

Untersuchung zur Auswahl von Eingabeelementen für Großflächendisplays in Flugzeugcockpits

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Johannes Paul Kellerer
aus Mainburg i. d. Hallertau

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf

Mitberichterstatter: Prof. Dr. phil. Alf Zimmer

Tag der Einreichung: 24.02.2010

Tag der mündlichen Prüfung: 27.04.2010

Darmstadt 2010

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand in der Abteilung *Human Factors Engineering* der EADS Deutschland GmbH in Manching. Für die Möglichkeit des Promotionsstipendiums möchte ich der EADS Deutschland GmbH und ganz besonders Herrn Dr. Peter Sandl sowie allen Mitarbeitern der Abteilung *Human Factors Engineering* der EADS MAS in Manching für die unermüdliche Unterstützung und Freundschaft danken. Darüber hinaus gilt mein besonderer Dank den Testpiloten der EADS und der WTD 61 in Manching sowie allen weiteren Versuchspersonen für ihre bereitwillige und hoch motivierte Teilnahme an den durchaus langwierigen und erschöpfenden Interviews und Versuchsdurchläufen.

Herzlich möchte ich auch Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf, dem Leiter des Instituts für Flugsysteme und Regelungstechnik, als Erstreferent und Prof. Dr. phil. Alf Zimmer, Leiter des Lehrstuhls für Angewandte und Allgemeine Psychologie an der Universität Regensburg, als Korreferent für ihre Unterstützung und Betreuung meiner Arbeit danken.

Mein außerordentlicher Dank gilt meinem Kollegen Armin Eichinger, mit dem ich gemeinsam drei Jahre lang an dem Forschungsvorhaben *Panoramic Displays* arbeiten durfte und dem ich alles Gute auf seinem weiteren Lebensweg wünsche. Darüber hinaus möchte ich mich ganz herzlich bei allen Praktikanten, Diplomanden und Master Studenten für ihre oftmals weit über das notwendige Maß hinaus reichende Mitarbeit und ihr Engagement bedanken.

Zuletzt möchte ich meiner Familie für die grenzenlose Hilfe, Unterstützung und Wegbegleitung während meiner gesamten Ausbildung und meiner Freundin Melanie, die mir während der ganzen Zeit meiner Arbeit selbstlos und liebevoll zur Seite stand, danken.

Johannes Kellerer

Freising den 04.05.2010

Zusammenfassung

Das Cockpit moderner Flugzeuge ist eine komplexe Arbeitsumgebung mit vielschichtigen Aufgabengebieten und Belastungskomponenten. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass durch intensive Arbeiten im Bereich der ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung und durch Änderungsmaßnahmen der Mensch-Maschine-Schnittstelle im Flugzeugcockpit erhebliche Verbesserungen der Leistungsfähigkeit wie auch eine Reduzierung der Belastung des Operators erzielt werden können.

In dieser Arbeit wird die Bedienleistung von Touchscreen und Trackball für Eingaben auf einem Großflächendisplay für die Anwendung in hochagilen Flugzeugen untersucht. Zentraler Punkt der Untersuchung ist die Quantifizierung der Bedienleistung der betrachteten Eingabeelemente für die im Flugzeugcockpit herrschende Aufgaben- und Belastungsstruktur. Die Interaktion mit dem Großflächendisplay wurde dabei durch Zeigeaufgaben abgebildet. Die variable Belastungssituation wurde durch verschiedenartige Zusatzaufgaben repräsentiert, die im Versuch simultan mit den Zeigeaufgaben bearbeitet werden mussten. Die Inhalte der unterschiedlichen Aufgaben wurden in einer umfassenden Aufgaben- und Belastungsanalyse am Beispiel eines konkreten Flugzeugmusters ermittelt. Die Flugzeugdynamik und deren Auswirkungen auf die Eingabeleistung des Piloten wurden durch die Analyse vorliegender Flugdaten berücksichtigt. Die Datenerhebung fand ausschließlich mit fliegendem Personal unterschiedlicher Erfahrungsstufen statt, wobei ein Großteil der Versuchspersonen Testpiloten militärischer Flugzeugmuster mit mehr als 3000 Flugstunden sind und daher Expertenstatus besitzen.

Die Leistungsunterschiede zwischen den betrachteten Bedienelementen Touchscreen und Trackball sind in den unterschiedlichen Kombinationen aus Zeige- und Zusatzaufgaben erwartungskonform. Die Verwendung des Touchscreens führt, verglichen mit dem Trackball, zu erheblich kürzeren Bedienzeiten bei einem gleichzeitig sehr hohen Erfüllungsgrad der Zeigeaufgabe und wirkt sich darüber hinaus positiv auf die Leistung in der Zusatzaufgabe aus. Auf Grundlage der Versuchsergebnisse ist im Rahmen dieser Untersuchung kein Genauigkeitsunterschied zwischen den beiden Bedienelementen zu erwarten.

Die Zeige- und Zusatzaufgaben bzw. der Belastungskontext wurde von den Piloten als sehr repräsentativ bewertet. Die Bedienfeldgrößen der quadratischen Ziele in den Zeigeaufgaben, mit einer Aktivierungsfläche von 17 mm Kantenlänge, wurden von den Versuchspersonen als ausreichend groß und die gewählte optische Rückmeldung sehr positiv bewertet.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse dieser Usability-Untersuchung klare Leistungsunterschiede in Zeige- und Zusatzaufgaben in Abhängigkeit vom in der Zeigeaufgabe verwendeten Bedienelement. Es ist in den meisten Fällen ein eindeutiger Leistungsvorteil des Touchscreens erwartungskonform für alle Kombinationen aus Zeige- und Zusatzaufgaben erkennbar. Treten bei der gleichzeitigen Bearbeitung Interferenzen zwischen Zeige- und Zusatzaufgabe auf, so führt dies bei der Verwendung des Trackballs zu deutlicheren Leistungseinbußen als beim Touchscreen. Der Trackball wird von den Piloten besser bewertet als das derzeit im Eurofighter befindliche indirekte CCE, der XY-Controller. Es ist daher neben der Empfehlung, den Touchscreens als primäres Bedienelement zu verwenden, eine Kombination aus Touchscreen und Trackball ratsam. Dadurch wird ein leistungsstarkes und redundantes Bedienkonzept erreicht, das zudem alle Kriterien des HOTAS bzw. VTAS Konzepts erfüllt.

Abstract

The cockpit of modern aircraft is a complex working environment with various tasks and work load components. The results of this study show, that intensive work within the field of human factors engineering and modification measures of the human-machine-interface in aircraft cockpits can significantly improve operators' performance and reduce work load respectively. In this study control performance of a touch screen and trackball control interface is investigated with respect to their application with panoramic displays in highly agile aircraft cockpits.

Crucial point of this investigation is the quantification of control performance of the above mentioned control devices in consideration of representative task and work load context of fighter aircraft cockpits. The interaction with panoramic displays is represented by pointing tasks. The variable work load environment will be displayed by different additional tasks. Pointing and additional tasks have to be executed simultaneously during the test runs. The contents of the tasks were elaborated within a vast task and work load analysis with respect to a concrete aircraft type. Aircraft dynamics and their impact on pilots' control performance were considered by an analysis of representative flight data.

The test runs were all performed by flying personnel of all levels of expertise, whereas the bulk of the test subjects were test pilots of fighter aircraft and had therefore expert status with more than 3000 flying hours.

The performance differences between touch screen and trackball interaction in the various combinations of pointing and additional tasks are according to our expectations and the hypotheses. The touch screen usage leads, compared to the trackball, to considerable shorter interaction times and concurrently to extensive higher task completion of the pointing tasks and affects the performance of the additional tasks positively as well. Based upon the results of this study no accuracy difference between the two control devices could be observed in the pointing task.

Pointing and additional tasks as well as the resulting work load context were assessed as very representative by the subjects. The square activation size of the pointing targets (edge length = 17 mm) and the according feedback were judged as sufficient.

In summary the results of this usability study show distinct dependency of performance differences in pointing and additional tasks with respect to the operating control device of the pointing task. In most task combinations a significant performance advantage of the touch screen can be observed. Occur interferences between the simultaneously operated pointing and additional task the negative impacts on task performance and completion are considerable less severe by using the touch screen, compared with the trackball. All the same, the pilots preferred the trackball in comparison with the Eurofighter's current cursor control element, the XY-controller. Therefore we suggest the touch screen as primary control element for panoramic displays in fighter aircraft in combination with an additional trackball, sited in the throttle top. Thus a high-performance control concept can be achieved, with full HOTAS and VTAS compatibility.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung	Abkürzung	Erklärung
A/S	Air-to-Surface Attack	ISO	International Organization for Standardization
Abb.	Abbildung	Kap.	Kapitel
AG	Aktiengesellschaft	LCD	Liquid Crystal Display
AVI	Aviate	MAS	Military Air Systems
Bsp.	Beispiel	MFD	Multi-Functional-Display
CAP	Combat Air Patrol	MFHDD	Multi-Functional-Head-Down-Display
CCE	Cursor Control Element	MT	Multiple & Moving Targets
COM	Communicate	NASA-STD	National Aeronautics and Space Administration Standard
CRT	Cathod Ray Tube	NASA TLX	NASA Task Load Index
CWP	Cockpit Workload Profile	NAV	Navigate
DEP	Design Eye Point	NSRP	Neutral Seat Reference Point
DIN	Deutsches Institut für Normung	PA	Pilot Awareness
DVI	Direct Voice Input	RM	Route Management
EADS	European Aeronautic Defence and Space Company	SDP	Schulterdrehpunkt
FAOR	Forward Area of Own Responsibility	SE	Standard Error
FFT	Fast Fourier Transform	sog.	sogenannt
FTIR	Frustrated Total Internal Reflection	ST	Single Targets
HMD	Helmet Mounted Display	SYS	Manage Systems
HMI	Human Machine Interface	Tab.	Tabelle
HOLDIS	Holographic Displays	TAC	Manage Tactics
HOTAS	Hands on Throttle and Stick	TB	Trackball
HTA	Hierarchical Task Analysis	TLX	Task Load Index
HUD	Head Up Display	TS	Touchscreen
MV	Mean Value	vgl.	vergleiche
HUP	Head Up Panel	VTAS	Voice Throttle and Stick
IR	Infrarot	WTD	Wehrtechnische Dienststelle

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1.	Motivation	1
1.2.	Ziele	3
1.3.	Aufbau der Arbeit	3
2.	Mensch-Maschine Interaktion in Flugzeugen.....	5
2.1.	Anzeigen und Interaktion in aktuellen hochagilen Flugzeugen	5
2.1.1.	Displays und Bedienelemente	5
2.1.2.	Informationsanzeige und Eingabefunktionalität	7
2.1.3.	Problematik bestehender Displaysysteme	8
2.2.	Großflächendisplays	9
2.2.1.	Grundlagen	9
2.2.2.	Anzeigekonzept	10
2.2.3.	Bedienkonzept.....	12
2.3.	Berührempfindliche Anzeigen in Flugzeugen	14
2.3.1.	Technologie	14
2.3.2.	Bisherige Anwendungen in Flugzeugcockpits.....	15
2.3.3.	Eigenschaften der Touchscreenbedienung.....	16
2.3.4.	Aktivierungsflächen	18
2.3.5.	Rückmeldung	19
2.4.	Psychologische Untersuchungsgrundlagen	22
2.4.1.	Usability-Untersuchung	22
2.4.2.	Menschliche Informationsverarbeitung	24
2.5.	Hypothesen	27
3.	Großflächendisplays in hochagilen Flugzeugen.....	29
3.1.	Auswahl eines Flugzeugmusters.....	29
3.2.	Cockpitbeschreibung	30
3.2.1.	Neue Displaykonfiguration	30
3.2.2.	Bedienelemente	34
3.2.3.	Anthropometrie.....	35
3.3.	Analyse der Eingabehandlungen des Piloten.....	38
3.3.1.	Aufgabenspektrum	38
3.3.2.	Belastungsstruktur.....	40
3.4.	Flugdynamik hochagiler Flugzeuge.....	44
3.4.1.	Klassifizierung der Beschleunigungen im Cockpit.....	44
3.4.2.	Beschleunigungsspektrum - Analyse von Flugdaten	46
3.5.	Einfluss von Beschleunigungen auf die Bedienleistung des Piloten	49
3.5.1.	Leistungsfähigkeit des Menschen in bewegter Umgebung	49
3.5.2.	Antwortverhalten des Hand-Arm-Systems auf mechanische Schwingungen.....	52
4.	Evaluation der Bedienelemente	59
4.1.	Experimentelles Vorgehen	59

Inhaltsverzeichnis

4.2.	Versuchsbeschreibung.....	62
4.2.1.	Zeigeaufgaben	62
4.2.2.	Zusatzaufgaben.....	66
4.2.3.	Ablauf	72
4.3.	Instrumente und Messgeräte	74
4.3.1.	Versuchsumgebung	74
4.3.2.	Software	76
4.3.3.	Fragebögen	76
4.4.	Stichprobenkonstruktion	77
4.5.	Untersuchungsdurchführung.....	77
4.6.	Datenerhebung und Analyse	78
5.	Ergebnisse und Diskussion.....	81
5.1.	Stichprobenbeschreibung.....	81
5.2.	Versuch 1: Single Targets.....	81
5.2.1.	Leistung in der Zeigeaufgabe	81
5.2.2.	Leistung in den Zusatzaufgaben	88
5.2.3.	Diskussion	94
5.3.	Versuch 2: Multiple & Moving Targets	99
5.3.1.	Leistung in der Zeigeaufgabe	99
5.3.2.	Leistung in den Zusatzaufgaben	105
5.3.3.	Diskussion	111
5.4.	Belastungsstruktur.....	117
5.4.1.	Zeigeaufgaben	117
5.4.2.	Eindimensionale Zusatzaufgaben	118
5.4.3.	Mehrdimensionale Zusatzaufgabe	123
5.5.	Nutzerzufriedenheit	125
5.5.1.	Standardisierte Fragebögen	126
5.5.2.	PanDis-Usability Fragebogen	129
5.6.	Hypothesenprüfung.....	130
6.	Zusammenfassung und Ausblick.....	133

1. Einleitung

1.1. Motivation

Die intensive Nutzung des Flugzeuges zum Transport von Menschen und Gütern aller Art und die damit einhergehende Optimierung der Fluggeräte zur Erfüllung dieses Zwecks hat seit dem Anfang der kommerziellen Verwendung des Flugzeugs bis in die Neuzeit die Transportkapazität der Flugzeuge wie auch das Flugaufkommen extrem ansteigen lassen (Klingauf & Azzam, 2008). Die Flugzeuge werden mit immer mehr Funktionen ausgestattet, die einen effizienten und sicheren Flugbetrieb gewährleisten müssen. Das Cockpit als Kommunikationsschnittstelle zwischen Pilot und Flugzeug macht diese Funktionen dem Operateur zugänglich. Die Qualität der Mensch-Maschine-Schnittstelle wirkt sich daher direkt auf die Leistungsfähigkeit des Flugzeuges aus. Finden Erweiterungen des Funktionsumfangs des Flugzeuges statt, durch die eine Einflussnahme des Piloten auf das Flugzeug oder den Flugbetrieb notwendig wird, führt dies zu Änderungen der Anzeigen und Bediengeräte im Cockpit. Es sind somit ständige Integrations- und Optimierungsmaßnahmen des Cockpits notwendig.

Das sukzessive Anpassen der Cockpits an neue Funktionalitäten zeigt sich vor allem in der geschichtlichen Entwicklung der Cockpitanzeigen und Bediengeräte. Mit der Einführung des Computers und verbesserter Sensoren gegen Ende der 70er Jahre nahm die Funktionalität des Flugzeuges, aber auch die Anzahl der verfügbaren und darstellbaren Informationen deutlich zu (Adam et al., 1986). Diese Informationsflut konnte mit den damals üblichen Anzeigegeräten für den Piloten nicht mehr nutzbar gemacht werden. Multifunktionsdisplays ermöglichten an dieser Stelle die gleichzeitige Darstellung verschiedener Informationen auf einem Anzeigegerät sowie die zeitliche Variation des Inhalts dieser Anzeige. Aus wenigen analogen Rundinstrumenten zu Beginn der Luftfahrt zu Anfang des 20. Jahrhunderts haben sich im Laufe der Zeit komplexe Cockpitschnittstellen entwickelt, die dem Piloten eine Vielzahl an Informationen zur Verfügung stellen und unterschiedlichste Bedienaktionen ermöglichen.

Die Displayfläche und die Anzahl der darauf darzustellenden Informationen hat seitdem stetig zugenommen. Größere Displayflächen ermöglichen nicht nur die Anpassung der Anzeige an eine ständig wachsende Informationsmenge, sondern auch die kontextabhängige Integration von Informationsgruppen zur intuitiven Darstellung aller wichtigen Informationen (Wickens, 2003). Adam (1991) sieht in der Zusammenfassung von Informationsgruppen auf einem Display und der Verwendung möglichst großflächiger und variabel belegbarer Anzeigegeräte die Möglichkeit einer deutlichen Verbesserung der Informationsaufnahme und des Situationsbewusstseins der Piloten sowie eine erhebliche Steigerung des Leistungspotentials von Pilot und Flugzeug. Er prognostizierte Anfang der 90er Jahre auf Grundlage seiner Arbeiten zu diesem Thema eine weitere Zunahme der Displayfläche der Cockpitanzeigen, die letztendlich zu der Verwendung einer einzigen großflächigen Anzeige im Bereich des Hauptinstrumentenbretts moderner Flugzeugcockpits führt (Adam, 1994).

Heutige Displaytechnologien besitzen erstmalig seit den Arbeiten von Adam das Potential der Realisierung solcher Großflächendisplays. Da diese Anzeigen bisher in keinem Flugzeugmuster zur Serienreife gebracht wurden, stellen sich grundlegende Fragen zur Gestaltung der Informationsdarstellung und der Interaktion auf und mit solchen Displaygeräten.

Adam (1991) führte umfangreiche Untersuchungen zur Anwendung eines Großflächendisplays in hochagilen Flugzeugen durch und gibt damit wichtige Anhaltspunkte für eine optimierte Darstellung von Information auf großflächigen Anzeigegeräten. Er diskutiert auch die Verwendung möglicher Bediengeräte wie etwa Touchscreens, die sich besonders für die Interaktion mit Großflächendisplays eignen. Konkrete Hinweise für deren Verwendung finden sich jedoch an dieser Stelle nicht (Schwartz & Adam, 1987; Joss, 1987). Buxton (2007) kommentiert die Entwicklung von Bediengeräten und Interaktionskonzepten im Allgemeinen wie folgt:

„To significantly improve a product by a given amount, it probably takes about two more orders of magnitude of cost, time and effort to improve the display as to get the same amount of improvement on input. Why? Because we are ocular centric, and displays are therefore much more mature.“ Bill Buxton (2007)

Befasst man sich also mit der Erstellung eines Anzeigeconzeptes für neuartige Anzeigen, ist nach Buxton (2007) eine Bearbeitung des korrespondierenden Bedienconzeptes ratsam, da dadurch mit vergleichsweise geringem Aufwand eine Verbesserung der Schnittstelle erreicht werden kann. Betrachtet man die Eingabemittel in modernen Flugzeugen, so finden sich bis heute im Bereich des Hauptinstrumentenbrettes mit Drehreglern, Kipp- und Druckschaltern noch immer die gleichen Bediengeräte wie schon in den 70er Jahren. Eine eingehende Untersuchung möglicher Eingabegeräte für die Interaktion mit Großflächendisplays ist daher im Hinblick auf weitreichende Änderungen des Anzeigeconzeptes wichtig. Dies gilt vor allem dann, wenn die Einrüstung großflächiger Displays aufgrund der begrenzten Fläche des Hauptinstrumentenbrettes keinen Platz mehr für herkömmliche Bedienelemente bietet (Adam et al., 1986).

Es stellt sich daher die grundlegende Frage, welche Bediengeräte sich für die Interaktion mit Großflächendisplays besonders eignen. Zur Feststellung dieser Eignung muss zunächst der Einfluss des Bediengeräts auf die Leistungsfähigkeit von Mensch und Maschine im Aufgabenkontext des Piloten im Flugzeugcockpit quantifiziert werden. Durch den Vergleich der Bedienleistung unterschiedlicher Bediengeräte und Eingabevarianten lässt sich für verschiedene Eingabehandlungen das leistungsstärkste Bediengerät auswählen. Die Interaktion kann dann durch die geeignete Auswahl eines oder gegebenenfalls durch die Kombination mehrerer Bediengeräte leistungsgerecht optimiert werden.

Von Adam et al. (1986) wird der Touchscreen als primäres Bediengerät für die Interaktion mit Großflächendisplays vorgeschlagen. Der Touchscreen besitzt nach Kerschenlohr (2007) diverse Vorteile, die seine Wahl als primäres Bedienelement für großflächige Anzeigen unterstützen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Leistungsfähigkeit des Touchscreen und verschiedener Bedienelementalternativen betrachtet, um ein breites Entscheidungsfundament für die Auswahl von Bedienelementen bzw. deren Kombination für Großflächendisplays in hochagilen Flugzeugen zur Verfügung zu stellen.

1.2. Ziele

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Schaffung einer Entscheidungsgrundlage für die Auswahl leistungsstarker Bedienelemente für die Interaktion mit Großflächendisplays in modernen hochagilen Flugzeugen. Diese Arbeit liefert eine Übersicht des Leistungsspektrums der untersuchten Bediengerätalternativen. Dazu wird die Leistung der Bediengeräte für unterschiedliche Eingabehandlungen im Cockpit anhand üblicher Usability-Maße quantifiziert und gleichzeitig die Auswirkungen der Bediengeräte auf die Bedienleistung weiterer Aufgaben des Piloten im Cockpit erhoben. Auf Grundlage dieser Untersuchungsdaten werden die Bediengeräte miteinander verglichen und eine Empfehlung für die Auswahl von Interaktionsgeräten ausgesprochen. Eine detaillierte Beschreibung des Handlungskontextes sollte die Interpretation der Leistungsdaten und deren Übertragbarkeit auf beliebige Flugzeugmuster gewährleisten. Es findet dazu eine eingehende Analyse der Handlungen und der Belastung des Piloten im Cockpit am Beispiel eines repräsentativen Flugzeugmusters statt, wodurch die Erhebung der Daten in einem möglichst realistischen Untersuchungskontext sichergestellt wird.

1.3. Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden die Grundlagen der Mensch-Maschine Interaktion in modernen Flugzeugen zusammengefasst und die Verwendung großflächiger Displays und berührungsempfindlicher Anzeigeflächen in den Cockpits moderner Flugzeuge erörtert. Daran schließt sich basierend auf psychologischen Handlungsmodellen eine Leistungsprognose für die beiden betrachteten Bedienelemente Touchscreen und Trackball sowie die Herleitung der Hypothesen dieser Arbeit an. In Kapitel 3 wird zunächst ein repräsentatives Flugzeugmuster ausgewählt. Anhand dieses Flugzeugmusters werden relevante Randbedingungen der Anthropometrie, des Aufgabenspektrums des Piloten und der Belastungsstruktur sowie der Flugdynamik im Cockpit dokumentiert, analysiert und die Auswirkungen auf die Verwendung von Großflächendisplays und die Interaktion mit diesen Anzeigen hinsichtlich der betrachteten Bedienelemente zusammengefasst. Auf dieser Grundlage wird in Kapitel 4 das Untersuchungsdesign hergeleitet. Die Evaluationsversuche, die sich in Zeige- und Zusatzaufgaben aufteilen, werden wie auch der Versuchsaufbau und die eigentliche Datenerhebung eingehend beschrieben. In Kapitel 5 werden die Versuchsergebnisse dokumentiert und interpretiert und im Rahmen der Überprüfung der Hypothesen zusammengefasst. Kapitel 6 gibt einen Überblick über das Vorgehen und die grundlegenden Ergebnisse der Arbeit. Abb. 1-1 fasst die inhaltliche Abfolge und Struktur des Untersuchungskonzepts zusammen und stellt eine Beziehung der Arbeitsschritte zu den Kapiteln dieser Arbeit her.

Kapitel 1 · Einleitung

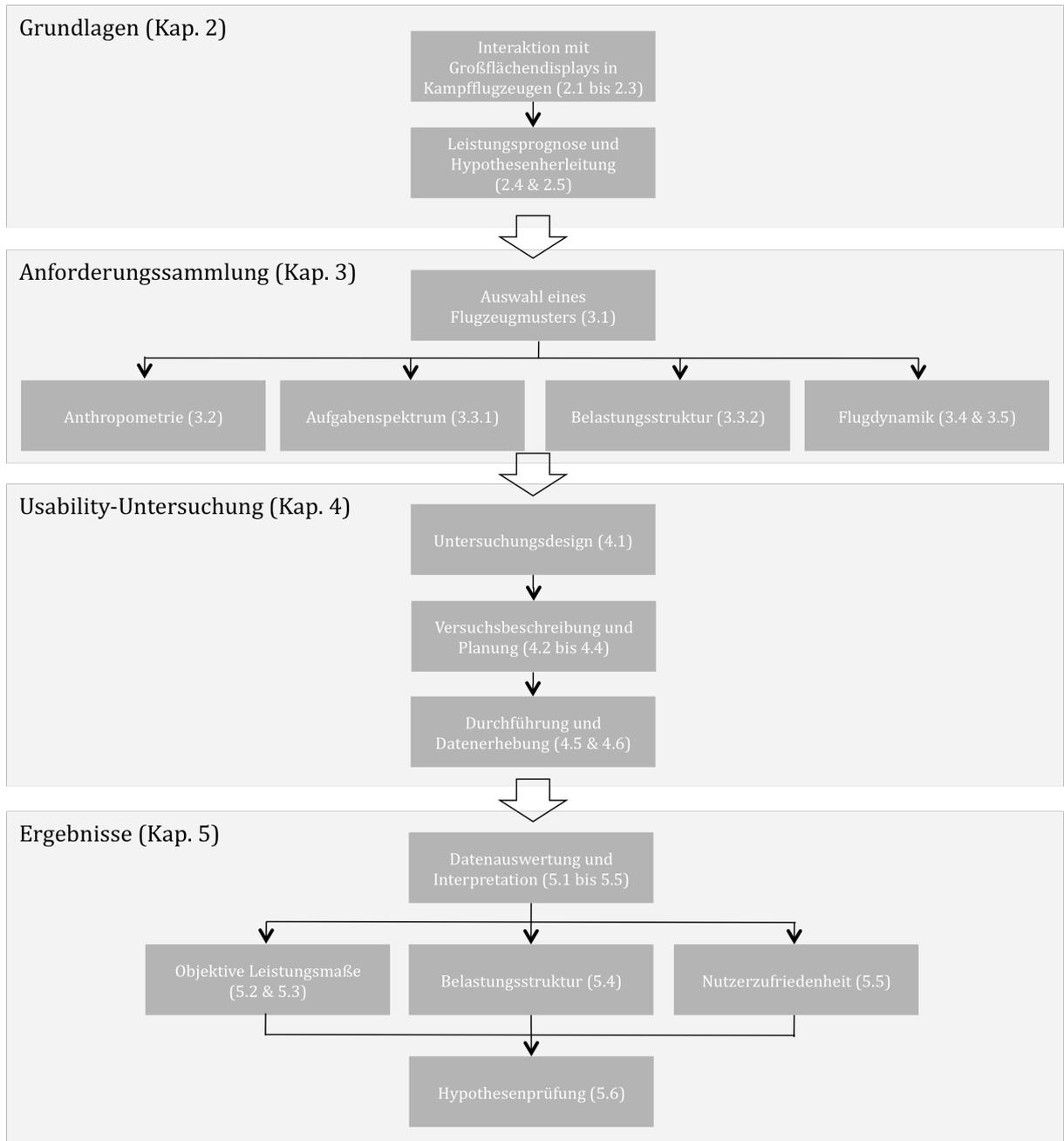


Abb. 1-1: Inhaltliche Struktur und Abfolge aller wesentlichen Arbeitsschritte dieser Untersuchung mit der Verknüpfung der Arbeitspakete in die Gliederung dieses Dokuments.

2. Mensch-Maschine Interaktion in Flugzeugen

2.1. Anzeigen und Interaktion in aktuellen hochagilen Flugzeugen

2.1.1. Displays und Bedienelemente

Die Kommunikation zwischen Pilot und Flugzeug findet über Anzeigen und Bedienelemente, zusammengefasst unter dem Begriff „Human-Machine-Interface“ (HMI), statt. Die Cockpits der Flugzeugmuster Eurofighter *Typhoon*, Lockheed Martin *F-35 Joint Strike Fighter Lightning II*, Suchoi *Su-35 Flanker E* und Lockheed Martin *F-22 Raptor* repräsentieren den Entwicklungsstand aktueller militärischer Flugzeugcockpits der vierten und fünften Generation (vgl. Abb. 2-1) und dienen daher als Grundlage für die Analyse aktueller militärischer Flugzeugcockpits (Jukes, 2004; Jarrett, 2005).



Abb. 2-1: Übersicht der aktuellen Cockpits moderner hochagiler Flugzeuge.
1: Eurofighter *Typhoon* (Net Ressources International, 2009a),
2: *F-35 Joint Strike Fighter Lightning II* (Aeroteam, 2009),
3: *Su-35 Flanker E* (Sukhoi, 2009),
4: *F-22 Raptor* (Wollenhaupt, 2009).

Die Anzeige- und Bedienelemente in diesen Cockpits unterscheiden sich in ihrer Gestalt und der Position im Cockpit. Sie lassen sich dennoch aufgrund ihrer Funktionsweise in deutlich abgrenzbare Gruppen einteilen. Eine erste Unterteilung erfolgt nach der Unterscheidung zwischen Anzeige- und Bedienelement. Es gibt zunächst Geräte die exklusiv zur Informationsanzeige (vgl. Abb. 2-2:2) oder zur Bedienung von Funktionen (vgl. Abb. 2-2:3) verwendet werden. Zugleich treten

Mischformen auf, die Anzeige und Bedienung in sich vereinen, z.B. Druckschalter mit variabler Beschriftung, Fahrwerkshebel und Kippschalter (vgl. Abb. 2-2:4, 5a, 5b). Die Displays lassen sich in optische, haptische und auditive Displays gliedern, die eine oder mehrere Informationen gleichzeitig anzeigen. Ähnliches gilt für die Bedienelemente. Sie unterscheiden sich in der Anzahl der bedienbaren Funktionen, deren Dimension (ein/aus, mehrere Zustände) sowie in der Art der Bedienung, die motorisch etwa mit Steuerknüppel und Druckschaltern oder verbal durch Spracheingabe erfolgen kann.

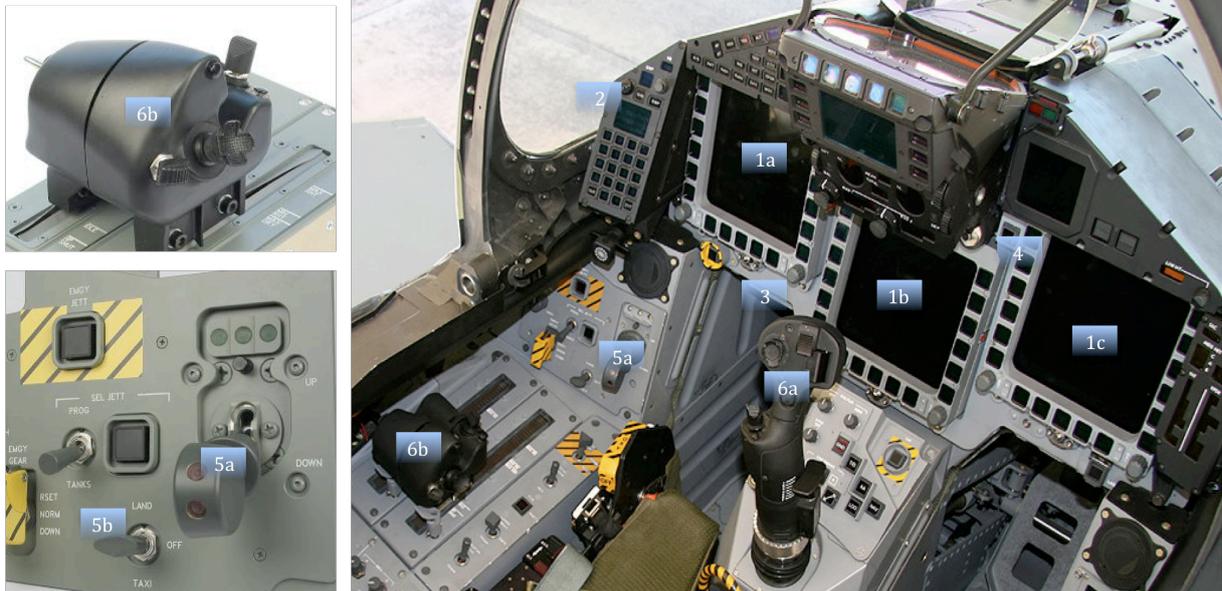


Abb. 2-2: Anzeige- und Interaktionsgeräte im Eurofighter-Cockpit rechts im Überblick (Airliners, 2009) und links im Detail (Reiser, 2009).

- 1a, b, c: linkes, mittleres und rechtes Multi-Functional-Display (MFD),
- 2: Read-Out-Lines auf Daten-Eingabe-Panel,
- 3: Drehregler zur Einstellung der Helligkeit der MFDs,
- 4: Druckschalter mit variabler Beschriftung,
- 5a: Fahrwerkshebel,
- 5b: haptisch kodierter Kippschalter,
- 6a: Steuerknüppel,
- 6b: Schubhebel mit XY-Controller zur Cursorpositionierung auf den MFDs.

Die folgende Betrachtung bezieht sich auf die Bedienfunktionen und Informationsdarstellungen im Bereich des Hauptinstrumentenbretts. In den betrachteten Flugzeugmustern beschränkt dies die Auswahl an möglichen Anzeigen auf visuelle Multifunktionsdisplays (vgl. Abb. 2-2:1a-c), zeilenbasierte alphanumerische Ausgaben (vgl. Abb. 2-2:2) und analoge kreisförmige Anzeigen, die seit jeher in der Luftfahrt Anwendung finden. Als Multifunktionsdisplays werden in diesem Zusammenhang Anzeigen bezeichnet, auf denen simultan unterschiedliche Einzelinformationen und Informationsgruppen wie Flughöhe, Rollwinkel oder Wegpunktlisten und Routeninformation angezeigt werden können. Sie besitzen zusätzlich die Möglichkeit, sequentiell in verschiedenen Formaten unterschiedliche Inhalte darzustellen. Der Begriff Format beschreibt hierbei einen festgelegten Satz an Informationen und dessen gleichzeitige Darstellung auf dem Multifunktionsdisplay. Je nach Displaygröße nimmt ein Format die gesamte Displayfläche oder einen Teil davon ein.

Die Gruppe der motorischen Bedienelemente umfasst unterschiedliche Arten von Drehreglern, Druck- und Kippschaltern und Geräte zur Positionierung des Cursors auf den Anzeigegeräten (vgl. Abb. 2-2). Die Druckschalter teilen sich auf in Schalter mit einer festen Funktion und multifunktionalen Druckschaltern, die bei Betätigung abhängig vom Systemzustand unterschiedliche Funktionen auslösen. Kippschalter können mehrere Zustände einnehmen und werden in verschiedenen mechanischen Ausführungen verwendet. Zur Positionierung des Cursors auf den Multifunktionsdisplays und zur Interaktion mit den darauf dargestellten Informationen bzw. zur Bedienung der abgebildeten Funktionen werden sog. Cursor Control Elemente (CCE) verwendet. Diese sind in der Regel in militärischen Flugzeugen als kraftsensitive Bedienelemente am Schubhebel als sog. XY-Controller verbaut oder werden in der zivilen Luftfahrt als Trackball oder Touchscreen in das Cockpit integriert.

2.1.2. Informationsanzeige und Eingabefunktionalität

Die Darstellung der Information erfolgt bei den betrachteten Flugzeugmustern hauptsächlich in hoch integrierten Formaten auf den Multifunktionsdisplays. Analoge Anzeigen werden in sehr reduziertem Maß und zur Darstellung sicherheitskritischer Informationen verwendet. Die zeilenbasierte Darstellung alphanumerischer Information ist zumeist an Bedienelemente zur Eingabe von Text und Zahlen gekoppelt.

Die Bedienfunktionalität wird in den betrachteten Cockpits durch multifunktionale Druckschalter, Drehregler und Eingabegeräte zur Cursorpositionierung abgebildet (vgl. Abb. 2-2). Die Druckschalter teilen sich in zwei Gruppen auf, Druckschalter mit einer integrierten Zustandsanzeige auf dem Schalter und Schalter mit einer Darstellung der aktuellen Schalterstellung in einem angrenzenden Display. Beide Arten von Druckschaltern arbeiten mechanisch und verfügen über einen haptischen Druckpunkt, der dem Benutzer den Zeitpunkt der Befehlsübergabe an das System anzeigt (MIL-STD-1472F, 1999). Die Rückmeldung der ausgelösten Systemänderung wird visuell auf dem entsprechenden Display angezeigt. Drehregler dienen zur Einstellung von Helligkeit und Kontrast der Displays, zur Eingabe von Zahlenwerten und zur Auswahl von Listenelementen. Bei den Eingabeelementen zur Cursorpositionierung unterscheidet man zwischen indirekten Bedienelementen wie XY-Controller am Schubhebel oder Trackball und direkten Bedienelementen wie etwa dem Touchscreen (Wickens et al., 2004). Die Position des Touchscreens ist durch die Position der zugehörigen Anzeigegeräte vorgegeben. Der Trackball kann ebenfalls in den Schubhebel integriert werden oder entsprechend der anthropometrischen Anforderungen im Cockpit positioniert werden (Diehl Aerospace, 2009).

Bei der Auslegung des Cockpits werden die Gestaltungsphilosophien „Hands On Throttle And Stick“ (HOTAS) bzw. seit Verwendung der Spracheingabe das „Voice, Throttle And Stick“ (VTAS)-Konzept verfolgt (Jarrett, 2005). Ziel dabei ist es, dem Piloten die Möglichkeit zu bieten, die Hände an den primären Flugsteuerungsinstrumenten Steuerknüppel und Schubhebel zu belassen und gleichzeitig alle wichtigen Funktionen im Cockpit bedienen zu können. Dies hat zur Folge, dass eine ganze Reihe unterschiedlicher Bedienelemente in Steuerknüppel und Schubhebel integriert sind. Dabei wird mit jedem dieser Eingabegeräte zumeist eine bestimmte Funktionalität abgebildet, wie etwa die Auswahl eines Waffensystems oder die Aktivierung der Kommunikationseinheit. Bedingt durch den begrenzten Platz auf den Steuerelementen und die zunehmende Anzahl der Funktionen im Cockpit kann nur eine eingeschränkte Anzahl an integrierten HOTAS-Bedien-

elementen auf Steuerknüppel und Schubhebel untergebracht werden. Das CCE ist daher ein wesentlicher Bestandteil der HOTAS- bzw. VTAS-Konzepte, da es die nötige Flexibilität besitzt, mit einer großen Anzahl unterschiedlicher Funktionen auf den Multifunktionsdisplays zu interagieren. In aktuellen Flugzeugcockpits werden verschiedene Funktionen über Druckschalter und Drehregler abgebildet, deren Funktion nicht durch das CCE ausgelöst werden kann. Folglich müssen trotz der Verwendung eines CCE als multifunktionales HOTAS-Bedienelement für bestimmte Bedienhandlungen die Hände von Steuerknüppel oder Schubhebel genommen werden.

Bei der Verwendung von Touchscreens und anderen CCEs besteht die Möglichkeit, dieselben Bedienfunktionen über ein alternatives CCE redundant zu betätigen oder, wie im Fall der *F-18 Super Hornet*, die beiden Bedienalternativen Touchscreen und XY-Controller auf unterschiedlichen Multifunktionsdisplays exklusiv einzusetzen (Hoener & Hardy, 1999). Integriert man beide Bedienelemente könnte man dadurch die Funktionen von mechanischen Schaltern durch virtuelle Bedienelemente abdecken, die dann entweder mit dem Touchscreen oder dem XY-Controller betätigt werden können. Dies würde im Bereich des Hauptinstrumentenbretts eine maximale HOTAS- bzw. VTAS- Funktionalität erlauben.

2.1.3. Problematik bestehender Displaysysteme

Ziel der militärischen Luftfahrt ist es, die Leistungsfähigkeit bestehender Flugzeugsysteme durch die Integration neuartiger und erweiterter Funktionalitäten wie etwa neue Sensoren oder Waffensysteme zu erhöhen und dadurch das Missionsspektrum der Flugzeugmuster zu erweitern. Dies bedeutet einen erweiterten Informations- und Funktionsumfang, der dem Piloten zugänglich gemacht werden muss. Es sind daher Änderungen im Cockpit notwendig. Modifikationen der Displaysoftware und an der Cockpitausrüstung oder -struktur sind im Allgemeinen sehr zeit- und kostenintensiv. Zur Kostenersparnis werden solche Umrüstungen meist gemeinsam in großen zeitlichen Abständen durchgeführt. Dies hat zur Folge, dass die Integration neuer Cockpitfunktionalitäten später erfolgt als technisch möglich. Der technische Vorsprung kann somit nicht optimal ausgenutzt werden. Die Verwendung von multifunktionalen Displays und Bedienelementen bietet aufgrund der Flexibilität solcher Geräte an dieser Stelle die Möglichkeit, neue Funktionen ohne Änderungen der Cockpithardware zu integrieren. Es sind dann alleine Änderungen der Software und die entsprechenden Funktionstests notwendig. Ist die Software ausreichend modular gestaltet, um Änderungen des Displaykonzepts zu unterstützen, kann dies zu einer beträchtlichen Zeit- und Kostenersparnis im Integrationsprozess neuartiger Funktionalitäten führen.

Verfolgt man die Entwicklung der Anzeige- und Bediengeräte in hochagilen militärischen Flugzeugcockpits, so ist seit den 70er Jahren ein Anwachsen der verfügbaren Anzeigefläche von Multifunktionsdisplays sowie eine Reduzierung der Zahl von Anzeigen und Bedienelementen zu erkennen (Sexton, 1988; Hopper, 2000). Dadurch können immer mehr Informationsgruppen in Formaten zusammengefasst und sequentiell auf den Multifunktionsdisplays dargestellt werden. Für die Qualität der Formatanzeige ist die verfügbare Anzeigefläche entscheidend (Wickens & Carswell, 1995; Kellerer, 2006). Eingeschränkte Displayfläche führt bei steigendem Informationsangebot entweder zu einer Fülle von unterschiedlichen Formaten oder zu überfrachteten Displayinhalten, mit dem Resultat einer beeinträchtigten Informationsaufnahme (Wickens & Carswell, 1997). Die Konsequenz hieraus ist eine Maximierung der Anzeigefläche von Multifunktionsdisplays in Flugzeugcockpits durch die Verwendung von Großflächendisplays. Bedienelemente wie Druckknöpfe

und Drehregler nehmen durch ihre physikalischen Eigenschaften einen beträchtlichen Anteil der Fläche des gesamten Hauptinstrumentenbretts ein. Sie bieten zudem eine begrenzte Flexibilität bei der Erweiterung der Funktionalität der Cockpitanzeigen und Bediengeräte. Mit der Verwendung von großflächigen Anzeigegeräten ist daher auch gleichermaßen eine Anpassung der Bedienelemente verbunden.

Die Entwicklung der Anzeigen moderner hochagiler Flugzeuge strebt offensichtlich auf die Verwendung großflächiger Multifunktionsdisplays zu, die ein hohes Maß an Flexibilität und Anzeigefläche für Änderungen des Anzeigesystems und die Integration weiterer Informationen und Funktionalitäten ermöglichen. Bestes Beispiel hierfür ist das momentan aktuellste militärische Displaykonzept eines hochagilen Flugzeuges, der F-35 *Joint Strike Fighter* Lightning II von Lockheed Martin (Net Resources International, 2009b).

2.2. Großflächendisplays

2.2.1. Grundlagen

Die Verwendung großflächiger Multifunktionsdisplays bietet aufgrund geringer systemtechnischer und geometrischer Beschränkungen ein hohes Maß an Flexibilität bei der Belegung der Anzeigefläche. Basierend auf grundlegenden Gestaltungsrichtlinien für Cockpitanzeigen wie Funktionalität, Erlernbarkeit, Steuerbarkeit, Fehlerrobustheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Individualisierbarkeit und Erwartungskonformität (DIN EN 9241-110, 2006) oder den bei Wickens (2003) vorgestellten Prinzipien *Legibility, Information Need, Integration & Proximity, Moving Part* und *Predictive Aiding* ist bei der Gestaltung der Informationsdarstellung darauf zu achten, alle notwendigen Informationen nach ihrer Zugehörigkeit zu gruppieren und übersichtlich darzustellen (Wickens & Carswell, 1995; Wickens, 2003). Ziel sollte dabei nicht die Anzeige möglichst vieler Informationen in wenigen hoch integrierten Formaten, sondern vielmehr eine möglichst intuitive und einfach zu interpretierende Darstellung der momentan vom Piloten benötigten Information sein. Verglichen mit mehreren kleineren multifunktionalen Anzeigen derselben Gesamtfläche und Bildschirmauflösung erlaubt ein Großflächendisplay eine besonders übersichtliche und leicht interpretierbare Darstellung wichtiger Information (Adam, 1991; Furness, 1986; Weghorst & Furness, 1996; Kellerer, 2006).

Großflächige Anzeigen werden in verschiedenen Bereichen wie Werbung oder Unterhaltung eingesetzt. Eine konkrete Verwendung von Großflächendisplays in hochagilen Flugzeugen wird erstmals bei Adam et al. (1986) vorgeschlagen. Anhand von Konzept- und Anforderungsvorschlägen wird an dieser Stelle der Begriff „Panoramic Display“, also Großflächendisplay, geprägt. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf Grundlage der Arbeit von Adam et al. (1986) ein Großflächendisplay als ein einzelnes und multifunktionales optisches Anzeigegerät mit einer ununterbrochenen Anzeigefläche von mindestens 1000 cm² bezeichnet. Es befindet sich in der unteren Hälfte des primären Gesichtsfelds des Piloten zentral auf dem Hauptinstrumentenbrett des entsprechenden Flugzeugmusters im *Head Down* Bereich. Das *Head Up Display* (HUD) wird an dieser Stelle nicht betrachtet.

Aufgrund bisheriger Limitationen bestehender Displaytechnologien wie LCDs oder CRTs ist die Verbreitung von Großflächendisplays in der Luftfahrt sehr begrenzt. Allein das Cockpitkonzept

der F-35 von Lockheed Martin sieht die Integration eines Großflächendisplays mit einer Breite von 50,8 cm und einer Höhe von 20,3 cm vor (Driven Technologies, 2009; Mader, 2001). Dies entspricht einer Displayfläche von 1031 cm². Die F-35 ist nach obiger Definition derzeit das einzige in Entwicklung oder Verwendung befindliche Flugzeug mit Großflächendisplay. Nach Jarret (2005) wird die in der F-35 zur Informationsdarstellung vorhandene Fläche durch die Verwendung dieses Großflächendisplays optimal ausgenutzt. Fraglich ist jedoch, ob bei dieser Betrachtung die Tatsache, dass das Display der F-35 aus zwei praktisch nahtlos aneinander gesetzten Einzeldisplays bestehen wird, berücksichtigt wurde (Driven Technologies, 2009). Das Anzeigekonzept ist, folgt man veröffentlichten Darstellungen des Displaylayouts, aufgrund dieser Teilung in eine linke und eine rechte Seite aufteilt und nutzt nicht die volle Flexibilität der verfügbaren Fläche (Net Resources International, 2009b; Driven Technologies, 2009). Da zum Anzeigekonzept der F-35 keine schriftlichen Veröffentlichungen zugänglich sind, stützen sich diese Vermutungen alleine auf das erhältliche Bildmaterial. Aus diesem Grund wird das Display der F-35 in dieser Arbeit weiterhin als Großflächendisplay bezeichnet. Es können jedoch keine Anhaltspunkte für eine Gestaltung von Anzeige- und Bedienkonzepten für Großflächendisplays aus diesen Darstellungen abgeleitet werden.

LCDs stellen derzeit die für Multifunktionsdisplays in der Luftfahrt verwendete Displaytechnologie dar. Sie sind jedoch in ihrer Form und Größe beschränkt. Durch die Entwicklung der „Holographic Display“-Technologie (HOLDIS), einer auf Rückprojektion basierenden Displaytechnologie, eröffnet sich das Potential, Anzeigen von nahezu beliebiger Größe und Form in bestehende oder zu entwickelnde Cockpitsysteme zu integrieren. Diese Displaytechnologie besteht hauptsächlich aus einer Projektionseinheit zur Bilderzeugung und einem Hologramm, das als Mattscheibe dient. Die Verwendung mehrerer Bildgeneratoren ermöglicht eine hoch auflösende Bild Darstellung und bietet zugleich eine hohe Redundanz und Ausfallsicherheit (Halldórsson, 2004; MForum, 2005; Kleebaum, 2005).

Es besteht damit die Möglichkeit, nahezu beliebig geformte und beliebig große Anzeigegeräte in Flugzeugcockpits einzurüsten. Aktuelle und konkrete Vorgaben und Entwurfsvorschläge für die Gestaltung der Displayinhalte sowie der Art und Weise der Interaktion von Großflächendisplays dieser Art sind dagegen nicht verfügbar. Hier können bis auf die Konzeptideen von Adam et al. (1986) alleine die ergonomischen und systemtechnischen Leitsätze für die Auslegung von Anzeige- und Bedienkonzepten herkömmlicher Displays herangezogen werden (Kellerer, 2006; Kerschenlohr, 2007; Hadwiger, 2008).

2.2.2. Anzeigekonzept

Spätestens seit Anfang der 80er Jahre gibt es von Adam (1991) konkrete Überlegungen zur Verwendung großflächiger Anzeigen in der Luftfahrt. Nach Adam (1991) kann eine komplexe Umwelt mit einer Vielzahl von zu berücksichtigenden Elementen mit mehreren kleinen Displays nicht ausreichend dargestellt werden. Hierzu ist vielmehr eine „Big Picture“ Anzeige notwendig, eine großflächige Darstellung auf einem Bildschirm, um dadurch das Aufrechterhalten des Situationsbewusstseins des Piloten während des Fluges zu unterstützen (vgl. Abb. 2-3).

Die Arbeiten von Furness (1986) aus der Mitte der 80er Jahre heben sich ebenso wie die Überlegungen von Adam von konventionellen Cockpitdarstellungen ab. Sein „Super Cockpit“ besteht hauptsächlich aus einer hoch integrierten synthetischen Außensicht, die dem Piloten über ein

Helmet Mounted Display (HMD) dargestellt wird. Bei Tag wird die natürliche Außensicht durch zusätzliche im HMD dargestellte Information überlagert. Nachts bzw. bei schlechter Sicht dient die Anzeige im HMD als Ersatz der Außensicht. Die im HMD zusätzlich dargestellten Informationen werden bildhaft in die perspektivische Anzeige integriert und setzen sich aus Waffenstatus, Flugpfad und anderen Flugobjekten zusammen.

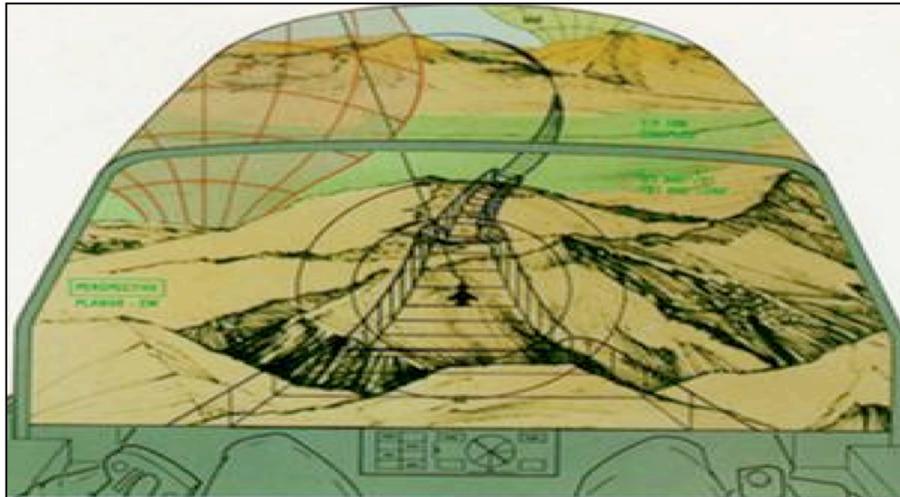


Abb. 2-3: Anzeigekonzept für Großflächendisplays in hochagilen Flugzeugen nach Adam (1991), welches das gesamte Hauptinstrumentenbrett und das Head-Up-Display (HUD) für eine integrierte perspektivische Außensicht als „Pilot Awareness“ (PA)-Darstellung nutzt.

In Anlehnung an diese Konzepte wurde bei EADS MAS ein generisches Anzeigekonzept erarbeitet (Kellerer, 2006). Ausgangspunkt für den Entwurf war der Informationsbedarf des Piloten, der für die Flugphase *Navigation* analysiert und bei der Konzepterstellung entsprechend berücksichtigt wurde. Eine Priorisierung der darzustellenden Informationen ist bei Spinoni et al. (1986) für unterschiedliche Flugphasen am Beispiel des Flugzeugmusters Eurofighter zusammengefasst. Dadurch wurde die Berücksichtigung grundlegender Anforderungen eines repräsentativen Flugzeugmusters sichergestellt.

In Expertenbefragungen wurde die Übertragbarkeit des Anzeigekonzepts für alle weiteren Flugphasen erhoben und im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesen. Das Anzeigekonzept besteht im Wesentlichen aus zwei Darstellungskomponenten, einer Vollbild-Darstellung, ähnlich dem Desktop-Hintergrund bei PCs, und aus zuschaltbaren Seitenfenstern zur Anzeige von Zusatzinformationen (Kellerer et al., 2007; Kellerer et al., 2008). Die Vollbild-Darstellung besteht aus einer herkömmlichen geographischen 2D-Karte und einer synthetischen Außensicht, zwischen denen der Pilot wählen kann. Beide Ansichten werden aus einer Datenbank generiert, in der geographische, topographische, navigatorische und taktische Informationen enthalten sind. Der Maßstab und die Orientierung der Darstellung sind ebenso variabel wie der Gehalt an Zusatzinformation (vgl. Abb. 2-4).

Durch die großflächige Darstellung der 2D-Karte bei hoher Displayauflösung (Becker et al., 2008) können detaillierte Informationen in ausreichender Größe und gleichzeitig, durch einen großen Kartenausschnitt, ein Überblick über die Gesamtsituation dargeboten werden. In ähnlicher Weise unterstützt das Großflächendisplay die synthetische Außensicht. Es ermöglicht bei einem Abstand des Augpunkts des Piloten vom Display von 700 mm einen azimuthalen Sichtbereich von ca. 50°

und dadurch einen realitätskonformen "Blick durch die Flugzeugstruktur". Dadurch können dem Piloten Informationen zu Entfernung, Richtung und Höhe anderer fliegender und bodengebundener Objekte in einer Darstellung und für einen großen Bereich dargestellt werden. Die Seitenfenster sind individuell und unabhängig voneinander anwählbar. Sie überdecken dann Teile der Vollbild-Darstellung. Die Positionierung der Fenster ist festgelegt und erfolgt nach Anwahl am linken und rechten Displayrand. Auf jeder Seite kann entweder ein Format über die gesamte Displayhöhe oder zwei gleichgroße Fenster eingblendet werden (vgl. Abb. 2-4). Damit können also maximal vier Fenster zusätzlich zur Vollbild-Darstellung angezeigt werden (Kellerer et al., 2008).

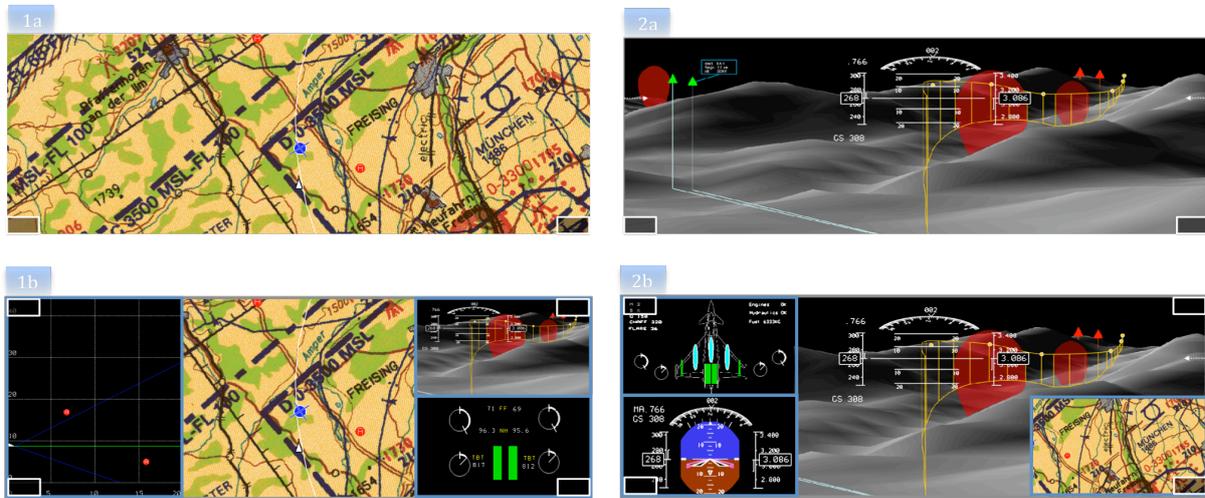


Abb. 2-4: Anzeigekonzept für Großflächendisplays nach Kellerer (2007). In 1a und 2a werden jeweils die Vollbild Darstellungen der beiden Sichtweisen 2D-Karte und Perspektivische Außensicht abgebildet. 1b und 2b zeigen Varianten, in denen die PA-Vollbild Darstellung mit unterschiedlichen Kombinationen aus eingblendeten Seitenfenstern überlagert wird.

2.2.3. Bedienkonzept

Auf Grundlage des obigen Anzeigekonzepts wurde von Kerschenlohr (2007) ein generisches Bedienkonzept für Großflächendisplays zur sicheren, schnellen und zugleich technisch durchführbaren Interaktion des Piloten erarbeitet. Die Kernpunkte dieser Arbeit sind die Auswahl der Bedienelemente sowie die Erstellung eines möglichst intuitiven und konsistenten Bedienkonzepts.

Anforderungen an mögliche Bedienelemente waren zum einen, die Displayfläche der Multifunktionsanzeigen zu maximieren, und zum anderen, die Variabilität des Anzeigekonzepts zu unterstützen. Zudem mussten die Bedienelemente für die Bedienung unter flugzeugtypischen Bedingungen wie Turbulenzen und Lastvielfache geeignet und mit den spezifischen Eigenschaften wie Geometrie und Bildqualität des Großflächendisplays kompatibel sein. Als primäres Bedienelement, das die Nutzung der gesamten Displayfläche erlaubt und die Flexibilität des Anzeigekonzepts unterstützt, wurde von Kerschenlohr (2007) ein Eingabegerät zur Positionierung des Cursors ausgewählt. Als mögliche Geräte zur Cursorbedienung kommen indirekte CCE, wie Trackball oder der kraftsensitive „XY-Controller“ am Schubhebel des Eurofighters und direkte CCE wie beispielsweise eine berührungempfindliche Bildschirmoberfläche (Touchscreen) in Frage. Die Aufteilung der CCE in direkte und indirekte Eingabeelemente findet sich bei Bullinger (2006) und Rogers et al. (2005). Die Ergebnisse der im Rahmen der Arbeit von Kerschenlohr (2007) durchgeführten Un-

tersuchung ergeben, dass die befragten Experten den Touchscreen als primäres Bedienelement bevorzugen.

Der Einsatz berührungssensitiver Großflächendisplays bietet vielseitige Interaktions- und Darstellungsmöglichkeiten, die zur Unterstützung menschlicher Informationsverarbeitung genutzt werden können (Hoener & Hardy, 1999; Rogers et al., 2005). Anzeigen und Bedienelemente können räumlich nahe zueinander dargestellt werden und unterstützen nach dem „Proximity Compatibility Principle“ von Wickens et al. (2004) die mentale Integration von Informationen und den zugehörigen Bedienelementen. Großflächig dargestellte Bedienelemente wirken sich positiv auf die Eingabegeschwindigkeit und -sicherheit aus (Fitts, 1954; Wickens et al., 2004; Eichinger et al., 2008). Gleichzeitig muss das Bedienkonzept die Kompatibilität mit dem HOTAS- bzw. VTAS-Konzept sicherstellen. Der Touchscreen reicht aus diesem Grund als einziges Bedienelement nicht aus. Es wurde daher für die Interaktion mit dem Großflächendisplay eine Kombination der drei Bedienelemente Touchscreen, Trackball oder XY-Controller und Spracheingabe gewählt. Der Funktionsumfang von Touchscreen und Trackball bzw. XY-Controller ist dabei redundant ausgelegt. Eine eingehende Betrachtung der Spracheingabe fand nicht statt, da diese unabhängig von der Displaygröße ist.

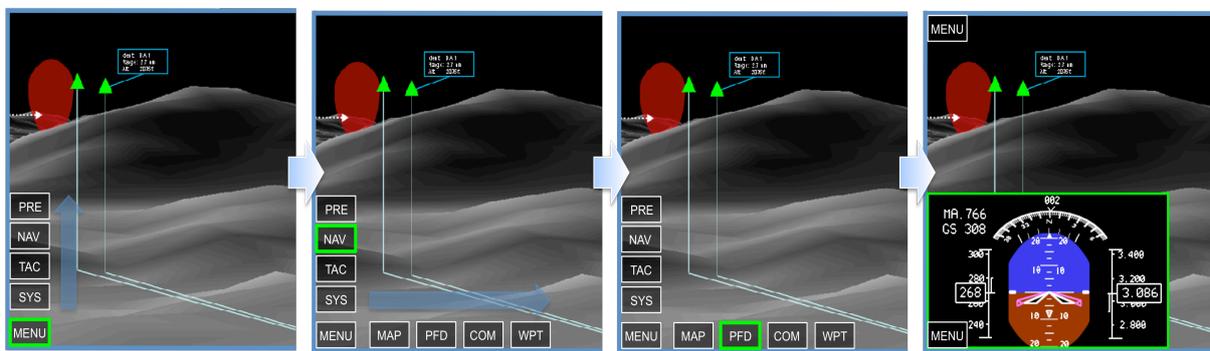


Abb. 2-5: Bediensequenz für die Einwahl von Seitenfenstern in die großflächige PA-Ansicht am Beispiel der Anwahl des Formats „PFD“ aus der Formatgruppe „NAV“ nach Kerschenlohr (2007). Die Bedienschritte sind anhand der angewählten und grün hervorgehobenen Eingabeschalter festgehalten. Durch Drücken der Schaltflächen „MENU“ und „NAV“ werden weitere Schaltflächen eingeblendet (blauer Pfeil). Nach der Anwahl der Schaltfläche „PFD“ wird das entsprechende Format angezeigt.

Basierend auf der Auswahl der Bedienelemente wurde dann ein Bedienkonzept erstellt und anschließend in Expertengesprächen evaluiert. Im Bedienkonzept wird festgelegt, dass alle Bedienvorgänge durch Interaktionsflächen auf dem Bildschirm ausgeführt werden. Diese Bedienflächen sind als einfache „An/Aus“-Schalter ausgeführt und werden auf Anwahl oder automatisch ein- und ausgeblendet (vgl. Abb. 2-5). Dies dient der Maximierung der verfügbaren Anzeigefläche und gilt sowohl für das Vollbild als auch für die Seitenfenster (vgl. Kap. 2.2.2). Es besteht die Möglichkeit, Seitenfenster mit Informationen aus den Bereichen Navigation, Taktik und System zu belegen. Die Auswahl der Seitenfenster erfolgt in drei Schritten, deren zeitliche Abfolge am Beispiel des Seitenfensters PFD in Abb. 2-5 dargestellt wird. Der Auswahlprozess wird in zeitlicher Reihenfolge in Abb. 2-5 von links nach rechts dargestellt. Zuerst wird durch Anwahl einer Menü-Schaltfläche die Position des Seitenfensters auf der linken oder rechten Displayseite festgelegt. Dann folgt die Formatvorauswahl durch Auswahl eines der Informationsbereiche „Navigation“, „Tactics“ und

„System“. Abhängig von der Formatgruppe werden dann weitere Schaltflächen eingeblendet. Durch die Anwahl der entsprechenden Schaltfläche wird das gewünschte Format dargestellt. Auf den beiden Displayseiten können je zwei Seitenfenster angezeigt werden. Die Position der Seitenfenster wird unabhängig von deren Inhalt festgelegt. Die Breite der Seitenfenster ist konstant, die Höhe kann je nach Inhalt variieren. Jedes Format ist über die halbe Displayhöhe darstellbar. Die Anzeige eines Formats über die gesamte Displayhöhe ist nur dann möglich, wenn es für die inhaltliche Struktur des Formates einen Vorteil bedeutet, wie etwa bei taktischen Formaten, die geographisch referenzierte Information beinhalten.

2.3. Berührempfindliche Anzeigen in Flugzeugen

2.3.1. Technologie

Berührempfindliche Anzeigen bestehen aus einem Anzeigegerät und einem zumeist in deren Displaygehäuse integrierten Gerät zur Erkennung der Fingerposition bei Eingabehandlungen, das im Folgenden unabhängig von der verwendeten Displaytechnologie als Touchscreen bezeichnet wird.

Ein Überblick über derzeit kommerziell verfügbare Touchscreentechnologien ist bei Bullinger et al. (2006) zu finden. Hier werden die Technologien resistiv, kapazitiv, Infrarot- und Oberflächenwellen-Touchscreen vorgestellt. „Frustrated Total Internal Reflection“ (FTIR) ist eine neuartige Methode die Position des Fingers oder auch mehrerer Finger bei der Eingabe auf der Displayoberfläche zu detektieren. FTIR-Touchscreens werden in Kombination mit Rückprojektionsdisplays verwendet und eignen sich daher besonders für den Einsatz in Kombination mit der Displaytechnologie HOLDIS (Becker et al., 2008). Dabei wird die Rückseite der zur Bilddarstellung verwendeten Mattscheibe optisch aufgezeichnet. Durch Algorithmen der Bildverarbeitung ist es nach Han (2005) möglich, eine beliebige Anzahl von Objekten, welche die Mattscheibe auf der Vorderseite berühren, zu erkennen und dabei zwischen den Objekten, wie beispielsweise den zehn Fingern zu unterscheiden. Es können unterschiedliche Funktionen ausgelöst werden, abhängig davon ob der entsprechende Displaybereich mit dem Zeigefinger, dem Daumen oder einem anderen Zeigeobjekt berührt wird.

Für den Einsatz in hochagilen Flugzeugen muss der Touchscreen bestimmte technische Anforderungen erfüllen. Er muss mechanischen Belastungen wie hohen Beschleunigungen und Vibrationen im Flug standhalten und den Anforderungen an Bedienbarkeit, Lesbarkeit, Lebensdauer, Ausfallsicherheit und Verfügbarkeit genügen. Außerdem muss die Kompatibilität mit anderen Systemen im Cockpit sichergestellt sein. Der Touchscreen ist bedienbar, falls das Gerät in der Lage ist, eine ausreichend genaue Position des Fingers bei Eingaben auch für den Fall der Handschuhbedienung zu detektieren. Die Lesbarkeit des Displays im Flugzeug ist dann gegeben, wenn der Pilot bei allen Lichtverhältnissen die Anzeige ablesen kann und bei Touchscreeneingaben keine Verdeckungen auftreten.

Infrarot (IR)-Touchscreens kommen in der F-35 zum Einsatz (Driven Technologies, 2009). Dies ist bisher die einzige großflächige Anwendung eines Touchscreens in zivilen und militärischen Flugzeugen. Man kann daher davon ausgehen, dass dieses Gerät alle notwendigen Anforderungen für die Verwendung in hochagilen Flugzeugen erfüllen wird. Der folgenden Arbeit wird zugrunde gelegt, dass großflächige IR-Touchscreengeräte zur Verwendung in hochagilen Flugzeugen Serien-

reife besitzen. Die IR-Touchscreentechnologie bildet daher die Grundlage für weitere Touchscreenuntersuchungen im Rahmen dieser Arbeit.

IR-Touchscreens bestehen aus sich gegenüberliegenden Infrarotsendern und -empfängern. Sie werden in der Regel, in einem Rahmen zusammengefasst, vor der Anzeigefläche montiert und erzeugen im Betrieb ein Strahlengitter, das auf Unterbrechungen reagiert. Die Funktionsskizze ist in Abbildung 2-6 dargestellt. Berührt ein Objekt den Bildschirm, so werden an der entsprechenden Position die vertikal und horizontal verlaufenden IR-Strahlen unterbrochen, wodurch die Koordinaten des Berührungspunktes ermittelt werden können (Bullinger et al., 2006). Es ist davon auszugehen, dass die Bedienung des IR-Touchscreens mit Handschuhen, wie sie von Flugzeugpiloten getragen werden, erfolgt. Beeinträchtigungen der optischen Eigenschaften des Displays sowie mechanische Verschleißerscheinungen aufgrund von Bedienhandlungen sind bei der Verwendung von IR-Touchscreens nicht zu erwarten. Aufgrund des Abstands der Dioden vom Display ist bei jedem Blickwinkel ungleich 0° mit Parallaxenproblemen zu rechnen. In diesem Fall ist eine Kalibrierung der Touchscreensoftware notwendig (VDI/VDE 3850, 2004).

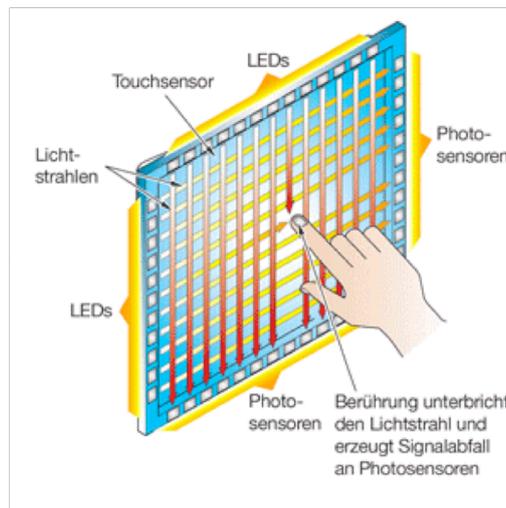


Abbildung 2-6: Funktionsskizze eines IR-Touchscreens (Craftdata, 2007).

Die gleichzeitige Unterscheidung mehrerer Berührungspunkte des Touchscreens wird als Multitouch-Funktionalität bezeichnet. Dies ermöglicht durch die Verwendung intuitiver Gesten eine natürliche und einfache Interaktionsmöglichkeit (König & Kuhlmann, 2008; Benko et al., 2006; Trümper, 2007; Davidson & Han, 2006). Untersuchungen zur Anwendung der Multitouch-Funktionalität im Flugzeug sind (dem Autor) nicht bekannt. Diese Funktionalität wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

2.3.2. Bisherige Anwendungen in Flugzeugcockpits

Militärische Flugzeugmuster in deren Cockpits Touchscreengeräte verwendet werden sind die McDonnell Douglas *F/A-18E/F*, die Dassault *Rafale* und in Zukunft die *F-35 Lightning II*.

Im Rahmen eines Display-Upgrades der *F/A-18* vom Typ *E/F* wurde ein mechanisches Bedienpanel, bestehend aus mehreren Druckschaltern, durch ein monochromes Touchscreendisplay ersetzt (vgl. Abb. 2-7). Ziel dieser Integration war eine Vergrößerung der vorhandenen Displayflä-

che und die Verbesserung der Interaktion mit den Displayinhalten. Durch die Verwendung eines IR-Touchscreens konnte eine Vergrößerung der Displayfläche um 40 % erreicht werden (Hoener & Hardy, 1999).

Die zwei äußeren Multifunktionsdisplays des Mehrzweckkampfflugzeugs Dassault Rafale verfügen über Touchscreenfunktionalität (Net Resources International, 2009c) zur Interaktion mit der dargestellten Information (vgl. Abb. 2-7). Die F-35 *Lightning* ist mit einem großflächigen IR-Touchscreendisplay ausgestattet (Driven Technologies, 2009). Weitere Informationen zur Verwendung von Touchscreens in hochagilen Flugzeugen liegen (dem Autor) nicht vor.



Abb. 2-7: Touchscreengeräte in aktuellen Flugzeugcockpits. Im linken Bild (Hoener & Hardy, 1999) ist der Touchscreen im Cockpit der F-18 dargestellt (grüner Pfeil). Im rechten Bild sind die beiden seitlichen MFDs mit Touchscreen-Funktion im Cockpit des Dassault Rafale (Net Resources International, 2009c) zu sehen (grüne Pfeile).

2.3.3. Eigenschaften der Touchscreenbedienung

Die Interaktion mit einem Touchscreen findet über kontextabhängige virtuelle Tasten statt (VDI/VDE 3850, 2004). Diese Tasten bestehen aus einer sichtbaren Repräsentation der Schaltfläche z.B. durch Symbole oder Beschriftungen und einer Aktivierungsfläche, welche die Erfassung einer Eingabe an dieser Stelle ermöglicht. Größe und Position von sichtbarer Repräsentation und Aktivierungsfläche stimmen in den meisten Fällen überein, können jedoch je nach Anwendung unabhängig voneinander betrachtet werden.

Die Aktivierung der virtuellen Tasten kann durch zwei Betriebsarten erfolgen. Es wird zwischen Erstkontakt- und Letzt-Kontakt-Methode unterschieden (ISO 9241-9, 2002). Bei der Erstkontaktmethode wird der Eingabebefehl an das System gesendet, sobald die Strahlen des IR-Gitters unterbrochen werden. Die Letzt-Kontakt-Methode bewirkt, dass der Eingabebefehl erst beim Beenden der Berührung durch das Abheben des Fingers gesendet wird. Bei einem Verschieben des Fingers erfolgt in beiden Fällen eine Aktualisierung der Cursorposition.

Die durch die Aktivierung ausgelöste Aktion ist abhängig von der Funktion dieser Taste, dem aktuellen Zustand der Taste und in den meisten Fällen vom Zustand des umgebenden Systems.

Die Eigenschaften virtueller Touchscreentasten werden im Rahmen dieser Arbeit durch die Ausprägungen folgender Merkmale beschrieben:

- Grafische Repräsentation
- Aktivierungsfläche
- Aktivierungsart
- Funktion
- Rückmeldung

Nach Bullinger et al. (2006) erlaubt die Verwendung eines Touchscreens im Vergleich zu anderen Bediengeräten eine weitaus größere Flexibilität, da die Anzahl, Form, Größe und Position der berührungsempfindlichen Felder leicht konfiguriert werden kann. Der Touchscreen ermöglicht eine intuitive Bedienung und eine gute Hand-Auge-Koordination. Der entscheidende Vorteil liegt dabei in der hohen Bediengeschwindigkeit.

Nach Fitts (1954) und Wickens & Carswell (1997) beeinflussen sich Bediengeschwindigkeit und Genauigkeit gegenseitig und sind direkt abhängig von der Größe der Bedienfelder und vom verwendeten Bedienelement. Dies gilt ebenfalls für Touchscreens. Für die Anwahl von Objekten kann daher durch Einhalten einer bestimmten Mindestgröße Geschwindigkeit und Genauigkeit der Touchscreeneingaben optimiert werden.

Bei Rogers et al. (2005) wurden allgemeine Vor- und Nachteile der Touchscreentechnologie im Vergleich mit anderen Eingabegeräten zusammengefasst (vgl. Tab. 2-1).

Tab. 2-1: Übersicht der Vor- und Nachteile der Touchscreentechnologie nach Rogers et al. (2005)

Vorteile	Nachteile
Direkte Hand-Auge-Koordination	Geringe Präzision
Intuitive Bedienung	Fehlendes haptisches Feedback
Befehle müssen sich nicht gemerkt werden	Armermüdung
Minimales Training erforderlich	Unbeabsichtigte Aktivierung möglich
Hohe Akzeptanz bei den Benutzern	Verdecken des Bildschirms
Wenig zusätzlicher Platz erforderlich	Verschmutzung der Oberfläche
Kurze Bedienzeiten	
Gute Eignung für Zeigeaufgaben	
Flexibler Displayaufbau	

Die Bedienleistung des Piloten, die Qualität der Informationsanzeige des Displays und dadurch die Verwendbarkeit von Touchscreens im betrachteten Kontext werden direkt von den Auswirkungen der oben genannten Vor- und Nachteile der Touchscreen-Technologie beeinflusst. Treten die Nachteile im betrachteten System in Erscheinung, müssen sie in ausreichendem Maße bei der Erstellung des Displaykonzepts berücksichtigt werden. Betrachtet man die Verwendung in hochagilen Flugzeugen, können Aspekte wie Verdeckung und unbeabsichtigte Eingaben durch eine Anpassung der Bedienlogik und Positionierung der Bedienflächen beeinflusst werden. Die Verschmutzung der Oberfläche kann durch das Tragen von Handschuhen vermieden werden (Hoener & Hardy, 1999).

2.3.4. Aktivierungsflächen

Bei jeder Mensch-Maschine-Schnittstelle mit Touchscreen-Funktion stellt die Wahl der Größe und Form der Aktivierungsflächen eine besondere Herausforderung dar. Zumeist ist bei Geräten wie Mobiltelefonen, Navigationssystemen und PDAs die verfügbare Displayfläche begrenzt. Die Größe der Aktivierungsflächen lässt folglich nur eine bestimmte maximale Anzahl von Schaltflächen zu und reduziert dadurch den Funktionsumfang der Geräte. Aus diesem Grund wird bei der Auslegung der Größe der Aktivierungsflächen oftmals mit dem Ziel, weitere Funktionen abzubilden oder mehr Displayfläche für die Informationsdarstellung verfügbar zu haben, eine Reduzierung der Aktivierungsflächengröße angestrebt (Karlson, 2007). Durch die Festlegung von Größe und Form der Aktivierungsfläche werden direkt Bediengeschwindigkeit, Fehlerrate und damit die Leistungsfähigkeit der Schnittstelle beeinflusst (Fitts, 1954; Boff & Lincoln, 1983). Die Bedienfelder können also hinsichtlich des Aspekts der Erhaltung der Bedienbarkeit der Geräte nicht beliebig klein gestaltet werden.

Gleiches gilt für die Bestimmung der Größe der Aktivierungsflächen bei der Gestaltung der Schaltflächen von großflächigen Touchscreens in Flugzeugcockpits. Für die Bestimmung der Aktivierungsflächengröße liegen Empfehlungen aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen vor. Diese reichen von der Ein-Hand-Bedienung mobiler Navigationsgeräte (Karlson, 2007) bis zur Touchscreen-Interaktion im Panzer (Rühmann, 1983). Dabei werden je nach Anwendung unterschiedliche Mindestgrößen der Aktivierungsfläche vorgeschlagen, die von knapp 8 mm für eine Gestenbasierte Daumeninteraktion (Karlson, 2007) bis hin zu 38 mm einer generischen Betrachtung von Touchscreen-Bedienelementen (Toms & Williamson, 1998) reichen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Betätigung des Touchscreens mit dem Finger in einem bewegten Flugzeugcockpit betrachtet. Die Bedienung mit den in Flugzeugcockpits getragenen Handschuhen muss ebenfalls berücksichtigt werden. Die Verwendung physikalischer Hilfsmittel wie Eingabestifte ist in militärischen Flugzeugcockpits aus Sicherheitsgründen nicht möglich und kann daher für diese Betrachtung ausgeschlossen werden. Direkte Vorgaben für die Größe der Aktivierungsflächen in hochagilen Flugzeugen sind nicht zu finden.

Angaben zur Größe der Aktivierungsflächen, die als Anhaltspunkt für diesen Anwendungsfall herangezogen werden können, finden sich in unterschiedlichen Standards und Studien. Der MIL-STD-1472F (1999) schlägt eine quadratische Fläche mit 16 mm bis 38 mm Seitenlänge und einem minimalen Abstand der Aktivierungsflächen von 3 mm bis 8 mm vor. Der VDI/VDO 3850 (2004) empfiehlt für rechteckige Aktivierungsflächen eine Breite von 15 mm und eine Höhe von 25 mm, für quadratische eine Mindestkantenlänge von 20 mm und für runde einen Durchmesser von 20 mm. Avery (1999) setzt eine Kantenlänge quadratischer Flächen von 20 mm bis 25 mm an. Toms & Williamson (1998) schlagen für die Kantenlänge ein Intervall von 19 mm bis 38 mm vor und fordern für die Interaktion mit Handschuhen eine Mindestgröße von 25 mm. Boff & Lincoln (1983) empfehlen eine quadratische Fläche mit 22 mm Seitenlänge. Rühmann (1984) schlägt für quadratische Flächen eine Seitenlänge von 17 mm und einen Abstand der Aktivierungsflächen von mindestens 2 mm vor.

Die meisten Größenempfehlungen der unterschiedlichen Quellen beziehen sich nicht auf einen bestimmten Anwendungsfall, sondern geben einen allgemeinen Richtwert an. Die größte Übereinstimmung dieser Empfehlungen mit der Anwendung im Flugzeug finden sich für den MIL-STD-1472F (1999) und vor allem für die Arbeit von Rühmann (1984), der Genauigkeit und Bedienzeit

von Touchscreen-Eingaben im Panzer für die Fahrt über einen Knüppeldamm betrachtet. Auch in dieser Arbeit geht es um zeitkritische Bedienhandlungen in einer bewegten Umgebung. Eine Überprüfung der Verwendbarkeit der bei Rühmann (1984) empfohlenen Bedienfeldgrößen für Großflächendisplays wurde im Rahmen der Arbeiten zum Thema *Panoramic Displays* bei EADS durchgeführt (Eichinger et al., 2008). Es werden daher im Folgenden quadratische Aktivierungsflächen mit einer Seitenlänge von 17 mm und ein minimaler Abstand dieser Flächen von 2 mm gewählt.

2.3.5. Rückmeldung

Nach Stanton (2003) ist bei der Mensch-System-Interaktion grundsätzlich mit Bedienfehlern zu rechnen. Durch die umfassende Rückmeldung von Systemzuständen an den Nutzer ist es jedoch möglich, die Fehlerwahrscheinlichkeit zu verringern. „Die Rückmeldung ist ein insbesondere mit Blick auf die kognitive Verarbeitung des Menschen essentieller Aspekt, da er das korrekte Aufnehmen von Information über den Zustand des technischen Systems gewährleistet und damit den Informationsfluss im Mensch-Maschine-System wesentlich beeinflusst“ (Bubb & Sträter, 2006). Das Ergebnis jeder Bedienhandlung muss dem Anwender durch entsprechende Rückmeldungen mitgeteilt werden. Der Benutzer ist sich ansonsten nicht darüber im Klaren, ob seine Handlung zum beabsichtigten Ziel führt oder ob im Laufe der Eingabehandlung Fehler auftreten.

Jede Bedienhandlung an grafischen Schnittstellen lässt sich nach Norman (1989) prozedural in drei Eingabeaktionen aufteilen, nämlich

1. das Positionieren des Bedienelements auf der gewünschten Schaltfläche,
2. die Aktivierung der Schaltfläche bzw. das Erteilen des Eingabebefehls und
3. die Ausführung der angewählten Funktion durch das System.

Der Handelnde muss zu jedem Zeitpunkt der Handlungsausführung über den aktuellen Systemzustand sowie über den Status bzw. den Erfüllungsgrad der drei Eingabeaktionen informiert werden. So kann er seine Handlungsaktivitäten koordinieren und auf Fehler, die während der Eingabeprozedur auftreten, angemessen reagieren. Die Rückmeldung lässt sich folglich ebenfalls in drei Stufen aufteilen. Dabei muss dem Handelnden bei Eingaben neben dem aktuellen Systemzustand eindeutig vermittelt werden, ob

1. sich das Eingabeelement (z.B. der Cursor) auf dem gewünschten Schaltelement befindet,
2. durch Betätigen der Schaltfläche die angestrebte Funktion ausgewählt wurde und
3. das System die Funktion richtig ausgeführt hat.

Eine Zusammenfassung von Bedienhandlung und Rückmeldung ist in Abb. 2-8 dargestellt. Ein Beispiel einer solchen Handlungssequenz ist das Einfahren des Fahrwerks nach dem Start des Flugzeugs. Der Pilot muss dazu zunächst den Fahrwerkshebel auffinden, dann den Hebel in die gewünschte Position bringen und sicherstellen, dass alle Fahrwerksteile ordnungsgemäß eingefahren wurden. Der Pilot erhält dabei zu jeder Zeit durch haptische, akustische und visuelle Reize Rückmeldung über den aktuellen Systemzustand und die Richtigkeit der einzelnen Schritte seiner Handlungsausführung.

Rückmeldungen können durch unterschiedliche Modalitäten, wie etwa durch optische, akustische, olfaktorische, thermische und haptische Reize erfolgen. Die Rückmeldung muss innerhalb von 0 ms bis 200 ms nach der jeweiligen Eingabeaktion erfolgen. Eine Verzögerung oder ein Ausblei-

ben dieser Rückmeldung stört den Informationsfluss und kann zu Desorientierung und Fehleingaben führen (Degani et al., 1992; Bubb, 1981). Norman (1989) bekräftigt in diesem Zusammenhang, dass sich je nach Handlungsart die Wahl der Modalität der Rückmeldung erheblich auf die Fehlerwahrscheinlichkeit auswirkt. Der Nutzer muss also nicht nur ausreichend schnell durch Rückmeldung über die Folgen und die Richtigkeit seiner Eingabeaktivitäten unterrichtet werden, die Modalität der Rückmeldung muss zusätzlich an den Handlungskontext angepasst werden, um Fehleingaben zu reduzieren und dadurch die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu maximieren. Nach Zwisler (2001) verliert beispielsweise bei der Durchführung von komplexen Bedienhandlungen, wie sie auch in Flugzeugcockpits auftreten, das sehr wichtige visuelle Feedback mit zunehmender Übung an Bedeutung, während taktile Reize immer wichtiger werden. Ein Zusammenwirken von taktilem und visueller Modalität wird in diesem Zusammenhang als effizienteste Kombination bezeichnet, da „undeutliche Information aus einem Kanal durch zusätzliche Information aus dem anderen Kanal kompensiert werden kann“ (Zwisler, 2001). Die Verwendung mehrerer Sinneskanäle wird dabei als multimodale Schnittstellengestaltung bezeichnet (Schomaker et al., 1995).

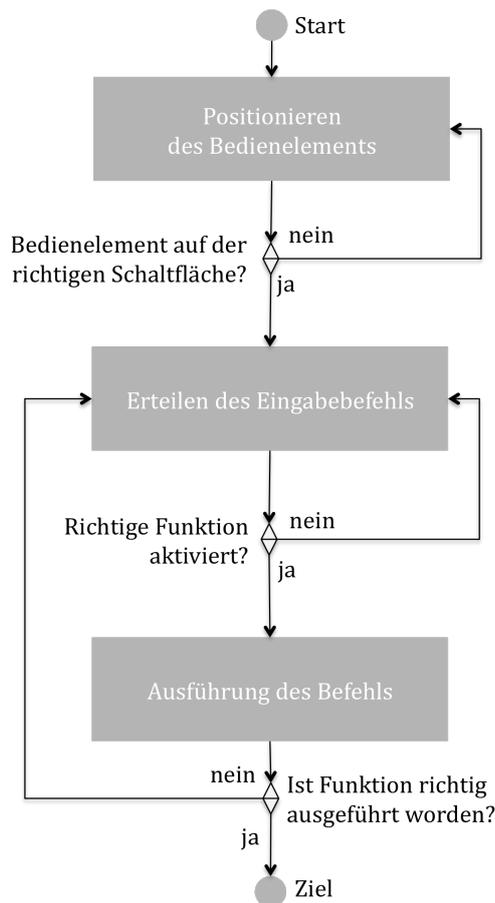


Abb. 2-8: Flussdiagramm zur Veranschaulichung der Rückmeldungen der drei Handlungsaktivitäten bei der Übermittlung von Befehlen an ein operatives System.

Touchscreens sind in der Lage durch optische Reizvermittlung die drei Bereiche der Rückmeldung bei Bedienhandlungen zu unterstützen. Taktile Reize bei der Touchscreenbedienung treten alleine mit dem Berühren der Displayoberfläche auf. Rogers et al. (2005) sieht hier, verglichen mit anderen Bediengeräten, einen Nachteil des Touchscreens durch die fehlende Möglichkeit weitere takti-

le Rückmeldung bei Eingabehandlungen bereitzustellen. Dreh-Druckschalter können beispielsweise die beiden ersten Bereiche der Rückmeldung haptisch unterstützen. Sie können erfüllt werden und identifizieren sich bei Betätigung über ihre Position, Form, Material und Oberfläche (Helander, 2006). Zudem verfügen sie in den meisten Fällen über einen oder mehrere haptische Druckpunkte, die dem Benutzer bei Überschreiten derselben die Befehlsabgabe an das System mitteilen.

Hinsichtlich einer multimodalen Schnittstellengestaltung fehlen dem Touchscreen daher, verglichen mit anderen Eingabemitteln wie Druckschaltern oder Drehreglern, haptische Kodierungsmerkmale, die das Auffinden von Touchscreenschaltflächen unterstützen und das Auslösen des Systembefehls an den Benutzer zurückmelden. Das fehlende haptische Feedback muss nach Bullinger et al. (2006) durch eine ausreichende visuelle oder akustische Rückmeldung ausgeglichen werden. Die multimodale Gestaltung der Rückmeldung bei einer Touchscreen-Eingabe kann jedoch auch durch entsprechende Modifizierungen des Touchscreens durch taktile Elemente angereichert werden.

Vilimek (2007) untersucht in diesem Zusammenhang die Verwendung von Touchpads im Kraftfahrzeug unter dem Aspekt multimodaler Rückmeldung, wie sie bei Bubb (2003) vorgeschlagen wird. Der Nutzer erhält gleichzeitig über den visuellen, akustischen und haptischen Sinneskanal Rückmeldung bei Eingabehandlungen auf dem Touchpad. Die haptische Rückmeldung erfolgt durch eine laterale Vibration der berührsensitiven Fläche des Touchpads. Vilimek vergleicht multimodale Touchpads und Dreh-Drücksteller und erhebt Leistungsmaße wie Bediengeschwindigkeit, Fehlerrate und subjektive Arbeitsbelastung. Bei Touchpad-Eingaben wurde von den Versuchspersonen eine deutlich höhere Leistung erreicht als mit dem Dreh-Drücksteller. Die Versuchsteilnehmer haben die akustische Rückmeldung der haptischen Rückmeldung und einer Mischung von haptischer und akustischer Rückmeldung vorgezogen. Dies stimmt mit den Fehlerraten und Bedienzeiten in den Versuchen überein. Die Unterstützung der visuellen Rückmeldung bei Touchpad-Eingaben durch akustische oder haptische Merkmale erweist sich also als leistungsförderlich. Die Ausprägung dieser Unterstützung ist jedoch stark vom jeweiligen Anwendungsfall und von den Rahmenbedingungen des betrachteten Systems abhängig.

Die Verwendung akustischer Reize bei Vilimek (2007) ist grundsätzlich auch auf hochagile Flugzeuge übertragbar. Aufgrund der hohen auditiven Belastung des Piloten durch Kommunikationsaufgaben wurde Rückmeldung über den auditiven Sinneskanal ausgeschlossen. Gleiches gilt für die Nutzung von Vibrationen als taktile Rückmeldungsvariante. Auch hier ist die Verwendung im Cockpit möglich, der Nutzen muss jedoch im dynamischen Umfeld des Cockpits und für Hand-schuhbedienung untersucht werden.

Eine weitere Möglichkeit, den Benutzer bei Touchscreen-Eingaben durch haptische Reize in der ersten Rückmeldungsstufe zu unterstützen, ist das Anbringen zusätzlicher haptischer Merkmale am Rand der Displayfläche. In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen der Untersuchungen des Forschungsvorhabens Panoramic Displays die Verwendung einer haptisch kodierten Leiste am Displayrand für eine haptische Unterstützung der Positionsrückmeldung und einer gleichzeitigen Stabilisierung des Hand-Arm-Systems untersucht (Ritzer, 2008). Es wurden dabei unterschiedliche haptische Positionsmarken am Displayrand erstellt und von Testpiloten im Rahmen einer Expertenbefragung bewertet. Ziel hierbei war es den Nutzer beim Auffinden von Touchscreen-Schaltflächen am Displayrand durch angemessene haptische Elemente zu unterstützen und dadurch Bedien- und Blickzeiten bei Touchscreen-Eingaben zu reduzieren.

Es ist also möglich, Touchscreen-Eingaben durch entsprechende Modifizierungen, wie sie bei Vilimek (2007) und Ritzer (2008) vorgestellt werden, nicht nur visuell und akustisch, sondern auch taktil in den drei oben genannten Rückmeldungsstufen angemessen zu unterstützen und dadurch mögliche Nachteile des Touchscreens bei der Rückmeldung von Handlungsaktionen zu kompensieren.

2.4. Psychologische Untersuchungsgrundlagen

Im Folgenden werden die psychologischen Grundlagen für die Untersuchung der Leistungsfähigkeit direkter und indirekter CCE für die Interaktion mit Großflächendisplays in hochagilen Flugzeugen hergeleitet. Sie dienen der Formulierung der Hypothesen im Hinblick auf die zu erwartenden Leistungsunterschiede. Gleichzeitig werden sie für die Gestaltung der Versuchsumgebung der Usability-Untersuchung nach ISO 9241-11 (1999) herangezogen.

2.4.1. Usability-Untersuchung

Usability wird 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“, bezeichnet (ISO 9241-11, 1999) und kann bei der Betrachtung der Nutzungsqualität einer Mensch-Maschine Schnittstelle sinngleich durch die Begriffe Gebrauchstauglichkeit und Verwendbarkeit ersetzt werden. Die Qualität einer Mensch-Maschine-Schnittstelle kann folglich durch die Usability-Maße Effizienz, Effektivität und Akzeptanz beschrieben werden. Effizienz und Effektivität sind hierbei objektiv messbare Leistungsgrößen. Akzeptanz des Benutzers ist eine subjektive Größe. Der Definition von Effizienz, Effektivität und Akzeptanz nach ISO 9241-11 (1999) folgend, lassen sich im hier untersuchten System und in Anlehnung an andere Untersuchungen der Usability von Bedienelementen (Boff & Lincoln, 1983; Rühmann, 1983) Effektivität durch Eingabegenauigkeit bzw. Fehlerrate und Effizienz durch Eingabedauer bzw. Bedienzeit operationalisieren. Die Akzeptanz der Nutzer muss durch Befragungen erhoben werden.

Die Usability einer Schnittstelle wird zusätzlich durch den Nutzungskontext beeinflusst. Dieser besteht hierbei aus den Benutzern, dem zu erreichenden Ziel, der physischen Umgebung, den Arbeitsmitteln und den Arbeitsaufgaben. Die *physische Umgebung* setzt sich aus dem Cockpit an sich und dem dynamischen Verhalten des Flugzeugs zusammen. Für eine Usability-Untersuchung ist es notwendig diese Einflussfaktoren im Kontext des betrachteten Interaktionskonzepts zu berücksichtigen (ISO 9241-11, 1999).

Die unter dem Begriff Nutzungskontext aufgeführten Elemente **Benutzer**, **Ziel**, **physische Umgebung**, **Arbeitsmittel** und **Arbeitsaufgaben** bilden die Grundlage für die Gestaltung der in Kap. 4 beschriebenen Untersuchung zur Bewertung der Usability von Eingabeelementen von Großflächendisplays.

Die Gruppe der **Benutzer** ist sehr eng gefasst. Es kommen als Anwender ausschließlich Piloten von hochagilen Flugzeugen in Frage. Durch die umfangreiche und spezialisierte Ausbildung dieser Piloten zeichnen sich diese Personen durch ihre Kenntnisse, Fertigkeiten, Erfahrung, Übungsgrad und ihre speziellen sensorischen, motorischen und kognitiven Fähigkeiten im Umgang mit speziellen Cockpitschnittstellen aus (Hörmann & Lorenz, 2009).

Das **Ziel** der Piloten ist, makroskopisch gesehen, das Erreichen des Missionsziels. Hinsichtlich der Bewertung der Eingabegeräte, also dem Nutzungskontext der Usability-Untersuchung, lässt sich dieses Ziel auf schnelle, sichere und richtige Systemeingaben abbilden. Die Rahmenbedingungen, in dem diese Eingaben zu tätigen sind, sind vom Missionsprofil des betrachteten Flugzeugmusters abhängig. Eine Analyse des Missionsprofils folgt in Kap. 3.3.2.

Relevante Merkmale der **physischen Umgebung** werden durch die Bewegungsdynamik und die Gestalt des Cockpits des betrachteten Flugzeugmusters festgelegt. Weitere Parameter wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit, die das Wohlbefinden des Nutzers beeinflussen können, werden für das betrachtete Flugzeug aufgrund der Klimatisierung des begrenzten Raumvolumens und der angepassten Arbeitskleidung als konstant und optimal angenommen. Cockpitgeometrie und Bewegungsdynamik werden in Kap. 3.2.3 bzw. Kap. 3.4 & 3.5 weiter analysiert.

Die **Arbeitsmittel** bestehen aus dem Großflächendisplay, der Touchscreeeinheit, einem indirekten CCE und der Software, die für den Betrieb dieser Geräte benötigt wird. Da es sich hier um manuelle Eingabemittel handelt, sind die für das Flugzeugmuster vorgeschriebenen und vom Piloten zu tragenden Handschuhe als weiteres Arbeitsmittel zu betrachten. Die Spezifizierung von Großflächendisplay, Bediengeräten und Handschuhen wird anhand eines konkreten Flugzeugmusters in Kap 3.2 durchgeführt.

Die **Arbeitsaufgaben** sind die zur Zielerreichung erforderlichen Aktivitäten und lassen sich durch Tätigkeiten, deren Abfolge, Häufigkeit und Dauer beschreiben (ISO 9241-11, 1999). Es gibt im Rahmen der typischen Aufgaben von Piloten eine Vielzahl dieser Aktivitäten und deren Ausprägungen (Wickens, 2003). ISO 9241-11 (1999) empfiehlt in diesem Fall eine Aufgabenanalyse und die Auswahl repräsentativer Tätigkeiten zur Evaluation der Usability. Die Auswahl der Aufgabenbeispiele wird in Kap. 3.3.2 im Rahmen einer hierarchischen Aufgabenanalyse durchgeführt und durch die in Kap. 4.2.1 und 4.2.2 beschriebenen Zeige- und Zusatzaufgaben in der Usability-Untersuchung abgebildet.

Eine Besonderheit des Nutzungskontexts „Cockpit“, die in der ISO 9241-11 (1999) jedoch nicht explizit genannt wird, ist das Auftreten von physischer und psychischer **Belastung** (Wickens & Hollands, 2000). Der Pilot ist durch Bedrohungssituationen oder durch die hohe Flugdynamik oftmals gezwungen unter hohen zeitlichen und körperlichen Anforderungen Entscheidungen zu treffen und Handlungen durchzuführen. Es ist davon auszugehen, dass die Arbeitsleistung des Piloten durch die einwirkende Belastung beeinträchtigt wird. Die Berücksichtigung realitätsnaher und repräsentativer Versuchsbedingungen (ISO 9241-11, 1999) ist daher im Rahmen der Usability-Untersuchung notwendig.

Die Auswirkungen der Belastung auf die Bedienleistung des Piloten lassen sich mit Hilfe des Informationsverarbeitungsmodells des Menschen nach Wickens et al. (2004) sowie des Modells multipler Verarbeitungsressourcen nach Wickens (2002) beschreiben (vgl. Kap. 2.4.2). Sie werden im Kap. 2.4.2 eingehend analysiert und für Vorhersagen der Leistungsfähigkeit verschiedener Bedienelemente im Belastungskontext Flugzeugcockpit verwendet.

2.4.2. Menschliche Informationsverarbeitung

Die Leistungsfähigkeit eines Mensch-Maschine-Systems wird nach Wickens & Carswell (1997) in erheblichem Maße von der Verarbeitung der dargebotenen Information durch den Menschen als Operateur beeinflusst. Das Modell der menschlichen Informationsverarbeitung nach Wickens et al. (2004) beschreibt die Prozesse der **Wahrnehmung**, **Informationsverarbeitung** und **Handlungsreaktion** und berücksichtigt Aspekte der **Aufmerksamkeit** und begrenzter **Verarbeitungsressourcen** (Wickens, 2002; Wickens & McCarley, 2008). Mit Hilfe dieses Modells lassen sich Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Mensch-Maschine-Systems herleiten, die abhängig sind von der Wahl des Interaktionsmediums, der Gestaltung der Bedienflächen, der Aufgabenstruktur und der beanspruchten Ressourcen (vgl. Abb. 2-9).

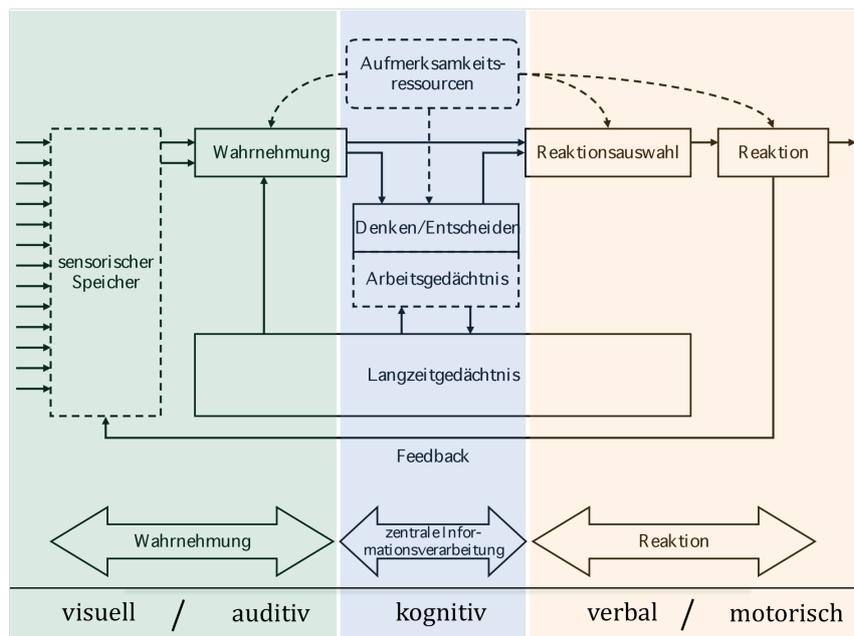


Abb. 2-9: Modell der menschlichen Informationsverarbeitung nach Wickens & Carswell (1997) und Wickens et al. (2004). Es lässt sich in die Bereiche Wahrnehmung, zentrale Informationsverarbeitung und Handlungsreaktion aufteilen, denen jeweils bestimmte beanspruchte Ressourcen zugeordnet werden können.

Die Prozesse **Wahrnehmung**, **Informationsverarbeitung** und **Handlungsreaktion** des Modells lassen sich wie folgt zusammenfassen. Informationen werden zuerst in Form von Reizen von den Sinnesorganen registriert, im sensorischen Speicher abgelegt und nach deren Wichtigkeit für eine weitere Verarbeitung ausgewählt. Information wird so wahrgenommen und kann auf Grundlage früherer Erfahrungen interpretiert werden. Daraufhin werden Einzelinformationen integriert, die dann als Auslöser für Entscheidungen und Handlungen dienen. Die Ausführung dieser Aktivitäten, nämlich Wahrnehmung, Informationsauswahl, Verstehen, Aktionsauswahl und Aktionsausführung benötigt jeweils Aufmerksamkeit (Goldstein, 2002).

Aufmerksamkeit wird nach Goldstein (2002) als Prozess der Auswahl und aktiven Zuwendung beim Aufnehmen und Verarbeiten von Informationen aus der Umwelt beschrieben und weist auftretenden Aufgaben bei der Informationsverarbeitung die verfügbaren Aufmerksamkeitsressourcen zu. Die Limitation der Ressource Aufmerksamkeit wirkt sich direkt auf die Leistung von Informationsauswahl, Wahrnehmung, Verstehen, Aktionsauswahl und Aktionsausführung aus. Wird

Aufmerksamkeit mehrheitlich auf einen bestimmten Prozess in der Informationsverarbeitung wie z.B. die Wahrnehmung von Reizen fokussiert, kann dies zu einer Reduzierung der Leistung einer anderen, gleichzeitig ausgeführten Aktion, z.B. der Handlungsauswahl führen. Diese Tatsache ist vor allem im Hinblick auf multiple Aufgaben, wie sie z.B. in modernen Kampfflugzeugen auftreten, zu berücksichtigen.

Neben der Ressource Aufmerksamkeit stehen in den Prozessen Wahrnehmung, Entscheidung und Handlungsausführung weitere **Verarbeitungsressourcen** zur Verfügung. Diese Ressourcen werden im Modell der multiplen Verarbeitungsressourcen (Wickens, 2002) als unabhängige Ressourcenpools beschrieben und den jeweiligen Prozessen zugeordnet. Wickens & McCarley (2008) weisen in ihrem Modell der Wahrnehmung die visuelle und auditive Ressource, der Entscheidung die kognitive Ressource und der Handlungsausführung die verbale und motorische Ressource zu (vgl. Abb. 2-9). Beanspruchungen Vorgänge der menschlichen Informationsverarbeitung unterschiedliche Elemente dieser Ressourcenpools, so unterstützt dies deren simultane Verarbeitung. Vorgänge, die sich auf die Verwendung der gleichen Ressourcen beziehen, müssen je nach Schwierigkeit und Beanspruchung der Ressource im Extremfall sequentiell abgearbeitet werden (Wickens & McCarley, 2008). Höhe und Art der Belastung wirken sich auf die Handlungseffizienz aus und können durch die Betriebsmittelauswahl, Aufgabengestaltung und die aktive Belegung unterschiedlicher Ressourcenpools beeinflusst werden. Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Bedienmitteln ist folglich die Betrachtung des jeweiligen Belastungskontextes notwendig. Durch physische und psychische **Belastung** der handelnden Person tritt eine Beanspruchung der Verarbeitungsressourcen auf. Beanspruchung bezieht sich dabei auf die Intensität der Belastung verschiedener Ressourcen der menschlichen Informationsverarbeitung. Im Allgemeinen wird Belastung und Beanspruchung als Ursache-Wirkung-Beziehung bezeichnet (Rohmert, 1984), wobei Belastung als objektive Größe gilt, die durch das Einwirken auf ein Individuum Beanspruchung hervorruft. Bei einer Kombination aus physischer und psychischer Beanspruchung ist Belastung meist nur schwer direkt messbar (Schmidtke, 2002; Eichinger, 2010). Belastung kann nach Eichinger (2010) „über die subjektive Erfassung der informatorischen Beanspruchung als unmittelbare Belastungsfolge“ beurteilt werden. Im Folgenden wird daher Belastung über subjektive Angaben der Beanspruchung erhoben (vgl. Kap. 3.3.2).

Der Prozess **Entscheidung** wird auch als zentrale Informationsverarbeitung beschrieben und besteht aus mentalen und kognitiven Operationen, die im Arbeitsgedächtnis durchgeführt werden und die kognitive Verarbeitungsressource beanspruchen (Baddeley, 2003; Klingberg, 2008). Im Arbeitsgedächtnis werden Informationen bewusst erinnert, weiter verarbeitet und neu strukturiert (Zimbardo & Gerrig, 1999). Das Ergebnis der zentralen Informationsverarbeitung ist die Auswahl von Handlungsreaktionen durch die zentrale Exekutive (Baddeley, 2003). Die Leistungsfähigkeit des Arbeitsgedächtnisses ist nach Wickens et al. (2004) durch begrenzte Faktoren wie die Anzahl von Informationseinheiten, die Dauer des Behaltens, der Ähnlichkeit der Informationen und der Verteilung der Aufmerksamkeitsressourcen eingeschränkt. Die Beanspruchung des Arbeitsgedächtnisses wirkt sich daher direkt auf die Effizienz der Handlungsausführung aus. Durch das Nutzen mentaler Modelle, die im Langzeitgedächtnis abgelegt sind, kann die Beanspruchung des Arbeitsgedächtnisses reduziert werden, da der Abruf von Information aus dem Langzeitgedächtnis wenige kognitive Ressourcen bindet (Wickens et al., 2004).

Rasmussen (1983) beschreibt in diesem Zusammenhang die **Reaktionsauswahl** als fertigkeiten-, regel- und wissensbasiert. Fertigkeitenbasiertes Verhalten ist, verglichen mit den beiden anderen

Arten, sehr schnell, wenig fehleranfällig, automatisiert und beansprucht das Arbeitsgedächtnis nur wenig. Es handelt sich folglich um das Abrufen erlernter mentaler Handlungsschemata aus dem Langzeitgedächtnis als Grundlage der Handlungsanweisung (Wickens et al., 2004). Das regelbasierte Verhalten ist intuitiv und beruht auf dem Abfragen von „wenn - dann“-Regeln (Eichinger, 2008). Es geschieht innerhalb weniger Sekunden, nutzt mentale Modelle und Schemata und benötigt wenige kognitive Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses. Das wissensbasierte Verhalten erfolgt ohne vorhandene Verhaltensprozeduren. Es muss bewusst und kontrolliert stattfinden und bindet dadurch mehr kognitive Ressourcen als die beiden anderen Verhaltensarten. Weitere Aspekte, welche die Handlungsauswahl beeinflussen sind die Komplexität der Verhaltensvarianten, die Erwartung und Auftrittswahrscheinlichkeit, die Übung, die Unterscheidbarkeit, die Rückmeldung und die Bewegungsdauer. Wird dies bei der Auswahl von Bedienelementen berücksichtigt, so kann die Erfahrung des Anwenders und bereits erlerntes fertigkeitbasiertes Handeln gezielt zur Entlastung des Arbeitsgedächtnisses bzw. mentaler Ressourcen genutzt werden und führt aufgrund einer Reduzierung der Beanspruchung der zentralen Informationsverarbeitung zu Leistungsvorteilen bei Bedienhandlungen.

Die Interaktion mit dem Touchscreen basiert auf ballistischen Bewegungen des Hand-Arm-Systems und daher auf Handlungsschemata und mentalen Modellen, die vom Menschen im Alltag erlernt werden und dort im Gebrauch sind (Rühmann, 1984). Die Handlungsausführung mit Hilfe einer direkten manuellen Eingabehandlung, wie sie beim Touchscreen vorkommt, kann als fertigkeitbasiertes Verhalten bezeichnet werden und wird daher vom Menschen instinktiv durchgeführt. Dieses hoch automatisierte Verhalten beansprucht das Arbeitsgedächtnis nur in sehr geringem Maße und hält dadurch mentale Ressourcen für weitere, simultan zu erfüllende Aufgaben frei (Helander, 2006).

Die Interaktion mit dem indirekten CCE kann zunächst nicht von alltäglichen Handlungen abgeleitet werden. Es benötigt Training, um die Bewegungsgesetze der Cursorpositionierung durch das indirekte CCE zu erlernen und die Bildung eines Handlungsschemas im Langzeitgedächtnis zu unterstützen. Dies bedeutet wiederum, dass in diesem Fall eine erheblich höhere Belastung des Arbeitsgedächtnisses und der zentralen Exekutive auftritt, als dies bei der Touchscreen-Bedienung der Fall ist (Helander, 2006; Rasmussen, 1983; Baddeley, 2003). Es stehen folglich weniger kognitive Verarbeitungsressourcen zu Verfügung. Bei einem Vergleich der beiden Bedienelemente weist Krauß (1999) auf eine erhöhte kognitive Belastung bei der Cursorpositionierung mit dem indirekten CCE als mit dem Touchscreen hin.

Bei der Verwendung des Touchscreens ist im Vergleich mit der Bedienelementalternative indirektes CCE hinsichtlich der begrenzten Aufmerksamkeits- und Verarbeitungsressourcen des Menschen ein deutlicher Leistungsvorteil zu erwarten. Es ist daher davon auszugehen, dass der Pilot bei gleichzeitigem Auftreten von zeitkritischen und arbeitsintensiven Aufgaben durch das Interaktionsmedium Touchscreen besser unterstützt wird als durch das indirekte CCE. Zusätzlich ist durch die Einfachheit der Bedienung mit einer erhöhten Zufriedenheit der Nutzer mit dem Bedienelement Touchscreen als mit dem indirekten CCE zu rechnen. Es wird daher ein Vorteil des Touchscreens gegenüber des indirekten CCE hinsichtlich der objektiven und subjektiven Usability-Maße Bedienleistung und Nutzerakzeptanz erwartet.

2.5. Hypothesen

In der vorangegangenen Betrachtung wurde die Problematik bestehender Displaysysteme diskutiert (vgl. Kap. 2.1). Eine Möglichkeit dieser Problematik zu begegnen und die Mensch-Maschine-Schnittstelle im Cockpit entscheidend zu verbessern, ist die Verwendung von Großflächendisplays kombiniert mit dem Interaktionsmedium Touchscreen (vgl. Kap. 2.2 und Kap. 2.3). Es wurden die Grundsätze der Anzeige und Bedienung für Großflächendisplays wie auch mögliche Interaktionsgeräte vorgestellt. Als Eingabeelemente kommen das indirekte CCE und der Touchscreen als direktes CCE in Frage (vgl. Kap. 2.2.3). Das indirekte CCE wird bereits in unterschiedlichen und ausreichend dokumentierten Anwendungen als primäres Eingabeelement für HDDs in Flugzeugcockpits verwendet. Veröffentlichte Usability-Untersuchungen von Touchscreens sind für unterschiedliche Anwendungen zu finden (vgl. Kap. 2.3.4). Für die Verwendung von Touchscreens im Bereich der militärischen Luftfahrt existieren vielmehr grundlegende Empfehlungen als konkrete Anforderungen (MIL-STD-1472F, 1999). Detaillierte Gestaltungsanforderungen für die Touchscreenanwendung sowie eingehende Betrachtungen von Interaktionskonzepten für Großflächendisplays sind für Anwendungen in der Luftfahrt nicht zu finden. Es bestehen daher erhebliche Forschungsdesiderate hinsichtlich der Usability von großflächigen Touchscreendisplays in der Luftfahrt allgemein und in der militärischen Luftfahrt im Speziellen. Es wird daher im weiteren Verlauf, aufbauend auf den Ausführungen in Kap. 2.1 bis Kap. 2.4, die Leistungsfähigkeit von Touchscreens als primäres Bedienelement für Großflächendisplays in hochagilen Flugzeugen anhand quantitativer Maße untersucht und ein quantitativer sowie qualitativer Vergleich der Leistungsfähigkeit des Touchscreens mit einem indirekten CCE durchgeführt. Als indirektes CCE wird im weiteren Verlauf der Trackball verwendet. Die Auswahl des hier betrachteten indirekten CCE findet in Kap. 3.2.2.1 statt, wird hier jedoch zur Formulierung der Hypothesen vorweggenommen.

Die Evaluation der alternativen Bedienelemente Touchscreen und Trackball findet im Rahmen einer Usability-Untersuchung statt (vgl. Kap. 2.4.1). Es werden dabei im Rahmen des Vergleichs der beiden Bedienelemente die Leistungskriterien Bedienzeit und Genauigkeit sowie das Kriterium Nutzerzufriedenheit betrachtet. Die Auswertung der Versuchsdaten erfolgt sowohl qualitativ als auch quantitativ. Dabei wird ein Vergleich der Leistungsfähigkeit von Touchscreen und Trackball unter den unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt und ein absolutes Leistungsmaß für die betrachteten Bedienelemente unter obigen Randbedingungen erhoben.

Im Kontext dieser Untersuchung lassen sich folgende Hypothesen formulieren:

- H1* Die Bedienleistung bei Eingabehandlungen (Zeigeaufgaben) auf Großflächendisplays ohne Zusatzbelastung ist mit dem Touchscreen höher als mit dem Trackball.
- H2* Der Performanzvorteil der Touchscreenbedienung bei Zeigeaufgaben auf Großflächendisplays gegenüber der Trackball-Bedienung bleibt bei einer Erhöhung der Belastung bestehen.
- H3 (a), (b)* Die Beständigkeit des Vorteils des Touchscreens in der Bedienleistung der Zeigeaufgabe gegenüber dem Trackball gilt für (a) standardisierte und (b) für die in hochagilen Flugzeugen auftretenden Eingabehandlungen und Zusatzaufgaben.
- H4* Der Performanzvorteil des Touchscreens bei Eingabehandlungen nimmt gegenüber dem Trackball bei steigender Belastung des Piloten zu.

H5 Werden für Eingabehandlungen und die Bearbeitung von Zusatzaufgaben dieselben Ressourcen benötigt, so führt der Touchscreen zu einer geringeren Belastung der betroffenen Ressourcen als der Trackball und dadurch zu einer positiven Beeinflussung der Leistung in Zeige- und Zusatzaufgabe.

H6 Die Interaktion mit dem Touchscreen ist zufriedenstellender als mit dem Trackball.

Ziel der Usability-Untersuchung ist neben der Prüfung der Hypothesen die Erhebung des Leistungsspektrum der beiden Interaktionselemente Touchscreen und Trackball für die Bedienung von Großflächendisplays als Grundlage möglicher Anwendungen in unterschiedlichen Flugzeugmuster. Die Hypothesen bauen inhaltlich aufeinander auf und decken so unterschiedliche Aspekte der Leistungsuntersuchung der betrachteten Bedienelemente ab. Der Prozess der Hypothesenprüfung folgt diesem Aufbau und ist in Abb. 2-10 als Flussdiagramm dargestellt.

Die zentrale Hypothese *ZH* dieser Arbeit baut auf die obigen Ausführungen im Kap. 2.4 auf und lautet zusammenfassend:

ZH Der Touchscreen weist deutliche Leistungsvorteile gegenüber anderen Bedienelementen auf und bietet sich daher als primäres Bedienelement für die Interaktion mit großflächigen Displays in hochagilen militärischen Flugzeugen an.

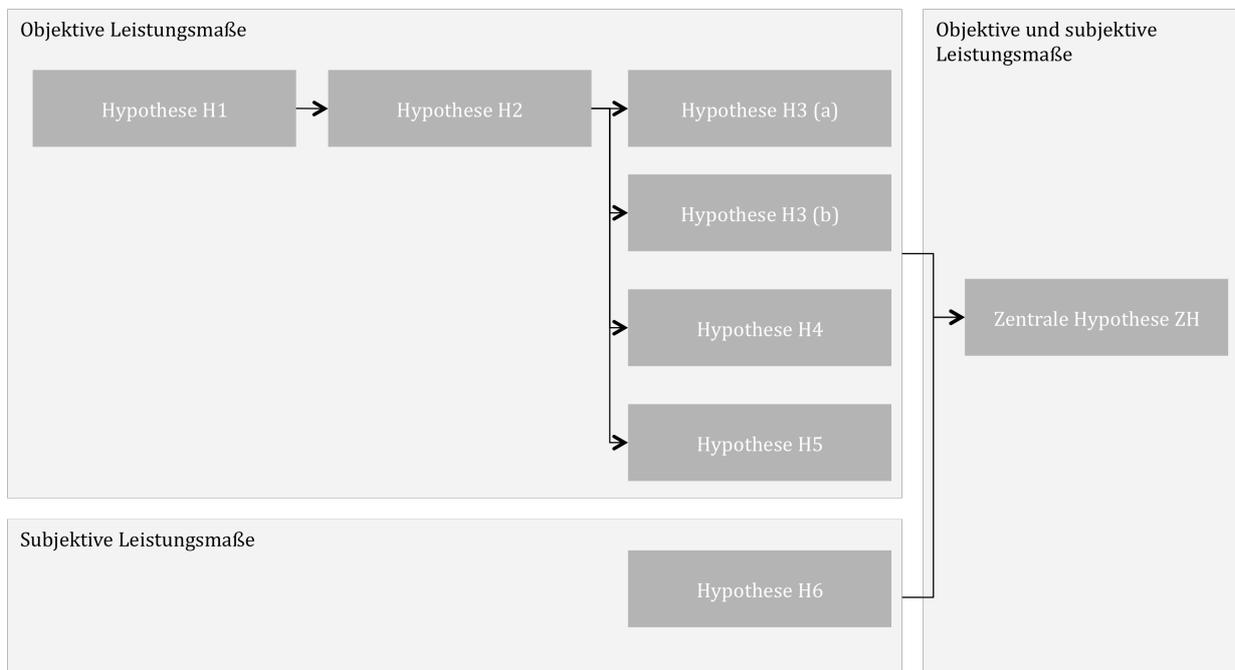


Abb. 2-10: Prozess der Hypothesenprüfung aufgeteilt anhand objektiver und subjektiver Leistungsmaße, die zur Überprüfung der Hypothesen verwendet werden.

3. Großflächendisplays in hochagilen Flugzeugen

Neben dem Vergleich der beiden Bedienelemente müssen grundsätzliche Anforderungen, die sich aus relevanten Umgebungsparametern moderner Flugzeuge ergeben, berücksichtigt werden (vgl. Kap. 2.4.1). Um diese Anforderungen zu konkretisieren, ist es notwendig dieser Untersuchung die Anwendung in einem speziellen Flugzeugmuster zugrunde zu legen. Die Randbedingungen erstrecken sich auf die Bereiche Cockpitgeometrie, Aufgaben des Piloten, Bedienfunktionen und Flugzeugdynamik. Im Rahmen der Analyse der Cockpitgeometrie werden Positionen von Display und Bediengeräten und deren Erreichbarkeit und Bedienbarkeit betrachtet. Aus der Aufgliederung der Aufgaben des Piloten lassen sich Bedienfunktionen ableiten, die vom generischen Bedienkonzept abgebildet werden. Durch Steuereingaben und Schubänderungen des Piloten und durch Änderungen der Anströmung des Flugzeugs werden durch Auftriebsänderungen Beschleunigungen in das Cockpit induziert. Je nach Flugzeugmuster werden durch dieses Verhalten die resultierenden Beschleunigungen festgelegt, unter denen Bedienhandlungen ausgeführt werden müssen. An dieser Stelle werden anhand des Antwortverhaltens des Hand-Arm-Systems die Relativbewegungen zwischen Finger und Display analysiert. Es soll dadurch sichergestellt werden, dass alle Bedienelemente und Displays gut sichtbar und erreichbar sind, alle Bedienfunktionen berücksichtigt werden und die in der Usability-Untersuchung verwendete Aktivierungsfläche der Symbole repräsentativ für die Verwendung in hochagilen Flugzeugen ist.

3.1. Auswahl eines Flugzeugmusters

Die Usability-Untersuchung eines Interaktionselementes findet bevorzugt im Nutzungskontext der Einsatzumgebung statt (vgl. Kap. 2.4.1). Zudem stellt die Auswahl eines militärischen Ein-Mann-Cockpits deutlich höhere Anforderungen an den Piloten als dies in zivilen Zwei-Mann-Cockpits. Die Auswahl eines Flugzeugmusters, das außerordentliche Anforderungen an das fliegerische Personal stellt, bietet sich daher hinsichtlich der Übertragbarkeit der ermittelten Informationen besonders an. Für eine ausreichend genaue Beschreibung des Nutzungskontexts wird ein repräsentatives modernes hochagiles Flugzeug mit militärischem Verwendungshintergrund ausgewählt. Die Belastung auf den Piloten in einem solchen Flugzeugtyp stellt hinsichtlich mechanischer, physikalischer und psychischer Belastung extreme Anforderungen dar. Aus der in Kap. 2.1.1 vorgestellten Auswahl an möglichen Flugzeugen wurde der Eurofighter Typhoon als repräsentatives Referenzflugzeug für die weiteren Betrachtungen und Untersuchungen ausgewählt. Dafür sprechen mehrere Gründe. Der Eurofighter ist im internationalen Vergleich eines der modernsten und leistungsfähigsten im Einsatz befindlichen Kampfflugzeuge (Rauen, 2009a; Yoon, 2004; Hierakares, 2008) dessen Einsatzzeitraum sich mindestens über die kommenden 40 Jahre erstrecken wird (Rauen, 2009b). Zugleich finden die Untersuchungen dieser Arbeit in der Abteilung Human Factors Engineering, die in den Geschäftsbereich Military Air Systems der EADS GmbH eingegliedert ist, statt. Die Zugänglichkeit zu Daten und Informationen des Waffensystems Eurofighter Typhoon ist daher ungleich einfacher als dies bei anderen Flugzeugen der Fall ist.

Darüber hinaus stehen am Standort Manching Eurofighter Testpiloten der EADS sowie der WTD 61 für diese Arbeit als Experten für Befragungen zur Verfügung.

Der Eurofighter ist ein hochagiles, allwettertaugliches Mehrrollenkampfflugzeug. Die maximale Geschwindigkeit beträgt Mach 2. Die maximalen Flugzeugbeschleunigungen sind auf +9 G und -3 G limitiert (aipower.at, 2009). Das Missionsspektrum des Eurofighters setzt sich aus Aufklärung, „Luft-Luft“- und „Luft-Boden“-Aktivitäten, Luftüberlegenheit, Luftnahunterstützung, Abstandslenkflugkörpereinsatz, Seezielbekämpfung, Unterdrückung der Luftabwehr und Mehrrolleneinsatz zusammen (Rauen, 2009a).

Die unterschiedlichen Missionen werden nach Spinoni et al. (1986) in die folgenden Flugphasen aufgeteilt:

- Ground Procedures
- Take-Off
- Navigation
- Combat (Air-to-Air)
- Attack (Air-to-Surface)
- Recovery
- Approach & Landing

3.2. Cockpitbeschreibung

Das Cockpit stellt die Schnittstelle zwischen Pilot und Flugzeug dar (vgl. Kap. 2.1.1). In den folgenden Betrachtungen wird angenommen, dass ein Großflächendisplay mit Touchscreen-Funktion das zentrale Anzeige- und Bedienelement auf dem Hauptinstrumentenbrett darstellt (vgl. Kap. 2.2). In diesem Zusammenhang wird im folgenden Kapitel eine anthropometrische Analyse der Sichtbarkeit und Erreichbarkeit des Großflächendisplays sowie der Bedienelemente durchgeführt. Hierzu werden Position und Einbaugeometrie des Großflächendisplays und der Bedienelemente in Verbindung mit der Sitzposition des Piloten analysiert. Im nächsten Schritt wird dann die Sichtbarkeit und Erreichbarkeit der Geräte als Grundlage der Usability-Untersuchung überprüft.

3.2.1. Neue Displaykonfiguration

Die Integration eines Großflächendisplays muss sich an der Struktur des bestehenden Cockpitlayouts orientieren. Dieser Arbeit liegt eine vorläufige Auslegung des Hauptinstrumentenbretts zu Grunde. Folgende Kriterien wurden hierfür herangezogen:

- Auf den MFDs werden keine sicherheitskritischen Funktionen abgebildet.
- Die bestehenden MFDs und deren Bedienelemente werden durch das Großflächendisplay ersetzt.
- Die Fläche des Head-Up-Panels, das zur Interaktion mit dem HUD dient, wird als Anzeige- fläche für das Großflächendisplay zur Verfügung stehen (Kellerer et al., 2008).

Diese Rahmenbedingungen führen zu einer kreuzförmigen Geometrie des Großflächendisplays (vgl. Abb. 3-1). Die Position und räumliche Ausrichtung des Großflächendisplays orientiert sich am Augpunkt des Piloten und den geometrischen Eigenschaften der ersetzten Geräte.