Zusatzbelastung die Workload nicht durch die modifizierten Aufmerksamkeitsschwerpunkte verzerrt (7 c). Es zeigen sich keine differenzierten Einflüsse der Faktoren (8). Die Anzahl der bei der Zeigaufgabe gemachten Fehler ist für die kognitive Zusatzbelastung über alle Bedingungen hinweg sehr gering. Die POC-Darstellungen in den Abbildungen 12.33(c) und 12.33(d) zeigen ein heterogenes Interferenzmuster. Es existiert zwar eine gewisse Variabilität in den Werten; besonders für die schwere Zusatzbelastung scheint die Leistung in der Sternbergaufgabe aber nicht systematisch von der Priorisierung abzuhängen. Diese Abhängigkeit zeigt sich in der leichten Bedingung noch in Ansätzen. Für die leichte Bedingung ist zudem noch ein besonderes Phänomen zu beobachten: Die gleichzeitige Ausführung von Sternberg- und Zeigaufgabe führt zu einer ausgeprägteren Leistungssteigerung gegenüber der ausschließlichen Bearbeitung der kognitiven Aufgabe. Die Kosten werden damit zu Gewinnen der Gleichzeitigkeit. Die Zeigeleistung ist durch die gleichzeitige Bearbeitung der Sternbergaufgabe fast nicht beeinträchtigt. Sie ist für die kognitive Zusatzaufgabe höher als für alle anderen Zusatzaufgaben.

13.2.2 Mehrfachziele

Die Ergebnisstruktur für die Bearbeitung der Mehrfachziele zeigt ein anderes Bild als für die Einfachziele. Auch hier findet sich zwar ein starker Einfluss des Bediengeräts

auf die Zeigeleistung (5 a), der sich aber auch in einer erhöhten Workload niederschlägt (5 c). Ein Unterschied in der Bearbeitungszeit der Zusatzaufgabe zeigt sich nicht (5 b). Hinsichtlich der Zeigeleistung lassen sich auch die Einflüsse der Manipulation von Schwierigkeit und Priorisierung nachweisen (6 a; 7 a), die für die Zusatzleistung nur für die Schwierigkeitsveränderung zu identifizieren sind (6 b; 7 b). Der Einfluss der Priorisierung ist von der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe abhängig (8). Hier stellt sich ein Leistungsvorteil für die Gleichgewichtung der beiden Aufgabenteile bei steigender Schwierigkeit heraus. Subjektiv erzeugt die Manipulation der Aufgabenschwierigkeit eine deutlich erhöhte Workload (6 c), aber keine Sensitivität für die Priorisierung (7 c).

Abbildungen 12.34(c) und 12.34(d) zeigen fast identische POC-Verläufe wie bei der Bearbeitung der Einfachziele. Auch hier scheint besonders für die schwere Zusatzbelastung die Leistung in der Sternbergaufgabe nicht systematisch von der Priorisierung abzuhängen, in der leichten Zusatzbedingung jedoch in Ansätzen. Es ist ebenfalls ein Gewinn der Gleichzeitigkeit zu beobachten, der zu einer besseren Leistung der Sternbergaufgabe in Kombination mit der Zeigeaufgabe, verglichen mit der Einzelleistung, führt. Die zusätzliche Bearbeitung der Sternbergaufgabe beeinträchtigt die Zeigeleistung nicht.

13.2.3 Weitere Bewertung

Es gelingt mit der Manipulation der Schwierigkeit der kognitiven Nebenaufgabe, die subjektiv empfundene Workload zu beeinflussen. Die Unterschiede in den Schwierigkeitsstufen sind aber nur in der anspruchsvolleren Bedingung mit Mehrfachzielen ausreichend, um auch in den Leistungsmaßen differenzieren zu können. Vor allem in den Reaktionszeiten der Sternbergaufgabe kann das der hohen Variabilität der Ergebnisse geschuldet sein. Diese ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der Versuchsleiter auf die Aussagen der Teilnehmer manuell reagiert und damit eine weitere Varianzquelle in den Erhebungsprozess einführt. Eine automatische Erhebung der Reaktionen ist daher eindeutig für zukünftige Einsätze vorzuziehen, auch wenn damit der Versuchsaufwand steigt.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass zum einen der Unterschied zwischen der leichten und schweren Bedingung zu gering ist, um zu Leistungsunterschieden zu führen. Zum anderen scheint die Aufgabe generell zu einfach zu sein, um zu Interferenzen

bei der gleichzeitigen Bearbeitung von einfachen Zeigeaufgaben zu führen. Für die etwas anspruchsvollere Zeigeaufgabe mit dynamischen Mehrfachzielen ändert sich diese Interferenzneigung bereits. Es ist daher zu erwarten, dass für kognitiv forderndere Aufgaben mehr störende Einflüsse zu beobachten sind.

Für den weiteren Einsatz im Rahmen von Untersuchungen zum Situationsbewusstsein ist davon auszugehen, dass die Sternbergaufgabe mit leichten Modifikationen eingesetzt werden kann. Dazu sollte eine Möglichkeit gesucht werden, den Unterschied zwischen leichter und schwerer Variante zu verstärken, indem der Schwierigkeitsgrad der schweren Bedingung erhöht wird. Das kann geschehen, indem zusätzlich zu oder anstatt Ziffern Buchstaben in die Liste der zu Erinnernden Items mit aufgenommen werden. Eine reine Verlängerung der Liste bringt durch die Beschränkung der Grundmenge keine Vorteile.

Die Abbildungen 12.35(e) und 12.35(f) weisen darauf hin, dass eine möglichst eindimensionale kognitive informatorische Beanspruchung nicht erreicht werden kann. Zwar ist für eine kognitive Verarbeitung immer eine auditive oder verbale Informationsaufnahme erforderlich. Die auditive Beanspruchung wird aber als gleichrangig empfunden. Zudem bewegen sich die Ausprägungen der kognitiven Beanspruchungen für die leichte und schwere Bedingung etwa im Rahmen der kognitiven Beanspruchung für die visuelle und motorische Zusatzaufgabe. Um den in Abschnitt 8.4 beschriebenen Anforderungen an eine Zusatzaufgabe gerecht zu werden, sollte die Aufgabe modifiziert werden; der auditive Input sollte reduziert und die kognitiven Anforderungen sollten erhöht werden.

Die kognitive Belastung wird zwar subjektiv wahrgenommen, führt aber nicht zu Leistungseinbußen bei der Bearbeitung der Aufgaben. Der Geschwindigkeitsvorteil des Touchscreens gegenüber dem Trackball bleibt daher auch unter leichter wie auch unter schwerer kognitiver Zusatzbelastung bestehen. Dieses Fehlen der gegenseitigen Beeinflussung der beiden Aufgaben lässt sich auch im Rahmen der von Wickens formulierten Mehrfachressourcentheorie erklären (vgl. Abschnitt 6.1.2). Die Aufgaben stimmen nur wenig in den relevanten Dimensionen überein. Die Informationsaufnahme der Zeigeaufgabe erfolgt visuell, die der kognitiven Zusatzaufgabe auditiv. Die Zeigehandlung wird motorisch ausgeführt, die positive oder negative Bestätigung der Sternbergaufgabe wird verbal abgegeben. Die kognitiven Anforderungen sind für Zeige- und kognitive

Zusatzaufgabe gering. Die Zweifachaufgabensituation führt daher zu keinen Interferenzen in den Aufgabenleistungen.

13.3 Motorische Zusatzbelastung

13.3.1 Einfachziele

Die leichte differenzierte Abhängigkeit der Priorisierung vom Bediengerät führt zu einem überproportional steigenden Unterschied in der Bedienzeit für den Trackball bei Übergewichtung der Zusatzaufgabe (8). Die Haupteffekte sind eindeutig zu interpretieren. Hier finden sich für die Leistungsmaße der Zeige- und der motorischen Aufgabe deutliche Einflüsse durch die Variation von Bediengerät (5 a,b), Schwierigkeit (6 a,b) und Priorisierung (7 a,b). Auch für die Workload führt die Verwendung von Touchscreen statt Trackball zu deutlich geringeren Werten (5 c). Die TLX-Werte sind sensibel gegenüber der Schwierigkeitsmanipulation (6 c). Erwartungsgemäß besteht kein Unterschied zwischen den Priorisierungsstufen (7 c). Die Erhöhung der Workload scheint begründet in einer stark ansteigenden motorischen Belastung bei Verwendung von Touchscreen gegenüber Trackball (vgl. Abb. 12.35(b)) und leichter gegenüber schwieriger Zusatzbelastung (vgl. Abb. 12.35(g) und 12.35(h)), die in der Handlungsausführung der Zweifachaufgabensituation zu erhöhter motorischer Beanspruchung führen (vgl. Abb. 12.36(e) und 12.36(f)).

Hinsichtlich der Fehlerrate lässt sich beobachten, dass im Vergleich mit den anderen Zusatzaufgaben die motorische Zusatzbelastung zu einem deutlichen Nachteil des Trackballs gegenüber dem Touchscreen führt. Die zudem besonders im motorischen Bereich gesteigerte Workload scheint die Leistung in Zeige- und Zusatzaufgabe nicht mehr absichern zu können. Das Resultat sind mehr Fehler bei Bedienung mit dem Trackball.

Im Vergleich zu den anderen standardisierten Zusatzaufgaben ist die Workload bei motorischer Belastung relativ hoch. Die Workload-Profile in den Abbildungen 12.36(e) und 12.36(f) weisen darauf hin, dass nicht eine gleichmäßig hohe informatorische Belastung über alle Dimensionen, sondern eine relativ singuläre, starke motorische Belastung dafür verantwortlich ist.

Die POC-Darstellungen in den Abbildungen 12.33(e) und 12.33(f) zeigen einen relativ deutlichen Trade-off zwischen den Ressourcen der Zeige- und Zusatzaufgabe in allen Bedingungen mit Trackball und in der schweren Zusatzbedingung mit Touchscreen. In der leichten Bedingung ist die motorische Zusatzaufgabe nicht schwer genug, um zu Interferenzen mit der Zeigeaufgabe zu führen. Für die Touchscreenbedingungen in der leichten und schweren Ausprägung zeigt sich ähnlich wie bei der kognitiven Aufgabe ein Leistungsgewinn durch die Zweifachaufgabensituation im Vergleich zur ausschließlichen Bearbeitung der motorischen Aufgabe. Auch das weist auf eine verminderte Aufgabenschwierigkeit der Zusatzaufgabe hin, die aber durch das Bediengerät vermittelt wird.

13.3.2 Mehrfachziele

Alle untersuchten Faktoren zeigen den erwarteten Einfluss auf die Bedienleistung in der Zeigeaufgabe. Die Bedienung über Touchscreen erfolgt schneller als über Trackball (5 a), die schwierige motorische Zusatzaufgabe vermindert die Leistung im Vergleich zur leichteren Variante (6 a), und die Bedienzeit nimmt mit steigenden Aufmerksamkeitsressourcen zu (7 a). Auch die Leistung in der Zusatzaufgabe bildet diesen Unterschied für die unterschiedlichen Bediengeräte und Schwierigkeiten ab (5 b; 6 b), zeigt jedoch keine spezifische Sensitivität gegenüber der Zuweisung der Aufmerksamkeitsressourcen (7 b). Analog zu den Ergebnissen bei Bearbeitung der Einfachziele zeigen sich die Workload-Werte sensibel gegenüber der Schwierigkeitsmanipulation (6 c). Es besteht erwartungsgemäß kein Unterschied zwischen den Priorisierungsstufen (7 c). Die Erhöhung der Workload scheint begründet in einer stark ansteigenden motorischen Belastung von Touchscreen gegenüber Trackball (vgl. Abb. 12.35(b)) und leichter gegenüber schwieriger Zusatzaufgabe (vgl. Abb. 12.35(g) und 12.35(h)), die in der Handlungsausführung der Zweifachaufgabensituation zu erhöhter motorischer Beanspruchung führen (vgl. Abb. 12.37(e) und 12.37(f)).

Die motorische Zusatzbelastung bewirkt eine vergleichsweise hohe Fehlerrate bei Verwendung des Trackballs. Die erhöhte Workload besonders in der motorischen Komponente der Handlungsausführung lässt eine Leistungsabsicherung in Zeige- und Zusatzaufgabe nicht mehr zu und führt dadurch zu mehr Fehlern. Generell ist die Workload im Vergleich zu den anderen standardisierten Zusatzaufgaben relativ hoch, obwohl

die Summe der Belastungen über die einzelnen Informationsverarbeitungskomponenten niedrig ist. Die Workload-Profile in den Abbildungen 12.37(e) und 12.37(f)) weisen darauf hin, dass nicht eine gleichmäßig hohe informatorische Belastung über alle Dimensionen, sondern eine relativ eindimensionale, starke motorische Belastung dafür verantwortlich ist.

Ähnlich wie bei der Bearbeitung der Einfachziele zeigen die POC-Darstellungen in den Abbildungen 12.34(e) und 12.34(f) einen relativ deutlichen Trade-off zwischen den Ressourcen der Zeige- und Zusatzaufgabe in allen Bedingungen mit Trackball und in der schweren Zusatzbedingung mit Touchscreen. In der leichten Bedingung ist die motorische Zusatzaufgabe nicht schwer genug, um zu Interferenzen mit der Zeigeaufgabe zu führen. Für die Touchscreenbedingungen in der leichten und schweren Ausprägung zeigt sich ähnlich wie bei der kognitiven Aufgabe ein Leistungsgewinn durch die Zweifachaufgabensituation im Vergleich zur ausschließlichen Bearbeitung der motorischen Aufgabe. Auch das weist auf eine verminderte Aufgabenschwierigkeit der Zusatzaufgabe hin, die aber durch das Bediengerät vermittelt wird.

13.3.3 Weitere Bewertung

Durch die Vermeidung von visuellem Feedback bei der Bearbeitung gelingt es durch die Zusatzaufgabe sehr gut, vor allem motorische Beanspruchung zu erzeugen. Überraschend ist der doch relativ hohe Anteil kognitiver Beanspruchung, den die Workload-Profile dokumentieren (vgl. 12.35(g) und 12.35(h)). Da auch bei der visuellen Zusatzaufgabe ein entsprechender kognitiver Anteil zu finden ist, kann vermutet werden, dass für dieses Phänomen eine gepaarte Belastung der Informationsaufnahme mit gleichzeitig beginnender kognitiver Verarbeitung verantwortlich ist. Demnach entspricht der visuellen hier die taktile Informationsaufnahme, die allerdings nicht explizit im Workload-Profil berücksichtigt ist.

Die Manipulation der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe schlägt sich in der Aufgabenleistung und der Workload nieder. In Kombination mit der erfolgreichen unterschiedlichen Priorisierung von Zeige- und Zusatzaufgabe ist die verwendete motorische Zusatzaufgabe hinsichtlich der Zeigeleistung ein geeigneter motorischer Belastungsfaktor.

Sowohl bei Bearbeitung der Einfach- als auch bei Bearbeitung der Mehrfachziele zeigt sich ein deutlicher Geschwindigkeitsvorteil des Touchscreens gegenüber dem Trackball.

Auch die Leistung in der motorischen Aufgabe und die erhobenen Workload-Werte zeigen deutliche Vorteile des Touchscreens unter motorischer Zusatzbelastung in allen Bedingungen.

13.4 Realitätskonforme Zusatzbelastung

13.4.1 Einfachziele

Die Leistung in der Zeigeaufgabe ist besser, wenn statt des Trackballs der Touchscreen verwendet wird (5 a). Auch die Verteilung der Aufmerksamkeitsressourcen führt zu den erwarteten Unterschieden zwischen den Priorisierungsstufen, die einem linearen Trend folgen (7 a). Die Manipulation der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe bleibt ohne Einfluss auf die Zeigeleistung (6 a).

In der Tracking-Komponente der komplexen Zusatzaufgabe bewirkt die gesteigerte Schwierigkeit eine deutlichere Zielabweichung (6 b). Die gleichzeitige Touchscreenbedienung erweist sich als vorteilhafter als die Bearbeitung der Zeigeaufgabe mit dem Trackball (5 b). Die Interaktion Bediengerät \times Priorisierung ist ordinal für die unterschiedlichen Priorisierungsstufen und der Einfluss des Faktors Bediengerät daher eindeutig zu interpretieren (8).

Diesen Vorteil eines Bediengeräts dokumentiert die Leistung in der Readback-Komponente nicht (5 b). Der Unterschied zwischen den Schwierigkeitsstufen ist aber auch hier deutlich ausgeprägt (6 b).

Wie in den anderen Zusatzbedingungen reagiert auch hier die subjektive Workload sensibel auf die Art des Bediengeräts und die Manipulation der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe (7 a,b), nicht aber auf die differenzierte Zuweisung von Aufmerksamkeitsressourcen (7 c).

Trotz hoher interindividueller Streuung scheint der Touchscreen gegenüber dem Trackball durchgehend mehr Fehler bei der Bearbeitung der Zeigeaufgabe zu erzeugen. Dieser Effekt relativiert sich allerdings stark, wenn die Fehlerraten über alle Priorisierungsstufen betrachtet werden (vgl. Abb. D.1). Die Fehlerrate erhöht sich nicht bei einer Steigerung der Schwierigkeit der Zusatzaufgaben.

Die Workload bei der komplexen Zusatzaufgabe ist höher als bei den standardisierten Zusatzaufgaben. Das über alle Dimensionen stark ausgeprägte Workload-Profil liefert einen Erklärungsansatz. Alle Aspekte der Informationsverarbeitung werden beansprucht. Besonders aber die visuelle, kognitive und motorische Komponente weisen Belastungsschwerpunkte auf. Speziell bei Verwendung des Trackballs steigt die motorische Beanspruchung gegenüber der Touchscreenbedienung deutlich an, wobei die anderen Dimensionen in etwa auf vergleichbarem Niveau bleiben. Die gesteigerte Workload bei Trackball gegenüber dem Touchscreen kann sich daher auf eine vergleichsweise höher beanspruchte motorische Handlungsausführung zurückführen lassen.

Die POC-Darstellungen in den Abbildungen 12.33(g), 12.33(h), 12.33(i) und 12.33(j) zeigen deutliche Leistungsvorteile des Touchscreens gegenüber dem Trackball in der Zweifachaufgabensituation sowohl für die Tracking- als auch für die Readback-Komponente. Die Touchscreenbedienung scheint weniger Interferenzen zwischen den Aufgaben zu erzeugen als der Trackball. Dabei ist für die Tracking-Komponente ein deutlicher Trade-off zwischen den Teilaufgaben zu erkennen, der sich aber auf die Verwendung des Trackballs beschränkt. Besonders in der leichten Variante scheint die Readback-Komponente die Zeigeleistung nur minimal zu beeinflussen. Es zeigen sich Aufgabenleistungen, die sich alle auf einem Niveau befinden. Zusammen mit der erfolgreichen Priorisierung hinsichtlich der Zeigeaufgabe ist das ein Indiz dafür, dass diese Variante der Readbackaufgabe auch mit nur geringen Ressourcen fast perfekt gelöst werden kann und damit zu leicht ist. Diese Interpretation relativiert allerdings eine massive kognitive Beanspruchung, wie sie das Workload-Profil zeigt.

13.4.2 Mehrfachziele

Bei Verwendung des Trackballs statt des Touchscreens steigen die Bedienzeiten in der Zeigeaufgabe (5 a). Die Manipulation der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe bleibt ohne Einfluss auf die Zeigeleistung (6 a). Auch die Verteilung der Aufmerksamkeitsressourcen führt nicht zu Unterschieden zwischen den Priorisierungsstufen (7 a). Eine differenzierte Abhängigkeit von Schwierigkeits- und Priorisierungsstufen ist auf eine deutliche Leistungseinbuße bei der leichten Zusatzbedingung und der Priorisierung der Nebenaufgabe zurückzuführen (8).

Die gleichzeitige Touchscreenbedienung führt zu geringeren Abweichungen in der Tracking-Komponente der komplexen Zusatzaufgabe als die Bearbeitung der Zeigaufgabe mit dem Trackball (5 b). Die gesteigerte Schwierigkeit bewirkt hingegen keine unterschiedliche Zielabweichung (6 b). Die Trackingleistungen in den Priorisierungsstufen unterscheiden sich und folgen dem erwarteten Verlauf (7 b).

Den Vorteil des Touchscreens gegenüber dem Trackball dokumentiert auch die Leistung in der Readback-Komponente (5 b). Hier ist auch der Unterschied zwischen den Schwierigkeitsstufen deutlich ausgeprägt (6 b). Die Leistung in der Readback-Aufgabe weist eine differenzierte Abhängigkeit von Bediengerät und Schwierigkeit auf. Die Unterschiede zwischen Touchscreen und Trackball nehmen mit steigender Schwierigkeit zu (8). Da die Interaktion ordinal ist, können die beteiligten Haupteffekte eindeutig interpretiert werden.

Die subjektive Workload ist abhängig von der Art des Bediengeräts und der Manipulation der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe (7 a,b), nicht aber von der differenzierte Zuweisung von Aufmerksamkeitsressourcen (7 c).

Wie bei der Bearbeitung der Einfachziele scheint der Touchscreen gegenüber dem Trackball durchgehend mehr Fehler bei der Bearbeitung der Zeigaufgabe zu erzeugen. Dieser Effekt relativiert sich auch hier stark, wenn die Fehlerraten über alle Priorisierungsstufen betrachtet werden (vgl. Abb. D.1). Die Fehlerrate erhöht sich nicht bei einer Steigerung der Schwierigkeit der Zusatzaufgaben.

Auch für die Bearbeitung der Mehrfachziele ist die Workload bei der komplexen Zusatzaufgabe höher als bei den standardisierten Zusatzaufgaben, wofür das Workload-Profil einen Erklärungsansatz liefert. Alle Aspekte der Informationsverarbeitung sind stark ausgeprägt. Wieder werden die visuelle, kognitive und motorische Komponente besonders beansprucht. Speziell bei Verwendung des Trackballs steigt die motorische Beanspruchung gegenüber der Touchscreenbedienung deutlich an, wobei die anderen Dimensionen in etwa auf gleichem Niveau bleiben. Die gesteigerte Workload bei der Verwendung des Trackballs gegenüber dem Touchscreen kann sich daher auch für diese Aufgabe auf eine vergleichsweise höher beanspruchte motorische Handlungskomponente zurückführen lassen.

Ganz ähnlich den POC-Darstellungen für die Einfachziele zeigen die Abbildungen 12.34(g), 12.34(h), 12.34(i) und 12.34(j) deutliche Leistungsvorteile des Touch-

screens gegenüber dem Trackball in der Zweifachaufgabensituation sowohl für die Tracking- als auch für die Readback-Komponente. Die Touchscreenbedienung scheint weniger Interferenzen zwischen den Aufgaben zu erzeugen als der Trackball. Dabei ist für die Tracking-Komponente ein deutlicher Trade-off zwischen den Teilaufgaben zu erkennen, der sich aber auf die Verwendung des Trackballs beschränkt. Besonders in der leichten Variante scheint die Readback-Komponente die Zeigeleistung nur minimal zu beeinflussen. Die Aufgabenleistungen für die Priorisierungsstufen sind beinahe identisch. Da für die Zeigeaufgabe die Priorisierung keinen Einfluss auf die Leistung nimmt, kann nicht darauf geschlossen werden, dass die Readbackaufgabe auch bei den Mehrfachzielen mit minimalen Ressourcen erfolgreich bearbeitet werden kann.

13.4.3 Weitere Bewertung

Im Gegensatz zu den standardisierten Zusatzaufgaben sollte die komplexe Aufgabe das in der informatorischen Beanspruchungsanalyse festgelegte Profil in zwei Schwierigkeitsstufen abbilden. Dieses Profil legt Schwerpunkte für die visuelle, kognitive und motorische Belastungsdimension fest, begleitet von mäßiger verbaler und auditiver Belastung. Obwohl die visuelle Dimension etwas hinter der Vorgabe zurück bleibt, legen die Abbildungen 12.35(i) und 12.35(j) nahe, dass diese Belastungsvorgabe in Grundzügen erreicht werden kann.

Interessant ist der Vergleich zwischen den beiden Schwierigkeitsstufen der Zusatzaufgabe. Hier zeigt sich eine Erhöhung der informatorischen Beanspruchung bei der auditiven Informationsaufnahme, der kognitiven Verarbeitung und der verbalen Handlungsausführung, nicht aber bei der visuellen Informationsaufnahme. Differenziert reagiert die motorische Komponente, die nur bei der Verwendung des Trackballs stärker belastet wird, für die Eingabe über Touchscreen aber konstant bleibt (vgl. Abb. 12.36(g) *vs.* 12.36(h) und 12.37(g) *vs.* 12.37(h)). Die Abbildungen zeigen auch, dass die realitätskonforme Zusatzaufgabe in Kombination mit der Zeigeaufgabe das angestrebte Workload-Profil induziert, ein Umstand, der wohl der zusätzlichen visuellen Beanspruchung durch die Zeigeaufgabe geschuldet ist.

13.5 Zusammenfassende Bewertung

13.5.1 Zeigeaufgaben

Die Zeigeaufgaben sollen eine große Bandbreite an Auswahlaktionen abdecken und damit vielfältige standardisierte Eingaben repräsentieren. So verlangt die Bearbeitung der Einfachziele eine möglichst schnelle Reaktion auf ein erscheinendes Ziel, das im Sinne von Rasmussens SRK-Taxonomie (vgl. Rasmussen et al., 1994; Vicente, 1999) damit als Signal fungiert, auf das eine einfache Folge von visueller Informationsaufnahme, Verarbeitung und leichter motorischer Handlungsausführung ausgeführt wird. Die dynamischen Mehrfachziele erschweren die Aufgabe durch die Einführung von Distraktoren, die einen Urteilsprozess zur Bestimmung der Ziele erfordern. Es sollen zudem mehrere Ziele ausgewählt werden. Durch sich bewegende Distraktoren und ein bewegtes Ziel soll die Aufgabe außerdem anspruchsvoller werden. Die recht einfache Signal-Reaktions-Kopplung soll durch anspruchsvollere Entscheidungs- und Urteilsprozesse angereichert werden und die Teilnehmer die Ziele eher als Zeichen im Kontext der SRK-Taxonomie interpretieren lassen.

Die Workload-Profile in den Abbildungen 12.35(a) und 12.35(b) für die ausschließliche Bearbeitung der beiden Zeigeaufgaben zeigen, dass die informatorische Belastung für beide Aufgaben sehr ähnlich ist. Es kann nur ein leichter Anstieg der beanspruchten Dimensionen für die Bearbeitung der Mehrfachziele festgestellt werden, der sich für den Trackball deutlicher abzeichnet als für den Touchscreen. Betrachtet man die Werte des NASA-TLX über alle Zusatzaufgaben in den Abbildungen 12.2 und 12.17, ist auch hier ein Unterschied allenfalls in der motorischen Zusatzbedingung bei Bedienung über Trackball auszumachen.

Betrachtet man die Leistung in den einzelnen Zusatzaufgaben, zeigt sich auch hier ein relativ gleichförmiges Bild. Die Bearbeitung von Einfach- im Vergleich zu Mehrfachzielen führt zu keinen Leistungsunterschieden in der visuellen, kognitiven und der Readback-Komponente der komplexen Zusatzaufgabe. In der motorischen und der Tracking-Komponente der komplexen Zusatzaufgabe ist allerdings in allen Bedingungen ein deutlicher Abfall der motorischen bzw. Tracking-Leistung bei Bearbeitung der Mehrfachziele zu beobachten. Es lässt sich daraus schließen, dass die beabsichtigte Anspruchserhöhung durch die dynamischen Mehrfachziele nicht so sehr im kognitiven

als eher im Bereich der motorischen Handlungsausführung wirkt, worauf auch die Ausführungen zu den Workload-Profilen hinweisen.

Zusammenfassend zeigt sich auch für die beiden Zeigeaufgaben, dass die auf den ersten Blick sehr homogenen Ergebnisse bei genauer Betrachtung eine differenzierte Struktur aufweisen. Weitere Evaluationsstudien, die das Paradigma rascher Zeigeaufgaben einsetzen, sollten trotzdem den Einsatz noch ausgeprägter heterogener Zeigeaufgaben anstreben.

13.5.2 Evaluationskonzept

Das Evaluationskonzept basiert auf der Überlegung, dass die Gestaltung und Bewertung von Mensch-Maschine-Systemen in Korrespondenz-abhängigen Arbeitsdomänen, bei denen externe Einflüsse eine bedeutsame Rolle für die Zielerreichung spielen (vgl. Abschnitt 2.2.2 und Vicente, 1990, 1999), sowohl die Einflussgrößen des Arbeitsumfelds als auch die psychologischen Möglichkeiten und Fähigkeiten des Nutzers berücksichtigen muss. Diese beiden Aspekte werden in der informatorischen Beanspruchungsanalyse zusammengefasst. Dadurch wird Hammonds Forderung nach einer »*defensible logic*« (Hammond, 1986, S. 431) zur Repräsentation des Kontextes begegnet, um experimentelle Ergebnisse, die im Labor gewonnen werden, generalisieren zu können.

Der Belastungskontext wird über eine Befragung von Piloten als Domänenexperten ermittelt. Die Dimensionen mit Belastungsspitzen werden durch standardisierte Zusatzaufgaben abgebildet. Das allgemein ermittelte Belastungsprofil wird durch eine realitätskonforme, komplexe Zusatzaufgabe abgebildet. Damit in der entstehenden Zweifachaufgabensituation die Aufmerksamkeitsverteilung nicht der Willkür der Probanden überlassen ist, werden drei Priorisierungsstufen eingeführt, die unterschiedliche Aufmerksamkeitsschwerpunkte setzen. Um in den Experimentalbedingungen sowohl Situationen mit mäßiger als auch mit starker Belastung repräsentieren zu können, werden die Zusatzaufgaben in zwei Schwierigkeitsstufen bearbeitet.

13.5.2.1 Art der Zusatzbelastung

Es ist eine Grundannahme des Evaluationskonzeptes, dass die Leistung der untersuchten Zeigeaufgaben vom informatorischen Kontext abhängt. Die Ergebnisse der

durchgeführten Untersuchung bestätigen das. Allein die zusammenfassende Darstellung der Aufgabenleistungen in POCs macht deutlich, dass unterschiedliche Arten der Zusatzbelastung zu unterschiedlichen Leistungen führen. Die Analyse der Effekte der manipulierten Faktoren unterstützt diesen Eindruck: Die Leistung in den Zeigeaufgaben ist abhängig vom induzierten informatorischen Kontext. Die beste Zeigeleistung wird erreicht unter nur kognitiver, gefolgt von nur visueller Zusatzbelastung. Deutliche Leistungseinbußen zeigen sich bei der motorischen und insbesondere bei der komplexen Zusatzaufgabe, einer Kombination aller Belastungsdimensionen. Diese Effekte werden noch deutlicher bei der Untersuchung der Workload in den Zweifachaufgabensituationen. Auch hier zeigt sich eine steigende Workload von kognitiver über visuelle hin zu motorischer und komplexer Zusatzaufgabe. Besonders Aufgaben mit ausgeprägter motorischer Belastung scheinen einen starken negativen Einfluss auf die Zeigeleistung zu haben.

13.5.2.2 Priorisierung

Die Veränderung des Aufmerksamkeitsschwerpunktes muss auf Ebene der einzelnen Aufgaben diskutiert werden, da sich hier ein sehr differenziertes Bild zeigt. Offensichtlich ist die Fähigkeit zur willkürlichen Verteilung von Aufmerksamkeitsressourcen abhängig von der Art der Zusatzaufgabe. So ist unter visueller Zusatzbelastung sowohl für die Zeige- als auch die Entdeckungsleistung der erwartete lineare Verlauf in Abhängigkeit der investierten Ressourcen zu beobachten.

Unter kognitiver Zusatzbelastung hingegen sind die Leistungen für die verschiedenen Priorisierungsstufen sehr uneinheitlich, was vielleicht an den diskutierten Defiziten der Umsetzung liegt. Vermutlich ist aber die Aufgabe so leicht gewesen, dass sie nur wenige Ressourcen benötigt. Auch wenn die Versuchsteilnehmer aufgefordert werden, Ressourcen aus der Zeigeaufgabe abzuziehen und in die kognitive Aufgabe zu investieren, ist davon auszugehen, dass das nur bis zu dem Punkt geschieht, ab dem eine optimale Leistung erbracht werden kann. Das schafft zusätzliche Ressourcen für die Zeigeaufgabe und führt zu entsprechend hoher Leistung.

Die Aufmerksamkeitsverteilung unter motorische Zusatzbelastung zeigt bei der Bearbeitung der Einfachziele das erwartete Muster. Vielleicht reduziert die komplexere Aufgabensituation bei der Bearbeitung der Mehrfachziele die Flexibilität der Auf-

merksamkeitsressourcen. Allerdings beschränkt sich diese mangelnde Flexibilität nur auf die Zusatzaufgabe.

Für die komplexe Zusatzaufgabe ist die Struktur der Ergebnisse für die Priorisierungsstufen stark uneinheitlich. Aufgrund der Vielzahl der eingesetzten Aufgaben und der dadurch beanspruchten Informationsverarbeitungsprozesse treten offenbar komplexe Interaktionseffekte auf, die hier nur folgende Schlussfolgerung zulassen: Selbst wenn die willkürliche Zuweisung von Aufmerksamkeitsressourcen für die realitätskonforme Zusatzaufgabe erfolgreich ist, schlägt sich das in den erhaltenen Ergebnissen nur andeutungsweise für die einfache Zeigeleistung und die Tracking-Komponente bei Bearbeitung der dynamischen Mehrfachziele nieder.

Für zukünftige Umsetzungen des Evaluationskonzeptes, die eine Priorisierung von Teilaufgaben einer Mehrfachaufgabensituation umfassen, sollte in Vorversuchen geklärt werden, ob Anreize für die Aufgabenleistung geschaffen werden können und sollten, wie sie beispielsweise Navon (1984) empfiehlt. Auch Tsang (1996) und Tsang (1998) sprechen sich für ein Anreizsystem aus und prüfen eine experimentelle Umsetzung. Allerdings kann auch ein solches Anreizsystem zu unerwünschten Effekten führen, wenn damit die Flexibilität der Ressourcenverteilung, die möglicherweise von den beanspruchten Dimensionen der Informationsverarbeitung abhängt, überdeckt wird.

13.5.2.3 Schwierigkeit

Mit wenigen Ausnahmen spiegelt sich die Manipulation der Schwierigkeit durch zwei unterschiedlich komplexe Varianten der Zusatzaufgabe in den Leistungen bei Zeige- und Zusatzaufgabe wieder. Nur die Leistungsmaße unter kognitiver Zusatzbelastung bei Bearbeitung der Einfachziele sowie die Tracking- und Zeigeleistung unter Bearbeitung der Mehrfachziele bilden diese Manipulation nicht ab. Für alle Aufgabenkonstellationen zeigt sich die erhobene Workload als sehr sensibles Maß für die Schwierigkeitsmanipulation. Die gewählten Schwierigkeitsstufen erfüllen den Zweck, zwei unterschiedlich fordernde Kontextsituationen repräsentativ abzubilden.

13.5.2.4 Bediengeräte

Der Leistungsvergleich von Touchscreen und Trackball bildet den inhaltlichen Hintergrund der vorliegenden Studie und liefert Anlass für die Formulierung und Im-

plementierung des vorgestellten Evaluationskonzeptes. Es ist integraler Bestandteil des Vorgehens, diesen Leistungsvergleich durchzuführen. Die Bewertung erfolgt auf Grundlage des Evaluationskonzeptes unter den verschiedenen Bedingungen.

Die Ergebnisse sind sehr deutlich. Die Zeigegeschwindigkeit mit Hilfe des Touchscreens ist unter schwerpunktmäßig visueller, kognitiver und motorischer sowie unter realitätskonformer Zusatzbelastung höher als mit Hilfe des Trackballs. Die beobachteten Fehlerraten zeigen kein eindeutiges Ergebnis und deuten nicht auf die Überlegenheit eines der beiden Bediengeräte hin. Mit Ausnahme der kognitiven Zusatzaufgabe sowie der visuellen Zusatzaufgabe bei den Einfach- und der Readback-Aufgabe bei den Mehrfachzielen bilden auch die Zusatzleistungen den durch das Bediengerät induzierten Unterschied ab. Die empfundene Workload ist in allen Bedingungen mit Verwendung des Touchscreens niedriger als mit Verwendung des Trackballs.

In Abschnitt 8.4 werden Anforderungen an die verwendeten Zusatzaufgaben formuliert. Letzte Anmerkungen dazu werden diese Arbeit abschließen.

- Wie die Ausführungen in den Abschnitten 10.1, 10.2, 10.3 und 10.4 zeigen, erfolgt die Auswahl der Zusatzaufgaben für diese Untersuchung auf starker theoretischer Grundlage.
- Die Workload-Profile zeigen, dass es nicht einfach ist, eindimensionale Belastungssituationen nachzustellen. An jeder Form der Informationsverarbeitung, wie bereits der Informationsaufnahme, sind kognitive Prozesse beteiligt. Mit dieser Einschränkung scheint die Induzierung standardisierter Beanspruchung jedoch gelungen zu sein.
- Die eingesetzten Zusatzaufgaben waren den Teilnehmern vorher nicht bekannt. Sie hatten daher kein aufgabenspezifisches Vorwissen. Mit Ausnahme der kognitiven Zusatzaufgabe erreichen alle Aufgaben einen ausreichenden Schwierigkeitsgrad, so dass in diesem Belang alle Einzelaufgaben als Ressourcen-abhängig betrachtet werden können.
- Der Schwierigkeitsgrad aller Aufgaben kann ausreichend feingranular manipuliert werden.
- Hinsichtlich praktischer Erwägungen erweisen sich alle Implementierungen der Aufgaben als problemlos umsetzbar. Für die kognitive Zusatzaufgabe wird eine weitere Automatisierung des Erhebungsprozesses empfohlen. Ansonsten können alle Leistungsdaten problemlos maschinell erhoben und ausgewertet werden.

13 Interpretation und Diskussion

Diese Ausführungen zeigen, dass das Evaluationskonzept die formulierten Ansprüche erfüllen kann. Obwohl die Vielzahl an Methoden und Auswertewerkzeugen große Mengen an Daten produziert, gestattet die gewonnene Vielfalt an Ergebnissen unterschiedliche Blickwinkel auf den Untersuchungsgegenstand und rechtfertigt so den hohen Versuchsaufwand.

A Fragebogen zur informatischen Beanspruchungsanalyse

Hintergrund

Im Projekt **Panoramic Display** untersuchen wir die Verwendbarkeit eines großflächigen Touchscreens als Head-Down-Display.

Dazu werden wir Experimente an Desktop-Simulatoren durchführen, die die Komplexität der Flugaufgabe reduziert darstellen. Deshalb möchten wir die Situation im Cockpit durch **Zusatzaufgaben** ansatzweise realitätsnah nachbilden.

Um die Art und Komplexität der Zusatzaufgaben richtig einschätzen zu können, versuchen wir,

- die Belastungsstruktur bei bestimmten **allgemeinen Flugaufgaben** zu ermitteln (1 Seite),
- für drei ausgewählte **Anwendungsfälle** (CAP, Air-to-Surface, Route Management) die allgemeinen Flugaufgaben zu gewichten (2 Seiten) und
- einige offene Fragen zur **Struktur der allgemeinen Flugaufgaben** zu klären (5 Seiten).

Allgemeine Flugaufgaben

In Literaturrecherche und Vorbefragungen identifizierten wir folgende allgemeine Flugaufgaben:

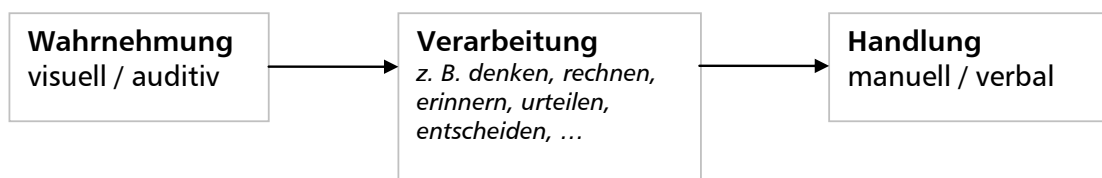
- Aviation/Flight (*Annahmen: mittlere Komplexität, taktische Formation*)
- Navigation
- Communication
- System Management (*Annahme: ohne DVI*)
- Tactics/Threat Management

Vorgang der Informationsverarbeitung

Damit Sie die Fragen der ersten Seite beantworten können, benötigen Sie Informationen zum Prozess der menschlichen Informationsverarbeitung, wie wir ihn hier einsetzen:

Der Mensch *nimmt* Informationen *wahr*, *verarbeitet* diese, vergleicht sie mit gespeicherten Erfahrungen, wägt zwischen unterschiedlichen Entscheidungen ab und *handelt*. Er nimmt die Folgen seines Handelns wahr, interpretiert diese usw.

Dieser Vorgang kann vereinfacht so dargestellt werden:



Dieses Schema stellt den Prozess verkürzt dar. Wahrnehmung über Berührung beispielsweise lassen wir außen vor. Kurz und knapp interessiert uns, was über Augen und Ohren ins Gehirn geht, verarbeitet wird und eine manuelle oder sprachliche Handlung auslöst.

Antwortschema

Bitte füllen Sie die Fragen zur Belastung auf der nächsten Seite nach folgendem Schema aus: Vergeben Sie in jeder der fünf Verarbeitungsstufen eine Zahl zwischen 0 und 100 in Abhängigkeit der jeweiligen **Belastung**. Je größer die Belastung in dieser Stufe, desto größer soll auch die Zahl sein.

Die fünf Zahlen müssen sich also nicht zu 100 aufaddieren; es könnte in jedem Feld 0 oder auch 100 stehen.

Beispiel:

Wahrnehmung		Verarbeitung	Handlung	
visuell	auditiv	<i>z. B. denken, rechnen, erinnern, urteilen, entscheiden, ...</i>	manuell	verbal
85	12	55	32	10

Alle anderen Fragen werden durch beliebige Markierung auf einer Skala beantwortet. Sie sind so formuliert, dass die Antwort zwischen den Endpunkten der Skala *gering* und *hoch* liegt.

Beispiel:



Bei Fragen zum oder Problemen mit dem Fragebogen erreichen Sie mich unter xxxxxxx@xxxxxx oder telefonisch unter xxxxxx.

Vielen Dank für Ihre Unterstützung!
Armin Eichinger

A Fragebogen zur informatorischen Beanspruchungsanalyse

Bitte vergeben Sie in jeder der fünf Kategorien je nach Belastung 0-100 Punkte.

Wie hoch sind die Belastungen während der allgemeinen Flugaufgabe **Aviation**?

Wahrnehmung		Verarbeitung	Handlung	
visuell	auditiv	<i>z. B. denken, rechnen, erinnern, urteilen, entscheiden, ...</i>	manuell	verbal

Wie hoch sind die Belastungen während der allgemeinen Flugaufgabe **Navigation**?

Wahrnehmung		Verarbeitung	Handlung	
visuell	auditiv	<i>z. B. denken, rechnen, erinnern, urteilen, entscheiden, ...</i>	manuell	verbal

Wie hoch sind die Belastungen während der allgemeinen Flugaufgabe **Communication**?

Wahrnehmung		Verarbeitung	Handlung	
visuell	auditiv	<i>z. B. denken, rechnen, erinnern, urteilen, entscheiden, ...</i>	manuell	verbal

Wie hoch sind die Belastungen während der allgemeinen Flugaufgabe **System Management**?

Wahrnehmung		Verarbeitung	Handlung	
visuell	auditiv	<i>z. B. denken, rechnen, erinnern, urteilen, entscheiden, ...</i>	manuell	verbal

Wie hoch sind die Belastungen während der allgemeinen Flugaufgabe **Tactics/Threat Management**?

Wahrnehmung		Verarbeitung	Handlung	
visuell	auditiv	<i>z. B. denken, rechnen, erinnern, urteilen, entscheiden, ...</i>	manuell	verbal

Anwendungsfall (Use Case): **CAP**

Wie hoch ist die Relevanz/Gewichtung der allgemeinen Flugaufgaben für diesen Anwendungsfall?

Aviation



Navigation



Communication



System Management



Tactics / Threat Management



Anwendungsfall (Use Case): **Air-to-Surface**

Wie hoch ist die Relevanz/Gewichtung der allgemeinen Flugaufgaben für diesen Anwendungsfall?

Aviation



Navigation



Communication



System Management



Tactics / Threat Management



Anwendungsfall (Use Case): **Route Management**

Wie hoch ist die Relevanz/Gewichtung der allgemeinen Flugaufgaben für diesen Anwendungsfall?

Aviation



Navigation



Communication



System Management



Tactics / Threat Management



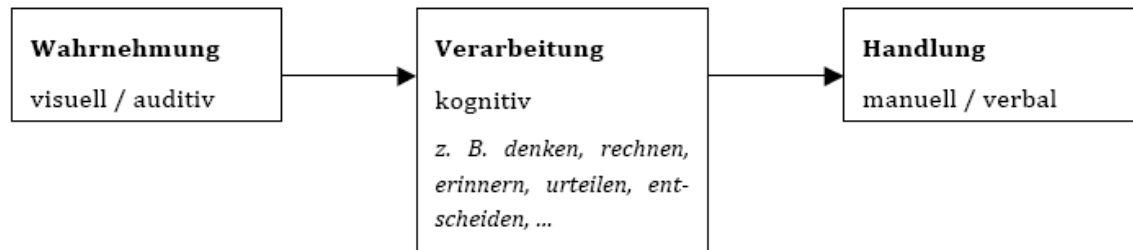
B Fragebogen zur Erhebung des Workload-Profiles

B Fragebogen zur Erhebung des Workload-Profiles

Vorgang der Informationsverarbeitung

Der Mensch nimmt Informationen wahr, verarbeitet diese, vergleicht sie mit gespeicherten Erfahrungen, überlegt zwischen unterschiedlichen Entscheidungen und handelt. Er nimmt die Folgen seines Handelns wahr, interpretiert diese usw.

Dieser Vorgang kann vereinfacht so dargestellt werden



Wie hoch waren die Belastungen während der eben bearbeiteten Aufgabe(n)?

Bitte vergeben Sie in jeder der fünf Kategorien je nach Belastung 0-100 Punkte.

Wahrnehmung		Verarbeitung	Handlung	
visuell	auditiv	visuell z. B. denken, rechnen, erinnern, ur- teilen, entscheiden, ...	manuell	verbal
0-100	0-100	0-100	0-100	0-100

C Instruktion und Information

Information und Instruktion

Hintergrund:

Wir untersuchen im Projekt Panoramic Displays die Verwendbarkeit eines großflächigen Touchscreen-Displays in hochagilen Flugzeugen. Auf Grundlage eines Anzeige- und Bedienkonzepts wurde ein erster Prototyp entwickelt. Dieser soll nun bewertet werden.

Touchscreen und Großflächendisplay wirken sich vermutlich auf Bedienung (z. B. Genauigkeit oder Geschwindigkeit) und Wahrnehmung (z. B. *Wahrnehmbarkeit* oder Situationsbewusstsein) aus. Diese Aspekte werden deshalb evaluiert.

Heute werden wir uns auf die Qualität der Bedienung konzentrieren.

Multitasking:

Der Piloten muss im Cockpit mehrere Aufgaben gleichzeitig durchführen. Wir wollen dieses Multitasking in unseren Experimenten aufnehmen. So sollen die künstlichen Labor-Versuche diesem Gesichtspunkt der realen Situation angenähert werden.

Ihre Aufgabe wird sein, mittels Touchscreen oder Trackball bestimmte Ziele auf dem Display auszuwählen. Diese Auswahl sollen Sie möglichst genau und schnell ausführen.

Gleichzeitig führen Sie eine von vier verschiedenen Zusatzaufgaben aus. Drei der Aufgaben sind standardisiert und decken isolierte Mechanismen der Informationsverarbeitung ab: visuelle Wahrnehmung, kognitive Verarbeitung, manuelle Handlungsausführung. Eine weitere Zusatzaufgabe haben wir speziell entwickelt. Sie basiert auf einer Aufgabenanalyse, die wir für die von uns untersuchten Use Cases durchgeführt haben. Diese komplexe Aufgabe soll Wahrnehmung, kognitive Verarbeitung und Handlungsausführung realitätsnah abdecken.

Weder die Zeige- noch die Zusatzaufgaben sind von vornherein wichtiger. Wir werden die Wichtigkeit der beiden Aufgaben vielmehr variieren. Je nach Gewichtung in den Durchgängen ist die Zeigeaufgabe wichtiger, ist die Zusatzaufgabe wichtiger oder sind beide Aufgaben gleich wichtig.

„Wichtiger“ bedeutet, dass Sie den Schwerpunkt Ihrer Aufmerksamkeit auf diese Aufgabe legen sollen. In Zahlen ausgedrückt, sollen Sie Ihre Aufmerksamkeit nach dem Schlüssel 80 zu 20 verteilen. Für gleich wichtige Aufgaben ist die Aufteilung demnach 50 zu 50. Vor jedem Durchgang werden Sie über die Gewichtung der Aufgaben informiert.

Wir variieren auch die Schwierigkeit der vier Zusatzaufgaben. Jede dieser Aufgaben wird in einer leichteren und einer schwierigeren Variante bearbeitet.

Die Zeigeaufgaben führen Sie einmal mit dem Touchscreen und einmal mit dem Trackball aus. Für diese Aufgaben verwenden Sie die linke Hand.

Ablauf:

Zuerst werden Sie jede einzelne Aufgabe separat durchführen. Diese Trainingsdurchgänge werden nicht ausgewertet. Sie dienen nur dazu, die jeweiligen Aufgaben kennen zu lernen.

Die einzelnen Experimentaldurchgänge werden in zufälliger Reihenfolge bearbeitet. Sie dauern je 90 Sekunden. Zu Beginn dieser Durchgänge werden die Versuchsleiter die einzelnen Aufgaben manuell und möglichst gleichzeitig starten. Ein einzelner Durchgang ist beendet, sobald die Zeigeaufgabe nicht mehr dargestellt wird.

Nach jedem Durchgang bitten wir Sie, Ihre Beanspruchung an Hand zweier Fragebögen einzuschätzen. Das Ausfüllen dieser Fragebögen dauert erfahrungsgemäß nur wenige Sekunden.

Disclaimer:

Es werden nicht Sie als Versuchsteilnehmer, sondern die Qualität des Displays bewertet. Alle erhobenen Daten werden vertraulich behandelt.

Zeigeaufgaben

Grundlagen:

Jedes Symbol verfügt über eine 17 mm mal 17 mm große Aktivierungsfläche. Das sichtbare Symbol hat einen Durchmesser von ca. 7 mm. Wird der Cursor unabhängig vom Bedienelement im Anwahlvorgang über die Aktivierungsfläche eines Symbols bewegt, so wird die Größe dieser Fläche durch eine Umrandungslinie optisch dargestellt. Das Positionieren des Cursors erfolgt entweder durch Positionieren des Fingers auf dem Display oder durch Bewegen des Trackballs.

Touchscreen:

Der Touchscreen wird im Rahmen dieser Versuche immer mit der linken Hand bedient, unabhängig von der Position der anzuwählenden Ziele. Dadurch sollen die ungünstigsten zu erwartenden Bedienumstände abgebildet werden.

Es handelt sich hierbei um einen IR-Touchscreen. Wird der Finger auf die Displayoberfläche bewegt, so werden die vertikalen und horizontalen IR-Lichtschranken unterbrochen und der Cursor an die jeweilige Stelle gesetzt. Dies entspricht der Bewegung der Mouse sowie dem Drücken der linken Mousetaste (Mouse Down).

Befindet sich der Finger auf der Oberfläche und wird er bewegt, so wird der Cursor entsprechend mitverschoben. Erst wenn der Finger das IR-Raster wieder verlässt, wird an dieser Stelle ein Eingabe-Event ausgelöst (Mouse Up).

Wichtig: Wird der Finger kurz vor dem Abheben von der Displayoberfläche verschoben, kann der Fall eintreten, dass der Cursor wieder aus der Aktivierungsfläche herausbewegt wird. Daher empfehlen wir, den Finger möglichst senkrecht zur Displayfläche abzuheben.

Trackball:

Der Cursor wird durch Drehen des Trackballs positioniert. Durch Drücken und Loslassen der rechten Taste am Trackball-Bediengerät wird ein Eingabe-Event ausgelöst. Dies entspricht vom Bedienablauf der linken Mouse-Taste.

Single Targets:

Es werden einzelne Ziele nacheinander auf dem Display dargestellt. Wählen Sie diese Ziele nach ihrem Auftauchen möglichst schnell und genau an. Die Ziele erscheinen in immer gleichen zeitlichen Intervallen und verschwinden nach der Auswahl.

Ziel dieses Versuchs ist es, die Bedienleistung mit den betrachteten Interaktionsgeräten für einfache und standardisierte Eingabehandlungen zu erheben.

Multiple & Moving Targets:

Mehrere Symbole werden gleichzeitig dargestellt. Einige dieser Symbole bewegen sich. Angezeigt werden blaue und rote Symbole. Wählen Sie alle roten Ziele möglichst schnell und genau an. In immer gleichen zeitlichen Intervallen wird die Symbolkonfiguration geändert. Dabei werden die bisherigen Symbole aus- und eine neue Konfiguration von Symbolen eingeblendet.

Dieser Versuch orientiert sich an repräsentativen Interaktionsabläufen des Piloten im Cockpit. In bestimmten Zeitabständen kontrolliert der Pilot die taktische Situation auf den Multifunktionsdisplays. Die roten Ziele repräsentieren für das taktische Szenario relevante Symbole. Das Anwählen der roten Symbole im Test entspricht dem Quittieren eines wahrgenommenen Symbols im Flugbetrieb. Die Bewegungsgeschwindigkeit der Symbole im Test basiert auf Relativgeschwindigkeiten zwischen Mach 0 und Mach 2 und einem angezeigten Kartenmaßstab von 1:500000.

Zusatzaufgaben

Visuelle Zusatzaufgabe:

Auf dem kleinen Head-up-Bildschirm werden Kreise dargestellt. Einer der Kreise ist größer als die anderen. Dieser Kreis ist in der linken oder der rechten Bildschirmhälfte. Durch Drücken der linken oder rechten Cursortaste (Pfeil nach links/Pfeil nach rechts) zeigen Sie an, welche Hälfte die richtige ist. Nachdem Sie gewählt und die Auswahl zwei Sekunden nicht mehr geändert haben, wird der nächste Durchgang angezeigt.

In der leichten Variante ist der Unterschied in der Größe von Zielkreis und Störkreisen größer als in der schwierigen.

Kognitive Zusatzaufgabe:

Sie hören zuerst eine Liste von Zahlen; vorgelesen von einer Computerstimme. Merken Sie sich die Zahlen bitte. Nach einem Signalton hören Sie eine weitere Zahl. Sie sollen nun entscheiden, ob diese Zahl Element der gemerkten Liste war. Antworten Sie bitte nur mit „ja“ oder „nein“; antworten Sie außerdem möglichst schnell und richtig.

In der leichten Variante enthält die Merkliste vier, in der schwierigen acht Zahlen.

Motorische Zusatzaufgabe:

Zu Ihrer Rechten ist eine Lochmaske platziert, die auf einer Tastatur angebracht ist. Sie sollen einen Holzgriffel im Uhrzeigersinn in die Vertiefungen stecken. Drücken Sie den Griffel ausreichend aber nicht zu fest auf die Tastatur, um einen Tastendruck auszulösen. Bearbeiten Sie diese Aufgabe „blind“, d. h. ohne Ihren Blick von der Zeigeaufgabe abzuwenden.

In der leichten Variante ist der Durchmesser der Vertiefungen größer und der Griffel mehr abgerundet als in der schwierigen.

Komplexe Zusatzaufgabe:

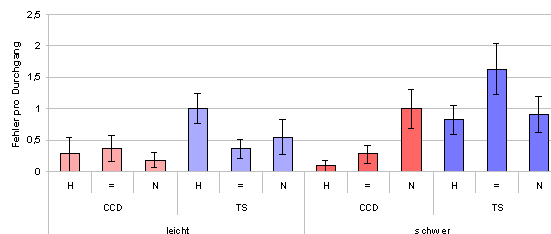
Auf dem kleinen Head-up-Bildschirm wird ein grünes Kreuz in der Mitte des Bildschirms dargestellt. Versuchen Sie durch geeignete Gegenbewegungen mit dem Joystick, das Kreuz möglichst in der Bildschirmmitte zu halten.

Zeitgleich werden Ihnen von einer Computerstimme Zahlenreihen vorgelesen. Nach einem Signalton sollen Sie die Zahlenreihe rückwärts wiederholen. Antworten Sie auch hier möglichst schnell und richtig.

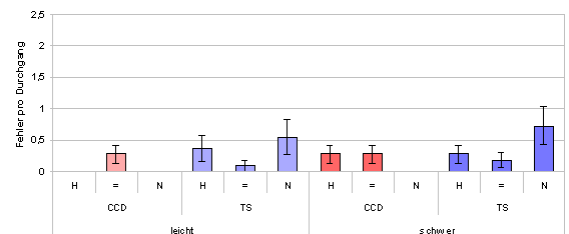
In der leichten Variante ist die Ablenkung geringer als in der schwierigen. Die Zahlenreihe besteht im ersten Fall aus vier, im zweiten aus sechs Zahlen.

D Fehler in der Zeigeaufgabe

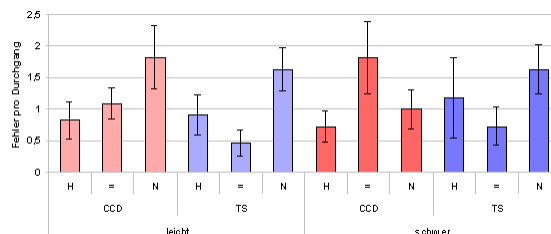
Abbildung D.1 zeigt die durchschnittliche Anzahl Fehler pro Versuchsdurchgang für die Bearbeitung der Einfachziele. Die Darstellung gliedert nach Art und Schwierigkeit der Zusatzaufgabe, Bediengerät und Priorisierung.



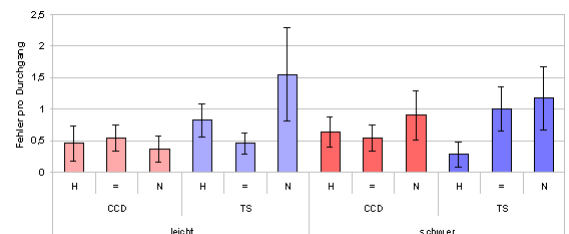
(a) Visuelle Zusatzaufgabe



(b) Kognitive Zusatzaufgabe



(c) Motorische Zusatzaufgabe

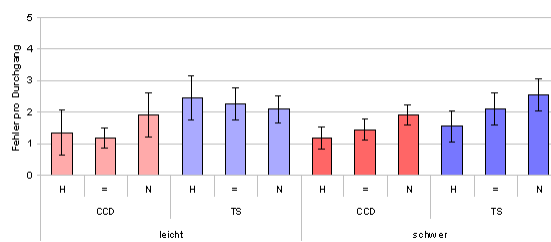


(d) Komplexe Zusatzaufgabe

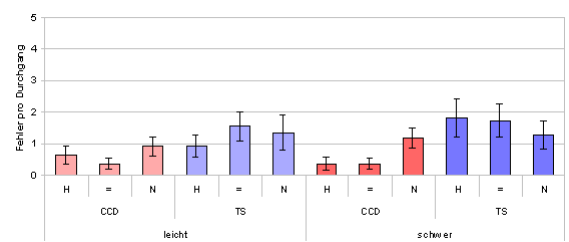
Abbildung D.1: Fehler bei der Zeigeaufgabe Einfachziele nach Art und Schwierigkeit der Zusatzaufgabe, Bediengerät und Priorisierung

Abbildung D.1 zeigt die durchschnittliche Anzahl Fehler pro Versuchsdurchgang für die Bearbeitung der Mehrfachziele. Die Darstellung gliedert nach Art und Schwierigkeit der Zusatzaufgabe, Bediengerät und Priorisierung.

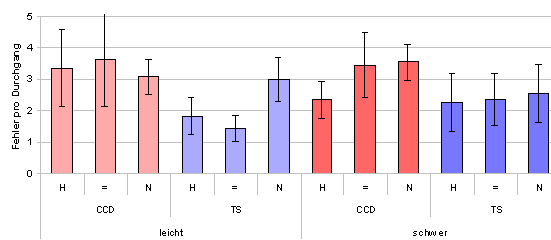
D Fehler in der Zeigeaufgabe



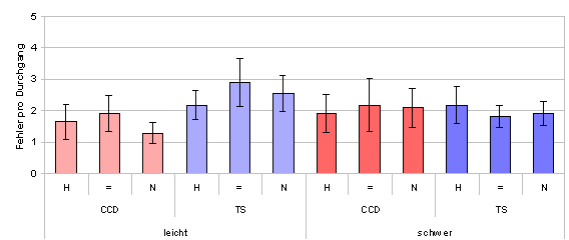
(a) Visuelle Zusatzaufgabe



(b) Kognitive Zusatzaufgabe



(c) Motorische Zusatzaufgabe



(d) Komplexe Zusatzaufgabe

Abbildung D.2: Fehler bei der Zeigeaufgabe Mehrfachziele nach Art und Schwierigkeit der Zusatzaufgabe, Bediengerät und Priorisierung

Literaturverzeichnis

- Abrams, R. & Pratt, J. (1993). Rapid aimed limb movements: differential effects of practice on component submovements. *Journal of Motor Behavior*, 25(4), 288–298.
- Adams, J. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3(2), 111–149.
- AGARD. (1994). *Operational Agility*. AGARD-AR-314, Flight Mechanics Panel Working Group 19.
- Aldrich, T. B., Szabo, S. M. & Bierbaum, C. R. (1989). The development and application of models to predict operator workload during system design. In G. R. McMillan, D. Beevis, E. Salas, M. H. Strub, R. Sutton & L. V. Breda (Hrsg.), *Applications of human performance models to system design (defense research series, defense research series, vol. 2)* (S. 65–80). New York: Plenum.
- Allport, D. (1980). Attention and performance. 112–153.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417–423.
- Baddeley, A. (2007). *Working Memory, Thought, and Action*. New York: Oxford University Press.
- Badke-Schaub, P., Hofinger, G. & Lauche, K. (2008). *Human Factors*. Heidelberg: Springer.
- Becker, S., Neujahr, H., Sandl, P. & Babst, U. (2008). Holographisches Display – HOLDIS. In M. Grandt & A. Bauch (Hrsg.), *Beiträge der Ergonomie zur Mensch-System-Integration*. Bonn: DGLR.

LITERATURVERZEICHNIS

- Bennett, K., Nagy, A. & Flach, J. (2006). Visual displays. In G. Salvendy (Hrsg.), *Handbook of human factors and ergonomics* (S. 1191–1220). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Bernstein, N. (1967). *The Co-Ordination and Regulation of Movements*. New York: Pergamon.
- Biswas, P. & Robinson, P. (2009). Predicting Pointing Time from Hand Strength. In *Proceedings of the 5th symposium of the workgroup human-computer interaction and usability engineering of the austrian computer society on hci and usability for e-inclusion* (S. 428–447). Berlin.
- Bondar, A. (2002). *Balance and cognition: Resource allocation and its control in young and older adults*. Free University Berlin, Dissertation.
- Bornemann, E. (1942/1959). Untersuchungen über den Grad der geistigen Beanspruchung. Nachdruck von 1942. *Arbeitsphysiologie*, 12, 142–191.
- Bortz, J. & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. Berlin: Springer.
- Bowman, D., Kruijff, E., LaViola, J. & Poupyrev, I. (2004). *3D user Interfaces: Theory and Practice*. Massachusetts: Addison-Wesley.
- Boyer, R. & Charleston, D. (1985). Auditory memory-search. *Perceptual and Motor Skills*, 60(3), 927–939.
- Broadbent, D. (1958). *Perception and Communication*. London: Pergamon Press.
- Bronzino, J. (2006). *Biomedical Engineering Fundamentals*. Boca Raton: CRC press.
- Brookhuis, K. & De Waard, D. (2001). Assessment of drivers' workload: performance, subjective and physiological indicators. In P. Hancock & P. Desmond (Hrsg.), *Stress, Workload, and Fatigue* (S. 321–333). London: Lawrence Erlbaum Associates.
- Brunswik, E. (1955). *The Conceptual Framework of Psychology*. Chicago: University of Chicago Press.
- Brunswik, E. (1956). *Perception and the Representative Design of Psychological Experiments*. Berkeley: University of California Press.
- Buld, S. (2001). *Der Arbeitsplatzinhaber als Experte bei der Arbeitsplatzbewertung*. Universität Würzburg, Dissertation.

LITERATURVERZEICHNIS

- Burns, C. & Hajdukiewicz, J. (2004). *Ecological Interface Design*. Boca Raton: CRC Press.
- Burrows, D. & Okada, R. (1975). Memory retrieval from long and short lists. *Science*, 188(4192), 1031–1033.
- Byers, J., Bittner, A. & Hill, S. (1989). Traditional and raw task load index (TLX) correlations: Are paired comparisons necessary? *Advances in Industrial Ergonomics and Safety I*, 481–485.
- Cain, B. (2007). *A Review of the Mental Workload Literature*. Defence Research and Development Toronto, Human System Integration Section.
- Calhoun, G. (2000). *Pilot-Vehicle Interface*. Wright-Patterson Air Force Base: Air Force Research Laboratory.
- Calhoun, G., LeBlaye, P. & Welsch, H. (2000). *Pilot-Vehicle Interface*. Wright-Patterson Air Force Base: Air Force Research Laboratory.
- Card, S., Moran, T. & Newell, A. (1983). *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Carswell, C. & Stephens, E. (2006). Information processing. In W. Karwowski (Hrsg.), *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors* (S. 408–411). London: Taylor and Francis.
- Cavanagh, J. (1972). Relation between the immediate memory span and the memory search rate. *Psychological Review*, 79(6), 525–530.
- Chapanis, A. (1965). *Man-Machine Engineering*. Belmont: Wadsworth.
- Chapanis, A. (1999). *The Chapanis Chronicles: 50 Years of Human Factors Research, Education and Design*. Santa Barbara: Aegean Pub Co.
- Chase, W. & Calfee, R. (1969). Modality and similarity effects in short-term recognition memory. *Journal of Experimental Psychology*, 81(3), 510–514.
- Chernikoff, R., Duey, J. & Taylor, F. (1960). Two-dimensional tracking with identical and different control dynamics in each coordinate. *Journal of Experimental Psychology*, 60(5), 318–322.
- Clamann, M. & Kaber, D. (2004). Applicability of usability evaluation techniques to aviation systems. *International Journal of Aviation Psychology*, 14(4), 395–420.

- Cockburn, A. (2001). *Writing Effective Use Cases*. New Jersey: Upper Saddle River.
- Cohen, D., Otakeno, S., Previc, F. & Ercoline, W. (2001). Effect of 'inside-out' and 'outside-in' attitude displays on off-axis tracking in pilots and nonpilots. *Aviation, space, and environmental medicine*, 72(3), 170–176.
- Conklin, H., Curtis, C., Katsanis, J. & Iacono, W. (2000). Verbal working memory impairment in schizophrenia patients and their first-degree relatives: evidence from the digit span task. *American Journal of Psychiatry*, 157(2), 275.
- Conway, A., Kane, M., Bunting, M., Hambrick, D., Wilhelm, O. & Engle, R. (2005). Working memory span tasks: A methodological review and user's guide. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(5), 769–786.
- Cooksey, R. (1996). *Judgment Analysis: Theory, Methods, and Applications*. San Diego: Academic Press.
- Davis, H. & Pratt, C. (1995). The development of children's theory of mind: The working memory explanation. *Australian Journal of Psychology*, 47(1), 25–31.
- Deutsch, J. & Deutsch, D. (1963). Attention: Some theoretical considerations. *Psychological Review*, 70(1), 80–90.
- De Waard, D. (1996). *The Measurement of Drivers' Mental Workload*. Haren, Traffic Research Centre VSC: University of Groningen, Ph.D. Thesis.
- Dhami, M., Hertwig, R. & Hoffrage, U. (2004). The role of representative design in an ecological approach to cognition. *Psychological Bulletin*, 130, 959–988.
- DIN 33405. (1987). *Psychische Belastung und Beanspruchung: Allgemeines, Begriffe*. Berlin.
- DIN EN ISO 10075-1. (2000). *Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung - Teil 1: Allgemeines und Begriffe*. Berlin.
- DIN EN ISO 9241-11. (1998). *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten, Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit*.
- Donders, F. (1868/1969). On the speed of mental processes. *Acta Psychologica*, 30, 412.
- Eggemeier, F. & Wilson. (1991). Performance-Based and Subjective Assessment of Workload in Multi-Task Environments. In D. Damos (Hrsg.), *Multiple-Task Performance* (S. 217–278). London: CRC Press.

LITERATURVERZEICHNIS

- Eichinger, A., Kellerer, J., Sandl, P. & Zimmer, A. (2008). Panoramic Displays – Quantitative Evaluation sensomotorischer Aspekte der Bedienleistung. In M. Grandt & A. Bauch (Hrsg.), *Beiträge der Ergonomie zur Mensch-System-Integration* (S. 357–368). DGLR-Bericht 2008-04, Bonn: Deutsche Gesellschaft für für Luft- und Raumfahrt e. V.
- Embrey, D., Blackett, C., Marsden, P. & Peachey, M. (2006). *Development of a Human Cognitive Workload Assessment Tool*. MCA Final Report. Dalton: Human Reliability Associates.
- Endsley, M. (2000). *Situation Awareness Analysis and Measurement*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Endsley, M. (2006). Situation awareness. In G. Salvendy (Hrsg.), *Handbook of human factors and ergonomics* (S. 528–546). New York: John Wiley & Sons.
- Fairclough, S. (1991). *Adapting the TLX to measure driver mental workload*. Report V1017/BERTIE/No. 71. Loughborough, Leics: HUSAT Research Institute.
- Fitts, P. (1947). *Psychological Research on Equipment Design*. US Govt. Print. Off.
- Fitts, P. & Jones, R. (1947). Psychological aspects of instrument displays: Analysis of 270 'pilot-error' experiences reading and interpreting aircraft instruments. *Report TSEAA-694-12A, Wright-Patterson Air Force Base, OH: Aeromedical Laboratory. Reprinted in H.W. Sinaiko, 1961, (Ed.) Selected Papers on Human Factors in the Design and Use of Control Systems. New York: Dover.*
- Foster-Hunt, T. (2009). *Aviation Technology and the Role of Human Factors Design*. (<http://www.airforce.forces.gc.ca/dfs/publications/ot-dab/2009/09-1/09-eng.asp>)
- Fracker, M. & Wickens, C. (1989). Resources, confusions, and compatibility in dual-axis tracking: Displays, controls, and dynamics. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15(1), 80–96.
- Giampietri, R. (2003). Eurofighter Development: A Collaborative Compromise. *Flight Safety Information Journal*, 3–11.
- Gibson, J. (1986). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Lawrence Erlbaum Associates.

LITERATURVERZEICHNIS

- Goldhammer, F. & Moosbrugger, H. (2005). Aufmerksamkeit. In S. Schweizer (Hrsg.), *Leistung und leistungsdiagnostik*. Heidelberg: Springer.
- Gopher, D. & Donchin, E. (1986). Workload – An examination of the concept. *Handbook of Perception and Human Performance.*, 2, 1–49.
- Hadwiger, P. (2007). *Perspektivische Displays in hochagilen Flugzeugen*. TU München, unveröffentlichte Diplomarbeit.
- Hajdukiewicz, J. & Vicente, K. (2006). Ecological Approach. In W. Karwowski (Hrsg.), *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors* (S. 38–42). London: Taylor and Francis.
- Hall, S. & Brannick, M. (2008). Performance Assessment in Simulation. In D. Vincenzi (Hrsg.), *Human Factors in Simulation and Training* (S. 149–168). London: CRC.
- Halldórsson, T. (2003). *Holographic display screen for airplanes and vehicles*. EADS Deutschland GmbH. European Patent EP0958521.
- Hammond, K. (1966). Probabilistic functionalism: Egon Brunswik's integration of the history, theory, and method of psychology. In K. Hammond (Hrsg.), *The Psychology of Egon Brunswik* (S. 15–80). New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Hammond, K. (1986). Generalization in operational contexts: What does it mean? Can it be done? *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 16(3), 428–433.
- Hart, S. (2006). Nasa-task load index (NASA-TLX): 20 years later. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 50(9), 904–908.
- Hart, S. & Staveland, L. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Human Mental Workload*, 1, 139–183.
- Hart, S. & Wickens, C. (1990). Workload Assessment and Prediction. In H. Boohar (Hrsg.), *Manprint: An approach to systems integration* (S. 257–296). New York, NY: Van Nostrand Reinhold.
- Helleberg, J. & Wickens, C. (2003). Effects of data-link modality and display redundancy on pilot performance: An attentional perspective. *International Journal of Aviation Psychology*, 13(3), 189–210.

LITERATURVERZEICHNIS

- Hess, R. (2003). Automation and Human Performance in Aviation. In P. Tsang & M. Vidulich (Hrsg.), *Principles and Practice of Aviation Psychology* (S. 265–310). Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Hofmann, A., Keller, K.-J. & Neuhaus, R. (2002). Die Sache mit der psychischen Belastung – Eine praxisnahe Handlungshilfe für Unternehmen. *Leistung und Lohn: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 367/368/369/370, 1–59.
- Hogarth, R. (2005). The challenge of representative design in psychology and economics. *Journal of Economic Methodology*, 12(2), 253–263.
- Horrey, W., Wickens, C. & Consalus, K. (2006). Modeling drivers' visual attention allocation while interacting with in-vehicle technologies. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 12(2), 67–78.
- Hoshi, Y., Oda, I., Wada, Y., Ito, Y., Yamashita, Y., Oda, M., Ohta, K., Yamada, Y. & Tamura, M. (2000). Visuospatial imagery is a fruitful strategy for the digit span backward task: a study with near-infrared optical tomography. *Cognitive Brain Research*, 9(3), 339–342.
- Hörmann, H.-J. & Lorenz, B. (2009). Psychologie der Luftfahrt – Forschungs- und Anwendungsgebiete. In H.-P. Krüger (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie. Themenbereich D Praxisgebiete, Serie VI Verkehrspsychologie, Band 2 Anwendungsfelder der Verkehrspsychologie* (S. 711–778). Göttingen: Hogrefe.
- Huang, B. (1994). *Computer Simulation Analysis of Biological and Agricultural Systems*. London: CRC Press.
- James, W. (1890). *The Principles of Psychology*. Holt.
- Kahana, M. & Loftus, G. (1999). Response time versus accuracy in human memory. In R. Sternberg (Hrsg.), *The Nature of Cognition* (S. 322–384). Cambridge: MIT Press.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Kahneman, D. & Treisman, A. (1984). Changing views of attention and automaticity. *Varieties of attention*, 29–61.
- Kantowitz, B. & Simsek, O. (2001). Secondary Task Measures of Driver Workload. In P. Hancock & P. Desmond (Hrsg.), *Stress, Workload, and Fatigue* (S. 395–408). London: Lawrence Erlbaum Associates.

LITERATURVERZEICHNIS

- Kellerer, J. (2006). *Anzeigekonzept für großflächige Displays in der Luftfahrt*. TU München, unveröffentlichte Diplomarbeit.
- Kellerer, J. (2010). *Untersuchung zur Auswahl von Eingabeelementen für Großflächendisplays in Flugzeugcockpits*. TU Darmstadt, Dissertation.
- Kellerer, J., Eichinger, A., Sandl, P. & Klingauf, U. (2008). Panoramic Displays – Anzeige- und Bedienkonzept für die nächste Generation für Flugzeugcockpits. In M. Grandt & A. Bauch (Hrsg.), *Beiträge der Ergonomie zur Mensch-System-Integration* (S. 341–356). DGLR-Bericht 2008-04, Bonn: Deutsche Gesellschaft für für Luft- und Raumfahrt e.V.
- Kelley, C. (1968). *Manual and Automatic Control*. New York: John Wiley.
- Kelso, J., Southard, D. & Goodman, D. (1979). On the coordination of two-handed movements. *Journal of Experimental Psychology*, 5(2), 229–238.
- Kerschenlohr, S. (2007). *Bedienkonzept für großflächige Displays in hochagilen Flugzeugen*. TU München, unveröffentlichte Diplomarbeit.
- Kieras, D. & Meyer, D. (1997). An overview of the EPIC architecture for cognition and performance with application to human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 12(4), 391–438.
- Klingberg, T. (2008). *Multitasking – Wie man die Informationsflut bewältigt, ohne den Verstand zu verlieren*. München: C.H. Beck. (falls die Bibliothek den Titel noch nicht hat, bekommen Sie ihn bei mir im Büro)
- Klingberg, T., Forssberg, H. & Westerberg, H. (2002). Training of working memory in children with ADHD. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 24(6), 781–791.
- Kuhn, F. (2005). Methode zur Bewertung der Fahrerablenkung durch Fahrerinformations-Systeme. *World Usability Day*.
- Larrabee, G. & Kane, R. (1986). Reversed digit repetition involves visual and verbal processes. *International Journal of Neuroscience*, 30(1-2), 11–15.
- LeBlaye, P. (2000). *Agility: Definitions, Basic Concepts, and History*. Wright-Patterson Air Force Base: Air Force Research Laboratory.
- Lee, J. (2007). Affect, Attention, and Automation. 73–89.

LITERATURVERZEICHNIS

- Lehmann, M. (2007). *Entwicklung Kumulativen Rehearsals als Gedächtnisstrategie*. Niedersächsische Staats-und Universitätsbibliothek Göttingen, unveröffentlichte Dissertation.
- Luce, R. (1986). *Response times: Their Role in Inferring Elementary Mental Organization*. New York: Oxford University Press.
- Luczak, H. (1998). *Arbeitswissenschaft*. Heidelberg: Springer.
- Lund, N. (2001). *Attention and Pattern Recognition*. Hove: Routledge.
- MacKenzie, I., Sellen, A. & Buxton, W. (1991). A comparison of input devices in element pointing and dragging tasks. In *Proceedings of the sigchi conference on human factors in computing systems: Reaching through technology* (S. 161–166). New York.
- McClelland, J. (1979). On the time relations of mental processes: An examination of systems of processes in cascade. *Psychological Review*, 86(4), 287–330.
- McCracken, J. & Aldrich, T. (1984). *Analyses of Selected LHX Mission Functions: Implications for Operator Workload and System Automation Goals*. Storming Media.
- McElree, B. & Doshier, B. (1989). Serial position and set size in short-term memory: The time course of recognition. *Journal of Experimental Psychology: General*, 118(4), 346–373.
- Meijman, T. & O'Hanlon, J. (1984). Workload. An introduction to psychological theories and measurement methods. In P. Drenth, H. Thierry, P. Willems & C. de Wolff (Hrsg.), *Handbook of work and organizational psychology* (S. 257–288). New York: Wiley.
- Monsell, S. (1978). Recency, immediate recognition memory, and reaction time. *Cognitive Psychology*, 10(4), 465–501.
- Morasso, P. (1981). Spatial control of arm movements. *Experimental Brain Research*, 42(2), 223–227.
- Moray, N. (1967). Where is attention limited? A survey and a model. *Acta Psychologica*, 27, 84–92.
- Moray, N. (1970). *Attention: Selective Processes in Vision and Hearing*. New York: Academic.

LITERATURVERZEICHNIS

- Moray, N. (1986). Monitoring behavior and supervisory control. In K. Boff, L. Kaufman & J. Thomas (Hrsg.), *Handbook of Perception and Human Performance, Vol. II: Cognitive Processes and Performance* (S. 40/1–40/51). New York: Wiley.
- Moray, N., Johansen, J., Pew, R., Rasmussen, J., Sanders, A. & Wickens, C. (1979). Final report of the experimental psychology group. In N. Moray (Hrsg.), *Mental workload: Its theory and measurement*. New York: Plenum.
- Navon, D. (1984). Resources – A theoretical soup stone? *Psychological Review*, 91, 216–234.
- Navon, D. & Gopher, D. (1979). On the economy of the human processing system. *Psychological Review*, 86(3), 214–255.
- Neisser, U. (1976). *Cognition and Reality*. San Francisco: Freeman.
- Nielsen, J. & Mack, R. (1994). *Usability inspection methods*. New York: Wiley.
- Noble, M., Fitts, P. & Warren, C. (1955). The frequency response of skilled subjects in a pursuit tracking task. *Journal of Experimental Psychology*, 49(4), 249–256.
- Norman, D. & Bobrow, D. (1975). On data-limited and resource-limited processing. *Journal of Cognitive Psychology*, 7, 44–60.
- Oberauer, K., Süß, H., Schulze, R., Wilhelm, O. & Wittmann, W. (2000). Working memory capacity – facets of a cognitive ability construct. *Personality and Individual Differences*, 29, 1017–1045.
- O'Donnell, R. & Eggemeier, F. (1986). Workload assessment methodology. In K. Boff, L. Kaufman & J. Thomas (Hrsg.), *Handbook of Perception and Human Performance, Vol. II: Cognitive Processes and Performance* (S. 42/1–42/49). New York: Wiley.
- Parks, D. & Boucek, G. (1989). Workload prediction, diagnosis, and continuing challenges. In G. R. McMillan, D. Beevis, E. Salas, M. H. Strub, R. Sutton & L. V. Breda (Hrsg.), *Applications of human performance models to system design, defense research series, vol. 2* (S. 47–64). New York: Plenum.
- Pashler, H. (1999). *The Psychology of Attention*. Cambridge: MIT Press.
- Pejtersen, A. M. & Rasmussen, J. (1997). Effectiveness testing of complex systems. *Handbook of Human Factors and Ergonomics*.

LITERATURVERZEICHNIS

- Pew, R. (1966). Acquisition of hierarchical control over the temporal organization of a skill. *Journal of Experimental Psychology*, 71(5), 764–771.
- Posner, M. (1986). Overview. In K. Boff, L. Kaufman & J. Thomas (Hrsg.), *Handbook of Perception and Human Performance, Vol. II: Cognitive Processes and Performance* (S. V3–V10). New York: Wiley.
- Poulton, E. (1957). On prediction in skilled movements. *Psychological bulletin*, 54(6), 467–478.
- Powers, W. (1973). *Behavior: The Control of Perception*. Chicago: Aldine.
- Proctor, R. & Dutta, A. (1995). *Skill acquisition and human performance*. Thousand Oaks: Sage.
- Proctor, R. & Vu, K. (2006a). Human information processing: An overview for human-computer interaction. In G. Salvendy (Hrsg.), *Human Computer Interaction Fundamentals* (S. 19–38). London: CRC Press.
- Proctor, R. & Vu, K. (2006b). *Stimulus-Response Compatibility Principles: Data, Theory, and Application*. London: CRC Press.
- Rasmussen, J., Pejtersen, A. & Goodstein, L. (1994). *Cognitive Systems Engineering*. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA.
- Rauschelbach, H., Widder, B. & Cording, C. (2007). *Begutachtung in der Neurologie*. Stuttgart: Thieme.
- Reason, J. (1970). Skilled Performance. In D. Wright & A. Taylor (Hrsg.), *Introducing psychology: an experimental approach*. Harmondsworth: Penguin Books.
- Roscoe, S., Corl, L. & Jensen, R. (1981). Flight display dynamics revisited. *Human Factors*, 23(3), 341–353.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. & McClelland, J. L. (1987). A general framework for parallel distributed processing. In D. E. Rumelhart, J. L. McClelland et al. (Hrsg.), *Parallel distributed processing: Volume 1: Foundations* (S. 45–76). Cambridge: MIT Press.
- Süß, H., Oberauer, K., Wittmann, W., Wilhelm, O. & Schulze, R. (2002). Working-memory capacity explains reasoning ability – and a little bit more. *Intelligence*, 30(3), 261–288.

LITERATURVERZEICHNIS

- Sanders, A. (1998). *Elements of Human Performance: Reaction Processes and Attention in Human Skill*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Schedlbauer, M., Pastel, R. & Heines, J. (2006). Effect of posture on target acquisition with a trackball and touch screen. In *Proceedings of 28th international conference on information technology interfaces* (S. 257–262). Dubrovnik.
- Schmidt, R. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82(4), 225–260.
- Schmidt, R. (2003). Motor schema theory after 27 years: reflections and implications for a new theory. *Research quarterly for exercise and sport*, 74(4), 366–375.
- Schmidt, R. & Wrisberg, C. (2008). *Motor learning and performance: a situation-based learning approach*. Human Kinetics Publishers.
- Schmidt, R. & Young, D. E. (2006). Control of Rapid Actions: Motor Programming. In W. Karwowski (Hrsg.), *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors* (S. 305–312). London: Taylor and Francis.
- Schmidtke, H. (1996). Mentale Beanspruchung durch informatorische Belastung. In H. Schmidtke (Hrsg.), *Ergonomie* (S. 143–60). München: Hanser.
- Schmidtke, H. (2002). Vom Sinn und Unsinn der Messung psychischer Belastung und Beanspruchung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 56(1/2), 4–9.
- Seifert, K. (2002). *Evaluation Multimodaler Computer-Systeme in frühen Entwicklungsphasen*. TU Berlin, unveröffentlichte Doktorarbeit.
- Sherehiy, B., Karwowski, W. & Rodrick, R. (2006). Human factors and ergonomics standards. In G. Salvendy (Hrsg.), *Handbook of human factors and ergonomics* (S. 1487–1515). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Simon, H. (1990). Invariants of human behavior. *Annual Review of Psychology*, 41(1), 1–20.
- Simon, H. (1996). *The Sciences of the Artificial*. Cambridge: MIT Press.
- Smith, P. & Langolf, G. (1981). The use of Sternberg’s memory-scanning paradigm in assessing effects of chemical exposure. *Human Factors*, 23(6), 701–708.
- Spinoni, M., Wadlow, A. E., Luceron, E. & Hahn, P. (1986). *EFA Cockpit Description*. Turin.

LITERATURVERZEICHNIS

- Stelzer, E. & Wickens, C. (2006). Pilots strategically compensate for display enlargements in surveillance and flight control tasks. *Human factors*, 48(1), 166.
- Sternberg, R. (1992). *Cognitive Psychology*. Belmont: Wadsworth Publishing.
- Sternberg, S. (1966). High-Speed Scanning in Human Memory. *Science*, 153(3736), 652–654.
- Sternberg, S. (1969a). Memory scanning: Mental processes revealed by reaction-time processes. *American Scientist*, 57, 421–457.
- Sternberg, S. (1969b). The discovery of processing stages. *Acta Psychologica*, 30, 276–315.
- Sternberg, S. (1975). Memory scanning: New findings and current controversies. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 27(1), 1–32.
- Sternberg, S. (2004). Memory-scanning: Mental processes revealed by reaction-time experiments. *Cognitive Psychology: Key Readings*, 48–74.
- Stockmann, R. (2000). *Evaluationsforschung*. Opladen: Leske+ Budrich.
- Streng, H., Niederberger, U. & Seelhorst, U. (2002). Correlation between tests of attention and performance on grooved and Purdue pegboards in normal subjects. *Perceptual and Motor Skills*, 95(2), 507–514.
- Styles, E. (2006). *The Psychology of Attention*. New York: Psychology Press.
- Taylor, H., Brunye, T. & Taylor, S. (2008). Spatial mental representation: implications for navigation system design. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 4(1), 1–40.
- Terman, L. (1916). *The Measurement of Intelligence*. Houghton Mifflin.
- Tewes, U. (1994). *Hamburg-Wechsler-Intelligenztest für Erwachsene, Revision 1991*. Huber.
- Treasury, H. (2007). *The Magenta Book: Guidance Notes for Policy Evaluation and Analysis*. London: Government Social Research Unit.
- Treisman, A. (1960). Contextual cues in selective listening. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 12(4), 242–248.
- Treisman, A. & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive psychology*, 12(1), 97–136.

LITERATURVERZEICHNIS

- Tsang, . S. T. L., P. S. (1998). Age, attention, expertise, and time-sharing performance. *Psychology and Aging*, 13, 323–347.
- Tsang, V. V. L. . V. M. A., P. S. (1996). Age, attention, expertise, and time-sharing performance. *Acta Psychologica*, 91, 175–206.
- VanRullen, R., Reddy, L. & Koch, C. (2004). Visual Search and Dual Tasks Reveal Two Distinct Attentional Resources. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(1), 4–14.
- Verwey, W. & Veltman, H. (1996). Detecting short periods of elevated workload: A comparison of nine workload assessment techniques. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 2(3), 270–285.
- Vicente, K. (1990). Coherence- and correspondence-driven work domains: Implications for systems design. *Behaviour and Information Technology*, 9(6), 493–502.
- Vicente, K. (1999). *Cognitive Work Analysis*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Vicente, K. (2004). *The Human Factor: Revolutionizing the Way People Live with Technology*. Hove: Routledge.
- Vidulich, M. (2003). Mental workload and situation awareness. In P. Tsang & M. Vidulich (Hrsg.), *Principles and Practice of Aviation Psychology* (S. 115–146). Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Visscher, K., Kaplan, E., Kahana, M. & Sekuler, R. (2007). Auditory short-term memory behaves like visual short-term memory. *Public Library of Science, Biology*, 5(3), 662–672.
- Ware, C. (2004). *Information Visualization: Perception for Design*. San Francisco: Morgan Kaufmann.
- Ware, C. (2008). *Visual Thinking: For Design*. San Francisco: Morgan Kaufmann.
- Wechsler, D. (1939). *The Measurement of Adult Intelligence*. Baltimore: Williams & Wilkins.
- Wechsler, D. (2007). *The Measurement of Adult Intelligence*. Cooper Press.
- Weinstein, L. & Wickens, C. (1992). Use of nontraditional flight displays for the reduction of central visual overload in the cockpit. *The International Journal of Aviation Psychology*, 2(2), 121–142.

LITERATURVERZEICHNIS

- Wickens, C. (1976). The effects of divided attention on information processing in manual tracking. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2(1), 1–13.
- Wickens, C. (1980). The structure of attentional resources. In R. Nickerson (Hrsg.), (S. 57–68). Hillsdale: Erlbaum.
- Wickens, C. (1984). Processing resources in attention. In R. Parasuraman & D. Davies (Hrsg.), *Varieties of Attention* (S. 63–101). New York: Academic Press.
- Wickens, C. (1999). Aerospace Psychology. In D. Damos (Hrsg.), *Human Performance and Ergonomics* (S. 195–242). San Diego: Academic Press.
- Wickens, C. (2001). Workload and Situation Awareness. In P. Hancock & P. Desmond (Hrsg.), *Stress, Workload, and Fatigue* (S. 443–453). London: Lawrence Erlbaum Associates.
- Wickens, C. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 159–177.
- Wickens, C. (2003a). Aviation Displays. In P. Tsang & M. Vidulich (Hrsg.), *Principles and Practice of Aviation Psychology* (S. 147–200). Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Wickens, C. (2003b). Pilot Actions and Tasks: Selection Execution, and Control. In P. Tsang & M. Vidulich (Hrsg.), *Principles and Practice of Aviation Psychology* (S. 239–265). Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Wickens, C. (2007). Attention to Attention and its Application: A Concluding View. In A. Kramer, D. Wiegmann & A. Kirlik (Hrsg.), *Attention: From Theory to Practice* (S. 239–249). New York: Oxford University Press.
- Wickens, C. & Carswell, C. (2006). Information Processing. In G. Salvendy (Hrsg.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (S. 111–149). Hoboken: John Wiley.
- Wickens, C., Goh, J., Helleberg, J., Horrey, W. & Talleur, D. (2003). Attentional Models of Multitask Pilot Performance Using Advanced Display Technology. *Human Factors*, 45(3), 360–380.
- Wickens, C. & Hollands, J. (2000). *Engineering Psychology and Human Performance*. Upper Saddle River: Prentice Hall.

LITERATURVERZEICHNIS

- Wickens, C. & Horrey, W. (2008). Models of Attention, Distraction, and Highway Hazard Avoidance. In M. A. Regan, J. D. Lee & K. L. Young (Hrsg.), *Driver Distraction: Theory, Effects, and Mitigation* (S. 57–68). Boca Raton: CRC Press.
- Wickens, C., Hyman, F., Dellinger, J., Taylor, H. & Meador, M. (1986). The Sternberg Memory Search Task as an Index of Pilot Workload. *Ergonomics*, 29(11), 1371–1383.
- Wickens, C., Lee, J., Liu, Y. & Becker, S. (2004). *An Introduction to Human Factors Engineering*. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall.
- Wickens, C. & McCarley, J. (2008). *Applied Attention Theory*. Boca Raton: CRC Press.
- Wierwille, W. & Connor, S. (1983). Evaluation of 20 workload measures using a psychomotor task in a moving-base aircraft simulator. *Human Factors*, 25(1), 1–16.
- Wikipedia. (2009a). *Avionik – Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. (Online; Stand 31. Dezember 2009)
- Wikipedia. (2009b). *Waffensystemoffizier – Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. (Online; Stand 31. Dezember 2009)
- Williges, R., Williges, B. & Fainter, R. (1989). Software interfaces for aviation systems. In E. Wiener & D. Nagel (Hrsg.), *Human Factors in Aviation* (S. 463–493). San Diego: Academic Press.
- Wilschut, E. S., Rinkenauer, G., Brookhuis, K. & Falkenstein, M. (2008). Effects of Visual Search Task Complexity on Lane Change Task Performance . In *European Conference on Human Centered Design for Intelligent Transport Systems* (S. 23–32). Lyon, France.
- Wojciechowski, J. (2004). *Validation of Improved Research Integration Tool (IM-PRINT) Driving Model for Workload Analysis*. ARL-TR-3145. Army Research Laboratory.
- Wolfe, J. M. (1998). Visual search. In H. Pashler (Hrsg.), *Attention* (S. 13–59). London: University College London Press.
- Yee, S., Nguyen, L., Green, P., Oberholtzer, J. & Miller, B. (2009). *Visual, auditory, cognitive, and psychomotor demands of real in-vehicle tasks*. Technical Report

LITERATURVERZEICHNIS

UMTRI-2006-20. Ann Arbor: University of Michigan Transportation Research Institute.

Zimmer, A. (2003). Über die Ergonomie hinaus – Neue Wege zu einer menschengerechten Technikgestaltung. In J. Kubitzki (Hrsg.), *Der sichere Fahrer – ein Mythos? Erreichtes und Strittiges auf dem Gebiet der Verkehrssicherheit* (S. 75–83). Köln: TÜV-Verlag.