

Der Augpunkt (Design Eye Point) ist ein Hilfsmittel bei der Konstruktion des Cockpits und legt im Cockpit einen Raumpunkt fest, der die Position der Augen des Piloten bestimmt und unabhängig von deren Körpergröße gilt. Im Eurofighter kann durch die Verstellung der Sitzhöhe für jeden Piloten die korrekte Position der Augen, entsprechend dem *Design Eye Point* (DEP) eingestellt werden (Spinoni et al., 1986). Die Sitzhöhe wird durch den *Neutral Seat Reference Point* (NSRP) angegeben. Die Position des DEP ist in Abb. 3-3 und Abb. 3-4 dargestellt. Nach diesem DEP wird im Laufe der geometrischen Auslegung der Cockpitstruktur die Position von Anzeige- und Bediengeräten bestimmt und dadurch Sichtbarkeit und Erreichbarkeit relevanter Geräte sichergestellt. Hierzu wird ein orthogonales rechthändiges Koordinatensystem verwendet, dessen Ursprung im Augpunkt (DEP) liegt. Die x-Achse weist horizontal nach vorne in Flugrichtung. Die z-Achse weist senkrecht dazu nach unten und die y-Achse in Sichtrichtung des Piloten horizontal nach rechts (vgl. Abb. 3-2).

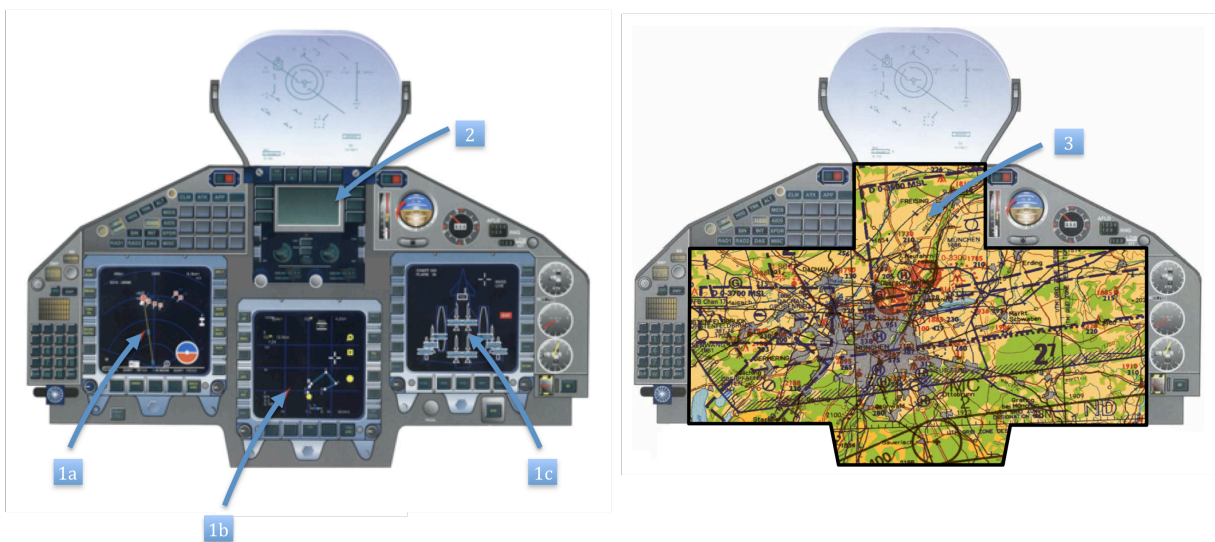


Abb. 3-1: Skizzenhafte Darstellung der Struktur des Hauptinstrumentenbrettes des Eurofighters in der aktuellen Konfiguration (links) und mit einem Großflächendisplay. Das Großflächendisplay (3) ersetzt dabei die Anzeige- und Bedienelemente der drei MFDs (1a, b, c) und des „Head Up Panels“ (2).

Die Position des Großflächendisplays wird anhand der Positionen der aktuellen Displays im Eurofighter bestimmt (Spinoni et al., 1986). Die Entfernung zwischen DEP und dem Mittelpunkt der Displayoberfläche des mittleren Multifunktionsdisplays beträgt nach Spinoni et al. (1986) 740 mm. Diese Entfernung wird auf den entsprechenden Punkt auf dem Großflächendisplay übertragen. Der Winkel zwischen der Displayoberfläche und der Horizontalen muss aufgrund geometrischer Limitationen bei der Betätigung des Schleudersitzes  $77,5^\circ$  betragen (vgl. Abb. 3-3). Die Oberkante des Displays wird von der „Over the Nose Vision“ Linie festgelegt. Diese Linie ist vom DEP her nach vorne in der xz-Ebene des Koordinatensystems um  $15^\circ$  nach unten geneigt (vgl. Abb. 3-2). Berücksichtigt man einen Displayrand des Großflächendisplays von 20 mm Breite, ist die Oberkante der sichtbaren Displayfläche 661 mm vom DEP entfernt und erscheint vom DEP gemessen  $16,7^\circ$  unterhalb der Horizontalen. Die Unterkante der sichtbaren Displayfläche ist 798 mm vom DEP entfernt und erscheint vom DEP gemessen  $46,8^\circ$  unterhalb der Horizontalen (vgl. Abb. 3-3).

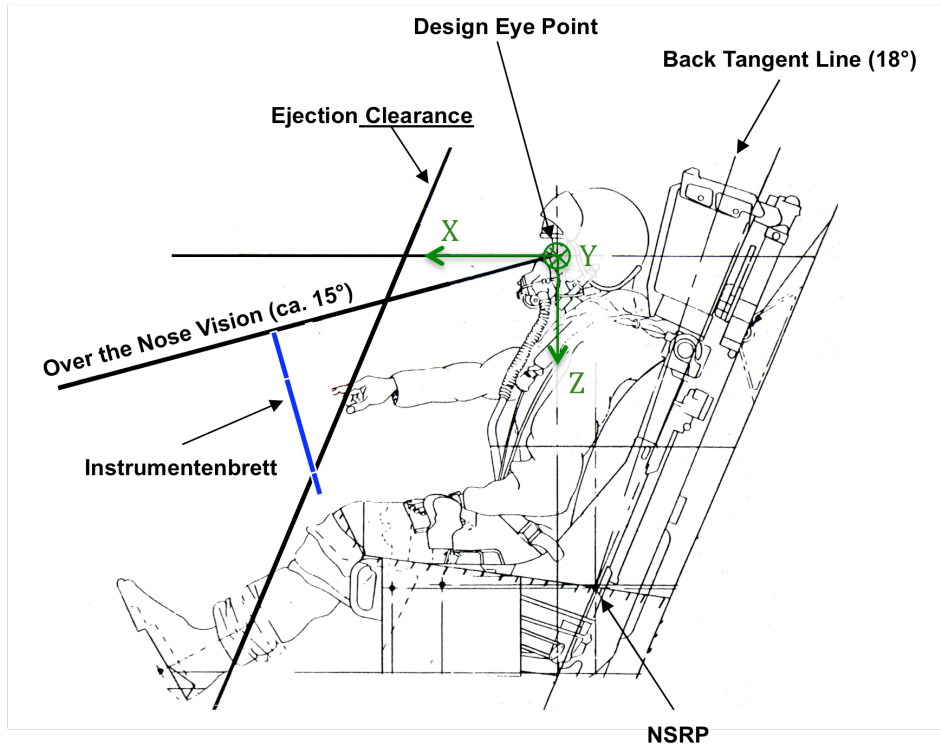


Abb. 3-2: Schematische Darstellung der Sitzposition des Piloten im Cockpit mit den Positionsmarken DEP und NSRP (EFA, 1987). Der DEP dient im Folgenden als Ursprung des rechtshändigen Koordinatensystems, in dem alle Punkte im Cockpit angegeben werden. Das Instrumentenbrett repräsentiert die Einbauposition des Großflächendisplays.

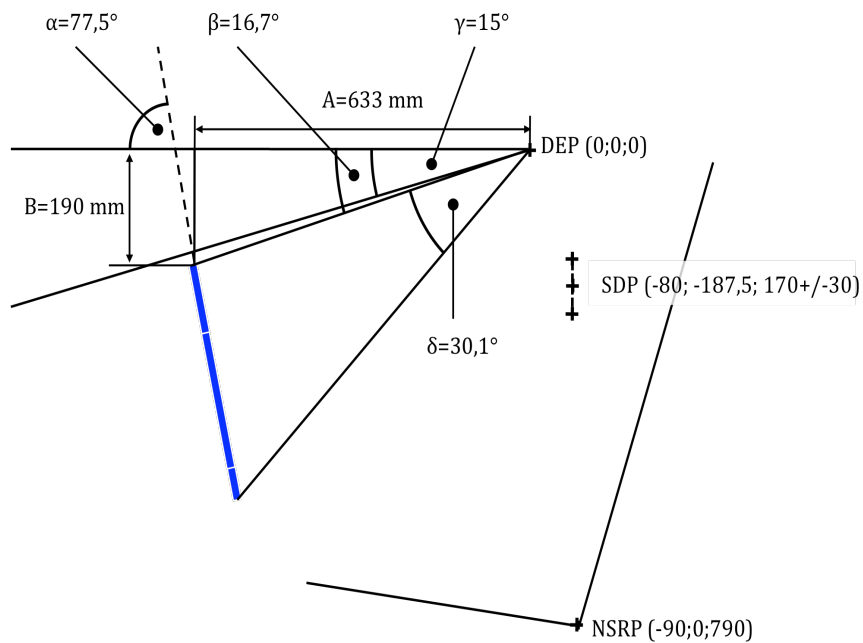


Abb. 3-3: Skizze zur Beschreibung der Position von Großflächendisplay und den Körperpunkten DEP, Schulterdrehpunkt (SDP) und NSRP. Die Darstellung erfolgt in einem vertikalen Schnitt in der xz-Ebene durch den DEP. Die x-, y- und z-Koordinaten der Referenzpunkte werden jeweils in Klammern in mm angegeben.

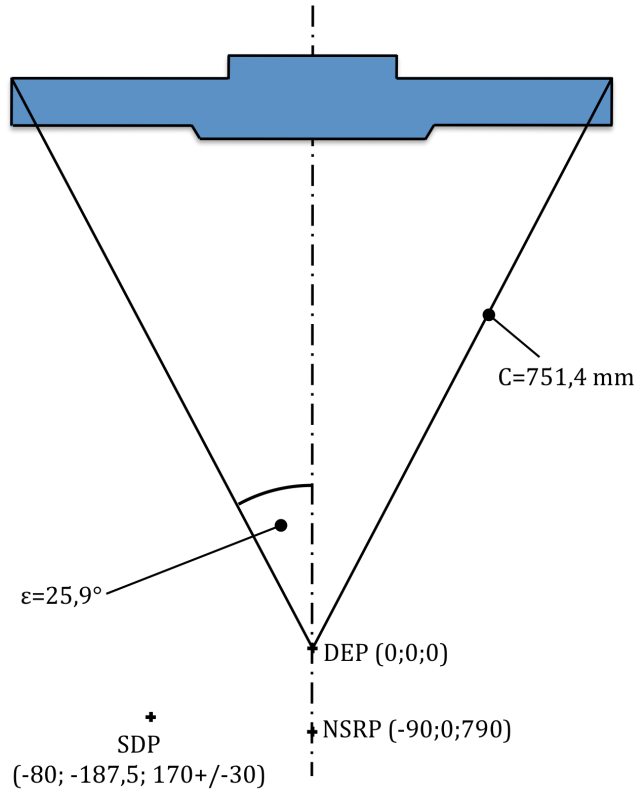


Abb. 3-4: Erweiterung der Skizze aus Abb. 3-3 zur Beschreibung der Position des Großflächendisplays und der Körperpunkte DEP, Schulterdrehpunkt (SDP) und NSRP. Die Darstellung erfolgt in einem horizontalen Schnitt in der xy-Ebene durch den DEP. Die x-, y- und z-Koordinaten der Referenzpunkte werden jeweils in Klammern in mm angegeben.

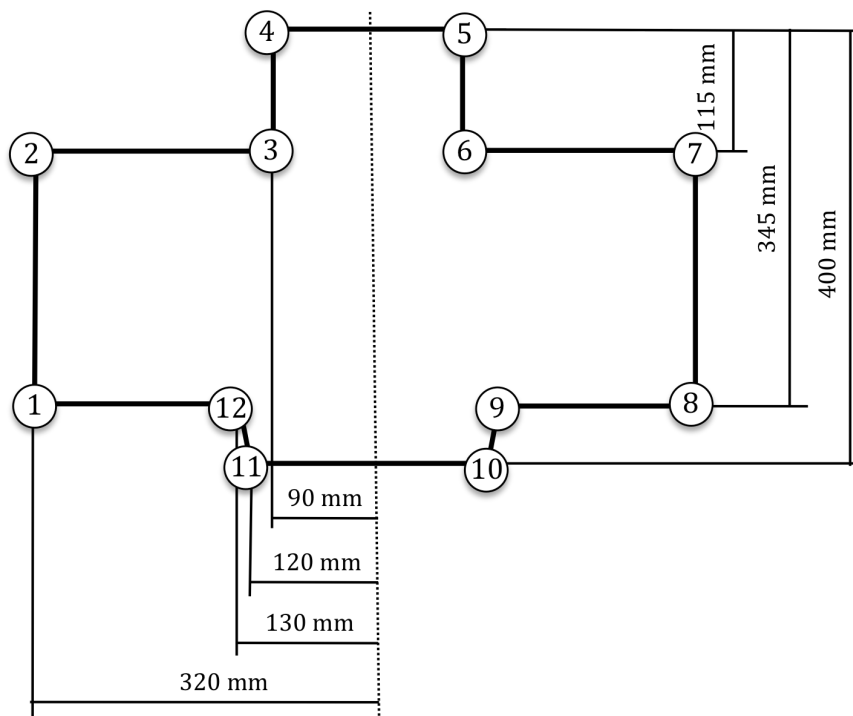


Abb. 3-5: Geometrische Beschreibung des Großflächendisplays. Die Eckpunkte des Displays sind für die Betrachtung der Erreichbarkeit des Touchscreens in Kap. 3.2.3.2 von 1 bis 12 durchnummeriert.

Durch die Größe des „Head Up Panels“, der MFDs und deren Bedienelemente berechnet sich für die sichtbare Fläche des Großflächendisplays eine maximale Displayhöhe von 401 mm und eine maximale Displaybreite von 642 mm (vgl. Abb. 3-5). Die Abmessungen des kreuzförmigen Displays mit Angabe der für die weitere Untersuchung der Erreichbarkeit verwendeten Eckpunkte sind in Abb. 3-5 zusammengefasst.

### **3.2.2. Bedienelemente**

In der aktuellen Cockpit-Konfiguration verfügt der Eurofighter über unterschiedliche Geräte, um Bedienhandlungen auf dem Hauptinstrumentenbrett durchführen zu können. Dies sind Druckschalter, Drehregler, Spracheingabe und ein indirektes CCE, welches im Cockpit des Eurofighters als XY-Controller bezeichnet wird. Drehregler und Druckschalter eignen sich nur bedingt für die Interaktion mit Großflächendisplays (vgl. Kap. 2.2.3). Die Interaktionsvariante Spracheingabe stellt ein Eingabemittel dar, das einen Teil der Funktionen im Cockpit bedienen kann, sich jedoch ebenfalls nicht als CCE eignet. Die Spracheingabe wird daher in den weiteren Betrachtungen zur Auswahl eines CCE nicht weiter betrachtet. In Kap. 2.2.3 & 2.4 wurde als Bedienelement für Großflächendisplays in Flugzeugcockpits der Touchscreen und ein indirektes CCE vorgeschlagen. Im Folgenden werden die beiden Eingabealternativen anhand der Verwendung im Flugzeugmuster Eurofighter diskutiert.

#### **3.2.2.1. XY-Controller**

Der XY-Controller im Cockpit des Eurofighters wird als „force sensitive finger operated joystick“ (EFA, 1993) bezeichnet und ist nach Bullinger et al. (2006) in die Gruppe der indirekt wirkenden kraftsensitiven bzw. isometrischen Bedienelemente einzuordnen. Er befindet sich am Schubhebel und wird mit dem Zeigefinger der linken Hand bedient (vgl. Abb. 3-6). Die Positionierung des Cursors auf der Displayfläche erfolgt durch das Aufbringen lateraler Kräfte auf den XY-Controller. Die Auswahl von Symbolen und Funktionen erfolgt durch vertikales Drücken des XY-Controllers. Der XY-Controller ist Bestandteil des HOTAS-Konzepts des Eurofighters (vgl. Kap. 2.1.2), da er das Durchführen von Eingabehandlungen auf den Multifunktionsdisplays ermöglicht, ohne dass der Pilot dabei die Hand vom Schubhebel nehmen muss.

Bei der Interaktion mit großflächigen Anzeigen muss durch die Auswahl eines Bediengeräts sichergestellt werden, dass der Cursor schnell über große Distanzen bewegt werden kann und gleichzeitig eine präzise Positionierung des Cursors möglich ist. Der im Eurofighter befindliche XY-Controller wurde für die Interaktion mit den standardmäßigen Anzeigen optimiert. Es ist nicht davon auszugehen, dass er sich in seiner ursprünglichen Ausführung für die Interaktion mit Großflächendisplays eignet. Im Rahmen der Usability-Untersuchung wurde daher ein indirekt wirkendes Bedienelement ausgewählt, das oben genannte Voraussetzungen erfüllt und sich dadurch als Bedienelement für Großflächendisplays anbietet. Boff & Lincoln (1983) untersuchten verschiedene Bedienelemente hinsichtlich ihrer Bediengeschwindigkeit und ihrer Positionsgenauigkeit. Der Trackball besitzt, verglichen mit anderen indirekt wirkenden Bedienelementen, die besten Werte für Bediengeschwindigkeit und Genauigkeit und wird daher im weiteren Verlauf als indirektes Bedienelement ausgewählt.



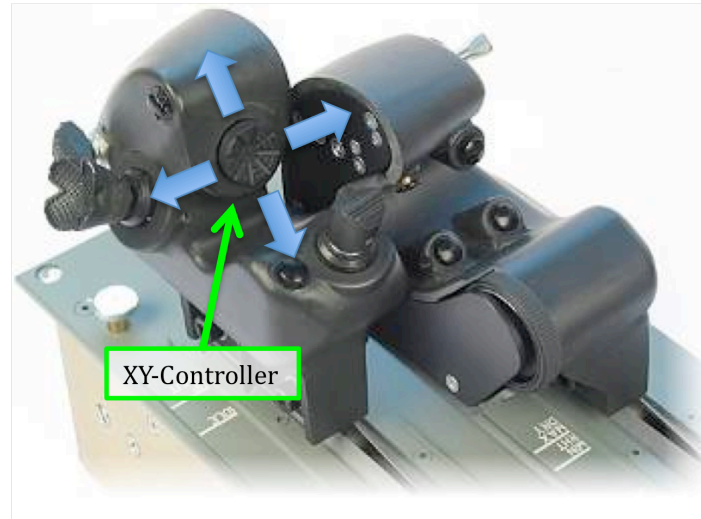


Abb. 3-6: Schubhebel des Eurofighters. Auf der Seite, mit der das linke Triebwerk geregelt wird befindet sich der XY-Controller, der zur Interaktion mit den MFD des Eurofighters verwendet wird (Reiser, 2009). Die Bedienung erfolgt mit dem Zeigefinger der linken Hand.

#### 3.2.2.2. Touchscreen

In der aktuellen Version verfügt das Cockpit des Eurofighters über keinen Touchscreen. Orientiert man sich bei der Auswahl der Touchscreen-Technologie an vergleichbaren Anwendungen anderer Flugzeugmuster, so bietet sich als einzige Technologievariante die im Cockpit der F-35 verbaute IR-Touchscreen-Technologie an (vgl. Kap. 2.3.1). Die Interaktion erfolgt über Aktivierungsflächen, die dargestellten Symbolen zugeordnet werden (vgl. Kap. 2.3.3). Die Aktivierungsflächen sind quadratisch und verfügen über eine Seitenlänge von 17 mm. Der Abstand zwischen zwei Aktivierungsflächen muss für eine ausreichend sichere und schnelle Anwahl 2 mm betragen (vgl. Kap. 2.3.4). Die Anwahl der Aktivierungsflächen kann durch die Erst-Kontakt-Methode oder durch die Letzt-Kontakt-Methode erfolgen (vgl. Kap. 2.3.3). Die „Funktionsauslösung beim Abheben des Berührelements vom Touchscreen ermöglicht die vorherige Korrektur einer fehlerhaften Positionierung, und vermindert damit eine fehlerhafte oder ungewünschte Funktionsauslösung“ (VDI/VDE 3850, 2004). Dementsprechend wurde die Letzt-Kontakt-Methode als Eingabefunktionsweise ausgewählt. Dieselbe Empfehlung findet sich ebenfalls bei Avery (1999).

#### 3.2.3. Anthropometrie

Die Zugänglichkeit und Bedienbarkeit aller Funktionen, die der Pilot zum Erfüllen seiner Aufgaben benötigt, muss stets gewährleistet sein. Die anthropometrische Auslegung des Eurofighter Cockpits stellt die notwendige Sichtbarkeit von Anzeigegeräten und Bedienbarkeit von Bedienelementen sicher. Die Erreichbarkeit der Bedienelemente und die Sichtbarkeit der Anzeigen wirkt sich direkt auf die Usability einer Schnittstelle aus (Schmidtke & Groner, 1989). Für eine Untersuchung der Usability stellen daher die anthropometrischen Daten der betrachteten Schnittstelle in jedem Fall zu berücksichtigende Rahmenbedingungen dar. Diese setzen sich aus den Positionen und der räumlichen Ausrichtung von Benutzer, Eingabegeräten und Anzeigegeräten sowie aus den Größenunterschieden der betrachteten Nutzergruppe zusammen.

Für die Bestimmung von Sichtbarkeit und Erreichbarkeit wird zunächst ein biometrisches Modell der Nutzergruppe unter Berücksichtigung der Sitzposition erstellt. Grundlage dieses Modells sind die diesbezüglichen Angaben in der „Cockpit Description“ nach Spinoni et al. (1986). Das Cockpit wurde für das 5. bis 95. Perzentil der Bevölkerungsgruppen der beteiligten Nationen Großbritannien, Italien, Spanien und Deutschland entworfen. Als Referenzmaße wurden jeweils die Minimal- bzw. Maximalwerte der vier Nationen für das 5. und das 95. Perzentil, basierend auf nationalen Normen ausgewählt und auf das Jahr 1995 akzelleriert (Spinoni et al., 1986). Die Auswahl dieser Werte entspricht den Angaben des 5. und 95. Perzentils der Altersgruppe der 26 bis 45 jährigen Männer nach DIN 33402-2 (2005) sowie den Angaben des 5. und 95. Perzentils der Männer nach NASA-STD-3000 (1995). Für die Erstellung eines biomechanischen Modells des Hand-Arm-Systems des sitzenden Piloten wurden, falls vorhanden, die Werte der Eurofighter Cockpit Auslegung nach Spinoni et al. (1986) übernommen. Fehlende Angaben wurden durch Werte der DIN 33402-2 (2005) sowie des NASA-STD-3000 (1995) ergänzt.

Sitzhaltung und Sitzposition des Piloten sind bei Spinoni et al. (1986) dokumentiert und in Abb. 3-2 dargestellt. Die Rückenlehne ist demnach um  $18^\circ$  nach hinten, die Sitzschale um  $5^\circ$  nach oben geneigt. Der Sitz ist in der Höhe verstellbar. Als Referenzpunkt der Sitzposition wird der NSRP verwendet. Von diesem Punkt aus kann der Sitz zum Anpassen des Augpunkts entlang der  $18^\circ$ -Achse der Rückenlehne um jeweils 75 mm nach oben und nach unten verschoben werden. Dieser Punkt dient zudem als Referenzpunkt für die Position der Sitzfläche und der Rückenlehne (vgl. Abb. 3-2, Abb. 3-3 & Abb. 3-4). Aus den oben genannten Werten kann ein mechanisches Modell für die Herleitung des Sichtfeldes sowie des Greifraums der Piloten und daraus eine Beurteilung der Sichtbarkeit und Erreichbarkeit der hier betrachteten Geräte erfolgen.

#### 3.2.3.1. Sichtfeld

Displays lassen sich dann ohne Zwangshaltung einsehen, wenn die Sehachse zwischen  $25^\circ$  und  $35^\circ$  gegen die Horizontale nach unten geneigt ist. Dabei sollte der Blick möglichst senkrecht auf die Displayoberfläche fallen (Schmidtke & Groner, 1989). Durch die Displayneigung von  $77,5^\circ$  gegen die Horizontale und die in Abb. 3-3 dargestellte Einbauposition des Großflächendisplays sind die Anforderungen für die Positionierung eingehalten (Schmidtke & Groner, 1989). Die seitlichen Displayränder erscheinen vom DEP aus unter einem horizontalen Winkel von  $\pm 25,9^\circ$  (vgl. Abb. 3-4). Die Oberkante des Großflächendisplays wird in einem Winkel von  $16,7^\circ$  unterhalb der xy-Ebene, die durch den DEP verläuft vom Piloten erblickt, die Unterkante in einem Winkel von  $46,8^\circ$  (vgl. Abb. 3-3). Die Sicht nach außen wird aufgrund der Position des Großflächendisplays nicht beeinträchtigt. Ebenso wird die Sicht auf das Großflächendisplay durch keine Gerätschaften behindert. Zusammenfassend sind keine schwerwiegenden Sichtbarkeitskonflikte des Großflächendisplays aus operationeller Sicht zu erwarten.

#### 3.2.3.2. Greifraum

Die Erreichbarkeit der Bedienelemente wird durch den Greifraum der Nutzergruppe festgelegt und muss für die Untersuchung der Bedienbarkeit des Touchscreens berücksichtigt werden. Der Greifraum, der bei Spinoni et al. (1986) mit 731 mm bis 871 mm angegeben ist, wird durch die funktionale Reichweite nach vorn bestimmt (DIN 33402-2, 2005). Dieses Maß bezieht sich auf den

horizontal nach vorne ausgestreckten Arm. Für die Erreichbarkeit von Bedienelementen ober- und unterhalb dieser Horizontalen ist die Position des Schulterdrehpunkts sowie die Position des Bedienfeldes entscheidend. Im Folgenden wird die Erreichbarkeit des Touchscreens auf dem Großflächendisplay stellvertretend für das 5. männliche Perzentil, also den kleinsten Piloten, bestimmt. Man kann davon ausgehen, dass für alle Piloten, die größer als das 5. Perzentil sind, eine mindestens gleich gute Erreichbarkeit des Touchscreens gegeben ist. Der Schulterdrehpunkt liegt, ausgehend von der Position des DEP 170 mm für das 5. Perzentil in positiver z-Richtung unterhalb des DEPs (DIN 33402-2, 2005; Spinoni et al., 1986). Liegt die Schulter an der Sitzlehne an, befindet sich der SDP für das 5. Perzentil 80 mm in negativer x-Richtung hinter dem DEP (Schmidtke & Groner, 1989). Nach DIN 33402-2 Beiblatt 1 (2006) variiert die Höhe des Schulterpunkts in z-Richtung mit der Position des zu betätigenden Bedienelements und kann sich um jeweils 30 mm nach oben und unten verschieben. Diese Werte gelten für eine angenehme Sitzposition ohne Zwangshaltungen des Piloten während des Fluges (Schmidtke & Groner, 1989). Der Helm ruht in dieser Position nicht an der Kopflehne. Der Oberkörper im Bereich des Brustkorbs ist annähernd aufrecht (Krähenbühl, 2008). In dieser Körperhaltung verändert sich durch den geänderten Schulterdrehpunkt die Reichweite nach vorn um 100 mm (DIN 33402-2 Beiblatt 1, 2006). Zusätzlich muss aufgrund der Ausrüstung des Piloten im Rückenbereich ein Bekleidungszuschlag von 50 mm einberechnet werden. Hieraus resultiert die in Abb. 3-3 und Abb. 3-4 angegebene Position des Schulterdrehpunkts. Der Abstand des Schulterdrehpunkts zur Rückenlehne beträgt für diese Körperhaltung 150 mm. Unter Berücksichtigung der biakromialen Schulterbreite von 375 mm des 5. Perzentils lässt sich für unterschiedliche Armhaltungen die Position des Schulterdrehpunkts bestimmen. Die Erreichbarkeit des Touchscreens wird im Folgenden anhand der Eckpunkte des kreuzförmigen Großflächendisplays, welche die maximalen Greifentfernungen darstellen, geprüft. Hierzu wurden zwölf Punkte festgelegt (vgl. Abb. 3-5). Das ausgestreckte Hand-Arm-System bestimmt die maximale funktionale Reichweite nach vorn zur Griffachse. Für das 5. Perzentil beträgt die Griffachse 731 mm. Die Koordinaten der Displayeckpunkte, die entsprechenden Schulterdrehpunkte und die Erreichbarkeit der Displayeckpunkte mit der linken und rechten Hand sind in Tab. 3-1 für das 5. Perzentil der betrachteten männlichen Piloten zusammengefasst.

Die mit *GW* (Griffweite) gekennzeichneten Schaltflächen befinden sich für das 5. Perzentil innerhalb der Reichweite zur Griffachse nach vorn und der Reichweite der Daumenkuppe. Sie können daher mit dem Daumen der linken Hand ohne eine Änderung der Sitzposition, z.B. Vorbeugen erreicht und, falls es sich um ein physikalisches Bedienelement handelt, umgriffen werden (DIN 33402-2, 2005). Die mit *FS* (Fingerspitze) gekennzeichneten Positionen sind bei einer Zeigefingerlänge von 68 mm (5. Perzentil), die sich zur Reichweite zur Griffachse nach vorn addieren, mit dem Zeigefinger der linken Hand erreichbar. Bedienelemente, die sich im Bereich der Positionen 7 und 8 befinden, können von Personen des 5. Perzentils mit der linken Hand in oben beschriebener Körperhaltung nicht erreicht werden. Hier ist die Zuhilfenahme der rechten Hand oder ein Vorbeugen des Oberkörpers notwendig. Die Erreichbarkeit der Positionen für die rechte Hand ist jeweils in Klammern den Werten der linken Hand hintangestellt. Eine Zusammenfassung der Reichweiten für das 5. und 95. Perzentil befindet sich in Anhang A.

Tab. 3-1: Zusammenfassung der Erreichbarkeit unterschiedlicher Punkte auf dem Display (vgl. Abb. 3-5). Die Erreichbarkeit wird mit GW für Griffweite, FS für Fingerspitze und kE für keine Erreichbarkeit für die linke und die rechte Hand angegeben. Die Werte für die rechte Hand erfolgen in Klammer.

| Position auf dem Display | Koordinaten der Positionen auf dem Display (x;y;z) in mm | Koordinaten des linken SDP (x;y;z) in mm | Entfernung für die Bedienung mit der linken (rechten) Hand zwischen SDP und Displayposition in mm | Erreichbarkeit mit linker (rechter) Hand |
|--------------------------|--|--|---|--|
| 1                        | 559,1; -320; 527,3                                       | -80; -187,5; 190                         | 734,7 (883,1)   | GW (kE)                                  |
| 2                        | 608,8; -320; 302,7                                       | -80; -187,5; 180                         | 712,1 (864,3)   | GW (kE)                                  |
| 3                        | 608,8; -90; 302,7  | -80; -187,5; 180                         | 706,4 (752,7)   | GW (FS)                                  |
| 4                        | 633,6; -90; 190,5  | -80; -187,5; 175                         | 720,4 (765,8)   | GW (FS)                                  |
| 5                        | 633,6; 90; 190,5   | -80; -187,5; 175                         | 765,8 (720,4)   | FS (GW)                                  |
| 6                        | 608,8; 90; 302,7   | -80; -187,5; 180                         | 752,7 (706,4)   | FS (GW)                                  |
| 7                        | 608,8; 320; 302,7  | -80; -187,5; 180                         | 864,3 (712,1)   | kE (GW)                                  |
| 8                        | 559,1; 320; 527,3  | -80; -187,5; 190                         | 883,1 (734,7)   | kE (GW)                                  |
| 9                        | 559,1; 130; 527,3  | -80; -187,5; 190                         | 789,3 (724,9)   | FS (GW)                                  |
| 10                       | 547,1; 120; 581,0  | -80; -187,5; 200                         | 795,6 (736,9)   | FS (GW)                                  |
| 11                       | 547,1; -120; 581,0                                       | -80; -187,5; 200                         | 736,9 (795,6)   | GW (FS)                                  |
| 12                       | 559,1; -130; 527,3                                       | -80; -187,5; 190                         | 724,9 (789,3)   | GW (FS)                                  |

### 3.3. Analyse der Eingabehandlungen des Piloten

Für eine umfassende Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit von Interaktionsgeräten muss die Berücksichtigung sämtlicher Eingabehandlungen sowie der Belastungskontext, in dem diese Eingaben durchgeführt werden, bekannt sein (vgl. Kap. 2.3). Beide Faktoren leiten sich aus dem Missionsspektrum des Flugzeugmusters und den damit verbundenen Aufgaben des Piloten während des Fluges ab. Im Folgenden werden die grundlegenden Aufgaben des Piloten zunächst dargestellt. Durch eine Aufgliederung der Aufgaben wird der Funktionsumfang der Schnittstelle ermittelt und alle relevanten Eingabehandlungen zusammengefasst. Anhand repräsentativer Anwendungsfälle wird dann die Struktur der Belastung erfasst, die auf den Piloten bei Eingaben auf dem Hauptinstrumentenbrett einwirkt.

#### 3.3.1. Aufgabenspektrum

Die Aufgaben des Piloten in der zivilen Luftfahrt lassen sich nach Wickens (2003) in vier Kategorien zusammenfassen. Diese lauten nach ihrer Priorität von hoch nach niedrig geordnet „Aviate“, „Navigate“, „Communicate“ und „Manage Systems“. Der militärische Handlungskontext ist in dieser Aufgabenbeschreibung nicht berücksichtigt. Um den Anteil der militärischen Aufgaben des Piloten abzudecken, wurde als zusätzliche Kategorie „Manage Tactics“ eingeführt und mittels Expertengesprächen validiert. Fügt man diese Kategorie in die nach Wickens (2003) erstellte Reihenfolge, so ist „Manage Tactics“, abhängig von der jeweiligen Flugsituation, direkt vor bzw. nach „Navi-

gation“ einzuordnen. Anders als bei Wickens (2003), der die ersten beiden Kategorien als sehr eng miteinander verwoben, in ihrer Hierarchie der Priorität jedoch eindeutig beschreibt, beurteilten die Piloten die Priorität der ersten drei Kategorien „Aviation“ „Navigation“ und „Manage Tactics“ als stark von Flugphase und Flugsituation abhängig, so dass temporäre Verschiebungen der Reihenfolge der ersten drei Kategorien in jeglicher Form auftreten können.

Erweiterte (\*) Reihenfolge der Aufgabenkategorien nach der Priorität der Aufgaben von hoch nach niedrig (Wickens, 2003; Kellerer & Eichinger, 2008):

- Aviate
- Navigate
- Manage Tactics (\*)
- Communicate
- Manage Systems

Die Aufgabenkategorien wurden in Analogie zu der bei Stanton et al. (2005) beschriebenen "Hierarchischen Task Analyse" (HTA) weiter in Funktionen, Eingabesequenzen und einzelne Eingabehandlungen untergliedert. Die dort aufgeführten Arbeitsschritte

- define task under analysis,
- data collection process,
- determine the overall goal of the task,
- determine task sub-goals,
- sub-goal decomposition &
- plans analysis

wurden in diesem Kontext wie folgt interpretiert. Der Begriff „Task“ entspricht den oben genannten Aufgabenkategorien, der Begriff „Sub-goal“ wird synonym durch den Begriff Funktion ersetzt. Die Aufgabenkategorien werden in „Determine task sub-goals“ in Funktionen aufgeteilt. Die Aufgliederung der Funktionen in Eingabesequenzen und einzelne Eingabehandlungen findet in der „Sub-goal decomposition“ statt. Diese Arbeitsschritte wurden in Zusammenarbeit mit Testpiloten der EADS durchgeführt. Dabei wurde für jede Eingabehandlung das jeweilige Eingabeelement und dessen Position im Cockpit dokumentiert. Die dabei entstandene hierarchische Funktionsbeschreibung umfasst alle grundlegenden Eingabehandlungen im Cockpit, durch die der Pilot Funktionen aktivieren, manipulieren und terminieren kann (vgl. Anhang B). Die Eingabehandlungen auf den Multifunktionsdisplays repräsentieren die in der Usability-Untersuchung zu berücksichtigenden Eingaben auf dem Großflächendisplay.

Eingabehandlungen, die derzeit auf den Multifunktionsdisplays durchzuführen sind, wie z.B. das Erstellen eines Wegpunktes oder das Anpassen des Sichtwinkels des Radars, lassen sich aufgrund der verwendeten Bediengeräte *Druckschalter* und *XY-Controller* stets auf einfache Tastendruck-Operationen zurückführen. Jede Funktion kann folglich durch entsprechende Sequenzen von *Button-Press-Operationen* abgebildet werden. Dies bildet die Grundlage für die Gestaltung der Zeigeaufgaben der Usability-Untersuchung in Kap. 4.2.1.

Im Rahmen der HTA wurden zusätzlich für alle Eingabehandlungen die Maximalwerte vertikaler Flugzeugbeschleunigungen erhoben. Basierend auf diesen Angaben werden Eingaben auf den Multifunktionsdisplays unabhängig von Missions- und Flugphase bis zu einem maximalen Lastvielfachen von 2 G durchgeführt. Bei größeren Beschleunigungen wird der Eingabevorgang für die Dauer dieser Beschleunigungen unterbrochen und danach fortgesetzt.

### 3.3.2. Belastungsstruktur

Die Leistungsfähigkeit des Mensch-Maschine-Systems wird erheblich von den verfügbaren Handlungsressourcen des Operators beeinflusst (Wickens, 2002; Goldstein, 2002). Anzahl und Schwierigkeit der zu bearbeitenden Aufgaben binden diese Ressourcen und belasten dadurch den Operator in entsprechender Weise (vgl. Kap. 2.4.2). Die Belastung ist ein wichtiger Eingangsparameter für die Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit. Es ist daher notwendig, die auf den Piloten einwirkende Belastung im Rahmen dieser Untersuchung zu berücksichtigen. Sie resultiert aus den zu erfüllenden Aufgaben des Piloten und ist zugleich vom taktischen Szenario sowie der jeweiligen Missionsphase abhängig. Zur Klassifizierung und Quantifizierung der Belastungsstruktur in Cockpits kann entsprechend dem Informationsverarbeitungsmodell nach Wickens et al. (2004) und der „Multiple Resource Theory“ (Wickens, 2002; Wickens & McCarley, 2008) zwischen den Belastungsqualitäten visuell, auditiv, kognitiv, manuell und verbal unterschieden werden. Die visuelle und auditive Belastung wird dabei der Wahrnehmung, die kognitive Belastung der Informationsverarbeitung und die manuelle und verbale Belastung der Handlungsausführung zugeordnet (vgl. Kap. 2.4.2).

Weist man diese Belastungsqualitäten den Pilotenaufgaben in Abhängigkeit von Missionsphasen zu, so ergeben sich individuelle Belastungsprofile. Zur Erhebung der Belastung vergleicht Rubio et al. (2004) unterschiedliche Methoden wie z.B. den NASA TLX (Hart, 2006), einem Werkzeug zur subjektiven Erhebung von Beanspruchung, und empfiehlt die Verwendung der von Tsang & Velazquez (1996) veröffentlichten Methode der *Workload Profiles*. Eichinger (2010) hat diese Methode zur Erhebung von *Workload Profiles* an den hier vorliegenden Kontext angepasst und die Erhebung des Belastungsprofils der Piloten mit der Methode „Cockpit Workload Profile“ (CWP) hergeleitet. Zur Erstellung der CWPs geben die Nutzer die Belastung einzelner Aufgaben an, abhängig von den dafür aufgewendeten Ressourcen. Die Bewertung der fünf Belastungsqualitäten erfolgt hier anhand einer Rating-Skala die von 0 % bis 100 % reicht (Bortz & Döring, 2006). Die Befragten werden angewiesen, der Höhe der Belastung eine entsprechende Zahl zuzuweisen. Je höher die Belastung, desto größer sollte die Zahl sein. Die Belastungshöhe kann unabhängig von den Werten der anderen Belastungsarten für jede Art zwischen 0 % und 100 % betragen, wobei 100 % der höchstmöglichen Belastung der jeweiligen Qualität bedeutet. Die Summe der fünf Einzelbewertungen beträgt daher maximal 500 %. Der Fragebogen zur Erhebung des CWP befindet sich in Anhang D.

Die Erhebung des Belastungsprofils erfordert möglichst realistische und für das Einsatzspektrum des Flugzeugmusters repräsentative Anwendungsfälle. Es wurden daher auf Grundlage des Missionsprofils des Eurofighters Anwendungsfälle erstellt, die sich aus den „Mission requirements“ (Spinoni et al., 1986) zusammensetzen. Sie lauten:

1. „Supervise air situation, threat assessment and prioritisation, defensive and offensive measures (...)“,
2. „manually override automatic functions (...)“,
3. „perform air-to-surface attacks (...)“.

Diese Anforderungen wurden durch die drei Anwendungsfälle **Combat-Air-Patrol**, **Route-Management** und **Air-to-Surface-Attack** abgebildet. Eine detaillierte Beschreibung der drei Anwendungsfälle befindet sich in Anhang C.

Zur Erstellung einer Beurteilungsbasis der Belastung im Cockpit wurde aufbauend auf den Anwendungsfällen ein repräsentatives Einsatzszenario erstellt. In Abb. 3-7 ist dieses Szenario schematisch dargestellt. Die Komponenten, welche die Anwendungsfälle im Missionsszenario abbilden, sind mit den Buchstaben A bis E gekennzeichnet und haben folgende Bedeutung:

- A. Combat Air Patrol – Patrouillenflug zur Luftraumüberwachung
- B. Alternativroute 2 mit Manipulation einer Wegpunktposition (gestrichelte Linie)
- C. Taktischer Wegpunkt, repräsentiert durch das gleichseitige rote Dreieck
- D. Navigationsflug und Rückkehr
- E. „Forward Area of Own Responsibility“ (FAOR), zu überwachender Luftraum mit zwei Flugzeugkontakten.

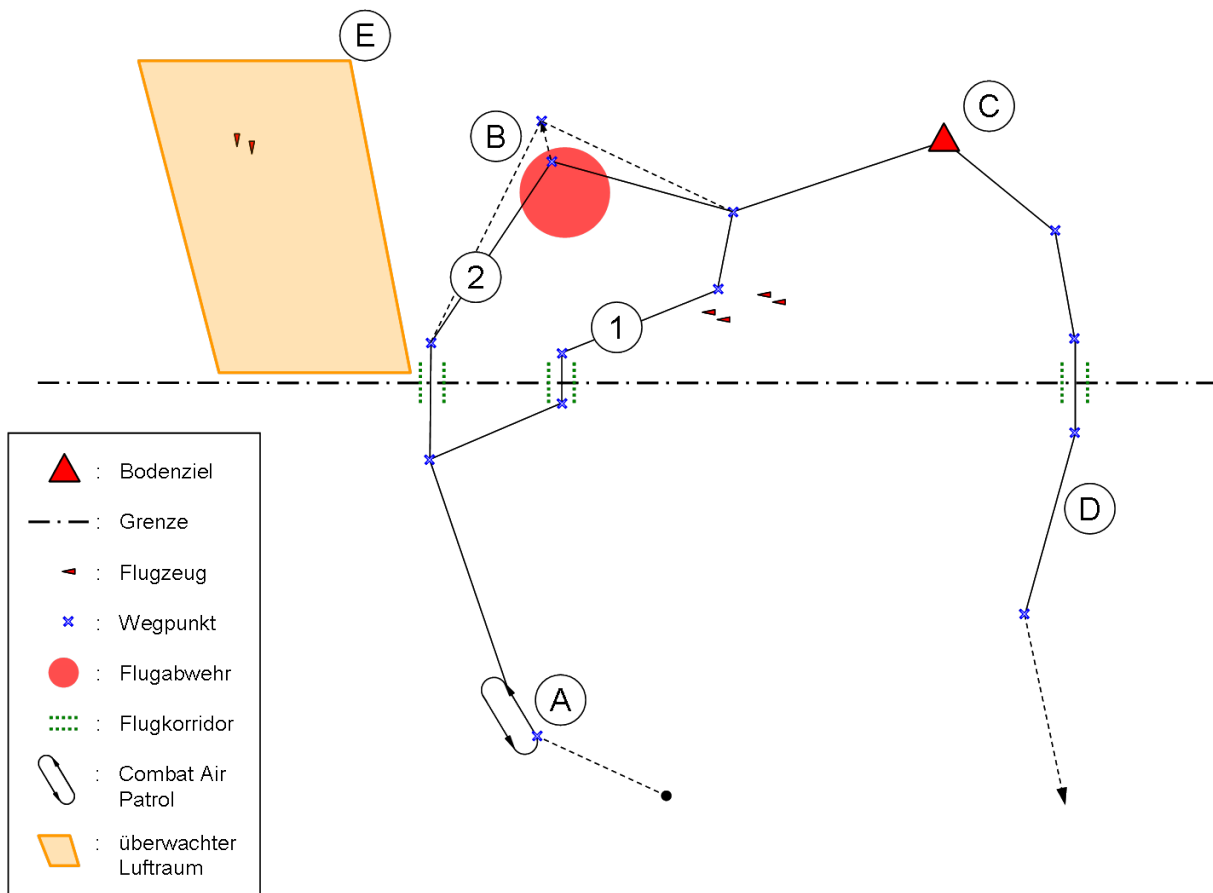


Abb. 3-7: Taktisches Missionsszenario für einen repräsentativen Flug. Der zeitliche und inhaltliche Ablauf der repräsentativen Anwendungsfälle Combat-Air-Patrol (A), Route-Management (B) und Air-to-Surface-Attack (C) ist skizzenhaft dargestellt.

Der betrachtete Flug beginnt bei A und endet bei D (vgl. Abb. 3-7). Die Punkte 1 und 2 markieren zwei Alternativrouten. Der Flug beginnt mit einer *Combat-Air-Patrol* (CAP) bei A. Die Aufgabe des Piloten hierbei ist die Überwachung des Luftraums bei E. Im Anschluss daran wird der Anflug eines taktischen Wegpunktes bei C durchgeführt. Der Flug auf der Route 1 ist durch die Präsenz weiterer Flugzeuge nicht möglich. Es wird daher auf der Alternativroute 2 das eigene Hoheitsgebiet durch einen Flugkorridor verlassen. Aufgrund einer Flugverbotszone bei B muss der Pilot die Alternativroute anpassen (*Route-Management*). Dies erfolgt durch die Änderung der Position des Wegpunktes bei B. Es folgt der Anflug des Wegpunktes bei C (*Air-to-Surface*). Im weiteren Verlauf



wird wiederum im Navigationsflug (D) in das eigene Hoheitsgebiet eingeflogen und der Zielflughafen angesteuert.

Anhand dieses Szenarios wurde im Rahmen einer Befragung, an der acht Testpiloten der EADS teilnahmen, das Belastungsprofil für die fünf Aufgabenkategorien (vgl. Kap. 3.3.1) erhoben (Kellerer & Eichinger, 2008; Eichinger et al., 2009). Hierzu wurde den Piloten das Testszenario anhand einer verbalen Einsatzbeschreibung und der Abbildung des Missionsszenarios auf entsprechendem Kartenmaterial möglichst realitätsnah vorgestellt. Zusätzlich wurde die Relevanz der Aufgabenkategorien für die drei Anwendungsfälle mit Hilfe einer Einteilung von „niedrig“ bis „hoch“ erhoben, um eine Gewichtung zu ermöglichen. Dabei mussten die befragten Testpiloten die Relevanz mit einem Zahlenwert zwischen 0, für keine Relevanz, und 1, für sehr hohe Relevanz bewerten.

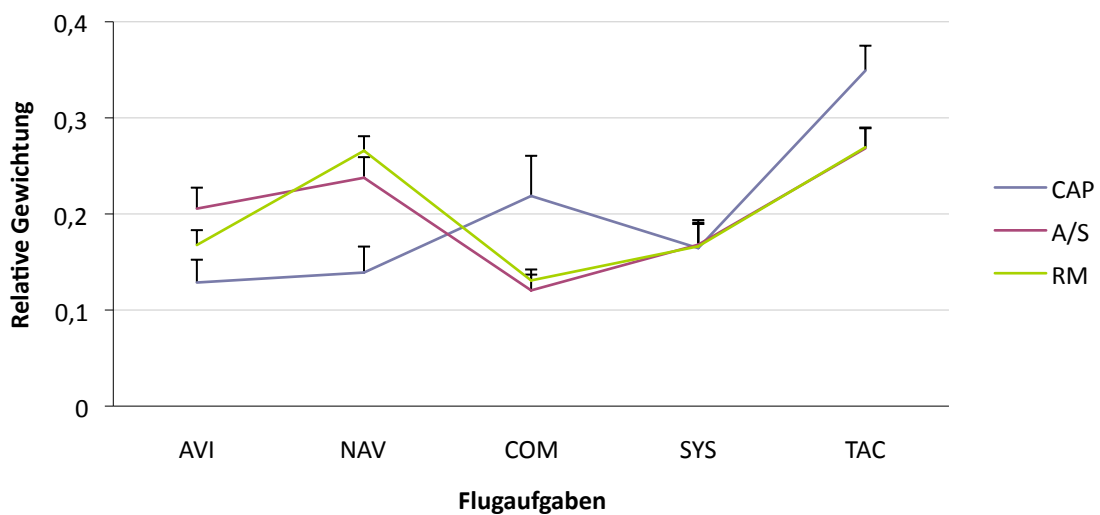


Abb. 3-8: Relevanz der Aufgabenkategorien des Piloten Aviation (AVI), Navigation (NAV), Communication (COM), Manage Systems (SYS) und Manage Tactics (TAC) für drei Anwendungsfälle Combat-Air-Patrol (CAP), Air-to-Surface-Attack (A/S) und Route Management (RM) mit Darstellung des Standardfehlers nach Eichinger (2010). Die angegebenen Werte entsprechen den jeweils berechneten Mittelwerten.

Abb. 3-8 zeigt die Relevanz der Flugaufgaben in Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsfall. Die beiden Anwendungsfälle *Route-Management* (RM, grün) und *Air-to-Surface Attack* (A/S, rot) unterscheiden sich kaum in der Relevanz ihrer Flugaufgaben. Abweichungen treten hier vor allem bei den Flugaufgaben *Aviate* (AVI) und *Navigate* (NAV) auf. Dies ist auf einen intensiveren Einsatz der Autopilotenfunktion im RM zurückzuführen. Die Relevanz der Flugaufgaben für die CAP (blau) unterscheidet sich dagegen erheblich von den beiden anderen Anwendungsfällen. Die niedrige Relevanz der Flugaufgaben AVI und NAV ist dem Einsatz des Autopiloten und dem sich zyklisch wiederholenden Flugpfad zuzuschreiben. Die erhöhte Relevanz von *Communicate* (COM) und *Manage Tactics* (TAC) spiegelt die Überwachung des zugewiesenen Luftraums und die Weitergabe der gewonnenen Information wider.

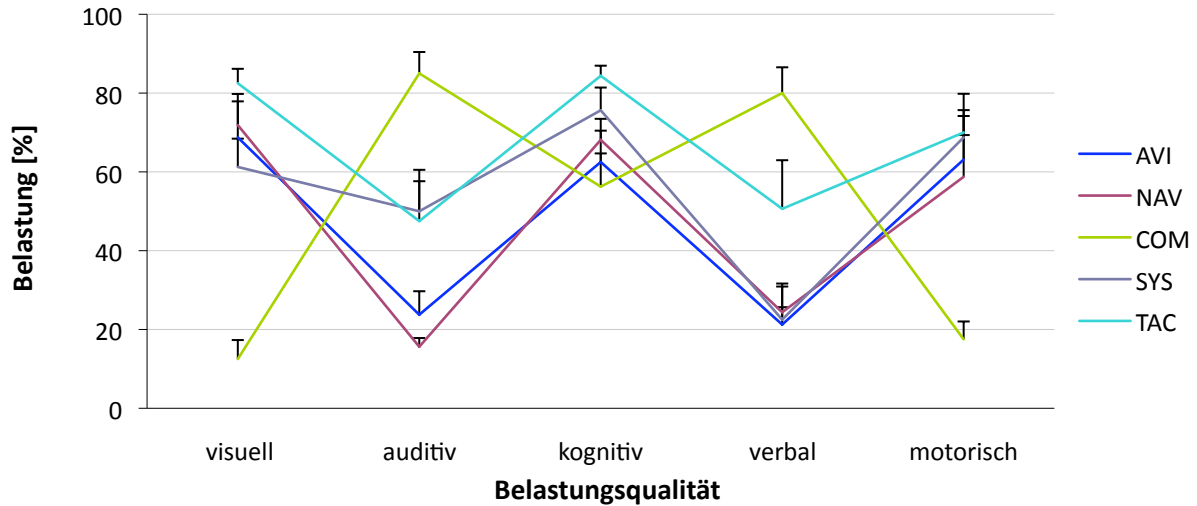


Abb. 3-9: Belastung der Piloten durch die fünf Aufgabenkategorien (vgl. Kap. 3.3.1), aufgeteilt in die fünf Belastungsqualitäten mit Angabe des Standardfehlers (vgl. Kap. 2.4). Die angegebene Belastung entspricht den berechneten Mittelwerten der Belastung (vgl. Eichinger, 2010).

In Abb. 3-9 ist die Belastung des Piloten, aufgeteilt in die verschiedenen Belastungsqualitäten, für die fünf Aufgabenkategorien angetragen. Mit Ausnahme der Aufgabenkategorie *Communicate* zeigt sich eine ähnliche Belastungsstruktur mit einer durchwegs hohen kognitiven Belastung und einer hohen visuellen und motorischen Belastung. Die Aufgaben im Bereich *Communicate* führen dagegen erwartungsgemäß zu einer hohen auditiven und verbalen Belastung. Auffällig ist das Belastungsprofil der Aufgabe *Manage Tactics*, das in allen Belastungsarten vergleichsweise hohe Werte aufweist. Es handelt sich hierbei um ein Aufgabenfeld, das zu einer besonders hohen Belastung in allen Bereichen der Informationsverarbeitung des Operateurs führt. Die Aufnahme dieser Aufgabenkategorie in Kap. 3.3.1. in die Aufgaben des Piloten ist dadurch im Nachhinein gerechtfertigt.

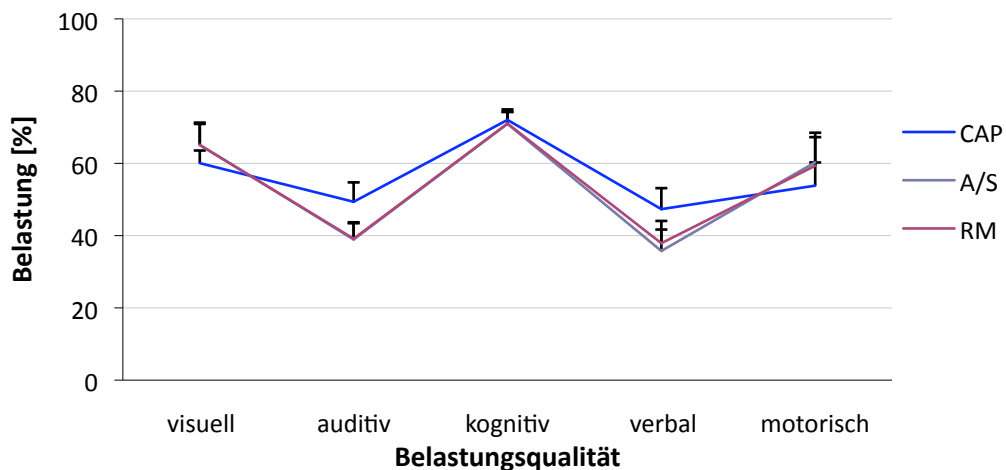


Abb. 3-10: Belastung der Piloten mit Darstellung des Standardfehlers in den betrachteten Anwendungsfällen CAP, A/S und RM, aufgeteilt in die fünf Belastungsqualitäten. Die Belastungen in den Anwendungsfällen A/S und RM sind annähernd identisch. Die dargestellten Werte entsprechen den berechneten Mittelwerten der Belastung (Eichinger, 2010).

Die Belastungsprofile der Eurofighter-Anwendungsfälle sind in Abb. 3-10 dargestellt. Sie ergeben sich durch Multiplikation der Relevanz der Aufgabenkategorien für die Anwendungsfälle (vgl. Abb. 3-8) mit dem Belastungsprofil der Aufgabenkategorien (vgl. Abb. 3-9). Besonders auffällig ist hier die ähnliche Verteilung der Belastung über die unterschiedlichen Belastungsarten (vgl. Eichinger, 2010). Die kognitive, visuelle und motorische Belastung ist deutlich stärker ausgeprägt als die auditive und verbale Belastung des Piloten. Aus Abb. 3-10 geht zudem hervor, dass die Belastungsstruktur nahezu unabhängig von dem jeweiligen Anwendungsfall ist. Der Kontext zur Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit des Touchscreens kann folglich durch diese Struktur für das Missionsprofil des Eurofighters beschrieben werden. Durch die Gestaltung der Anwendungsfälle als repräsentative „Worst Case“-Anwendungsfälle spiegelt die Belastungsstruktur in Abb. 3-10 die Maximalwerte der Belastungsqualitäten wieder.

### 3.4. Flugdynamik hochagiler Flugzeuge

Die Positionierung des Fingers auf Touchscreenbedienelementen kann in beschleunigter Umgebung zu ungewollten Relativbewegungen zwischen Finger und Displayoberfläche führen. Dadurch besteht die Möglichkeit der Beeinträchtigung der Bedienleistung (Parks, 1963). Die Relativbewegungen sind dabei abhängig von:

- der Intensität und Art der Beschleunigungen des Trägersystems,
- dem Antwortverhalten des Hand-Arm-Systems auf diese Bewegungen und
- der Fähigkeit des Benutzers, diese Abweichungen zu kompensieren.

Im Folgenden wird daher zunächst eine Klassifizierung der in Flugzeugen auftretenden Beschleunigungen vorgenommen. Auf dieser Grundlage erfolgt die Analyse des Beschleunigungsspektrums des betrachteten Flugzeugmusters. Mit Hilfe der in Kap. 3.3 ermittelten Aufgliederung der Aufgaben des Piloten in einzelne Bedienhandlungen kann abhängig von Missions- und Flugphase den Bedienhandlungen ein differenziertes Beschleunigungsspektrum zugewiesen werden. Die Bestimmung des Antwortverhaltens des Hand-Arm-Systems auf diese Beschleunigungen ermöglicht eine Quantifizierung der nicht intendierten Relativbewegungen zwischen Finger und Display bzw. dem Touchscreenbedienelement. Daraus kann eine Abschätzung von Bedienleistung und Gebrauchstauglichkeit der Schnittstelle in Abhängigkeit von der Bedienfeldgröße der Touchscreenbedienelemente erfolgen.

#### 3.4.1. Klassifizierung der Beschleunigungen im Cockpit

Beschleunigungen in Flugzeugcockpits resultieren aus unterschiedlichen Flugzeugbewegungen, die zum Großteil durch Änderungen der Anströmungsverhältnisse hervorgerufen werden. Diese Änderungen können gewollt zur Steuerung des Flugzeugs oder ungewollt, wie etwa bei sog. „Pilot Induced Oscillations“ (Höhne, 2001), vom Piloten durch Eingaben an den Steuerungselementen Stick und Schubhebel herbeigeführt werden. Zudem können sie aus Böen und Turbulenzen der Luft resultieren. Dies führt je nach Intensität der Änderung der Anströmung zu einer Zu- oder Abnahme des aerodynamischen Auftriebs und dadurch zu Beschleunigungen des Flugzeugs. Die sich überlagernden Beschleunigungen unterschiedlicher Qualität werden durch mehrere Kenngrößen charakterisiert. Nach Griffin (1996) sind dies Frequenz, Amplitude, Richtung und Dauer der Einwirkung.

Flugzeugbewegungen, welche diese Beschleunigungen hervorrufen, können nach Harris (2002) deterministisch, zufällig oder beides sein. Deterministische Bewegungen werden als intendierte Beschleunigungen bezeichnet und können weiter in periodische und nicht-periodische Bewegungen unterteilt werden. Zufällige Bewegungen können quasi-stationär oder instationär sein und treten als Flugzeugvibrationen und Turbulenzen auf. Durch Superposition der unterschiedlichen Beschleunigungsarten wirken auf den Piloten Beschleunigungen, die sich aus intendierten Beschleunigungen, Flugzeugvibrationen und Turbulenzen zusammensetzen (Griffin, 1996; von Gierke et al., 1991). Es ist anzunehmen, dass zufällige Beschleunigungen die Eingabeleistung in größerem Maße beeinträchtigen als intendierte (Rühmann, 1983). Im hier betrachteten Kontext erscheint daher eine differenzierte Betrachtung der auftretenden Beschleunigungen notwendig.

#### 3.4.1.1. Intendierte Beschleunigungen

Intendierte Beschleunigungen sind in der Regel deterministisch. Sie resultieren aus Steuereingaben des Piloten, die zu Ausschlägen der Ruderklappen und zu Schubänderungen führen. Zur Beschreibung dieser Beschleunigungen kann der Begriff *Vibration* nicht und *Schwingung* nur eingeschränkt verwendet werden (Harris, 2002). Die Beschleunigungen resultieren aus Piloteneingaben und entsprechen idealisiert einer Rechteckfunktion mit einer ansteigenden und einer absteigenden Flanke endlicher Steigung und einem dazwischen liegenden Intervall konstanter Auslenkung. Die Steigung der beiden Flanken ist abhängig von der Flugzeugdynamik und der Intensität der Eingaben des Piloten. Diese Rechteckfunktion lässt sich durch Überlagerung mehrerer Schwingungsanteile beschreiben. Intendierte Beschleunigungen sind daher meist quasi-statisch. Es kommt dann abhängig vom Dämpfungsverhalten des Flugzeugs und von den Piloteneingaben zu sinusförmigen vertikalen Flugzeugbewegungen (Höhne, 2001). Diese Antworten des Flugzeugs auf Steuereingaben des Piloten werden von Eigenbewegungen und -schwingungen des Flugzeuges in den verfügbaren Freiheitsgraden überlagert. Dabei handelt es sich um die Anstellwinkelschwingung, die Phygoidschwingung, die Roll-/Gierschwingung sowie die Roll- und Spiralbewegung (Brockhaus, 1994). Diese Schwingungen bewirken aufgrund der jeweiligen Ausprägung ihrer Dämpfung, Frequenz und Amplitude geringfügige Beschleunigungen im Cockpit und werden für die Betrachtungen von Auswirkungen der Flugdynamik auf die Stabilität des Hand-Arm-Systems bei Piloteneingaben nicht gesondert betrachtet (Hafer & Sachs, 2002).

#### 3.4.1.2. Flugzeugvibrationen

Flugzeugvibrationen sind Vibrationen von Flugzeugteilen, die durch Anregung von Subsystemen des Flugzeugs wie z.B. Turbinen, Fahrwerk oder Flügelemente in deren Eigenfrequenz hervorgerufen werden. Nach Harris (1988) besteht Vibration meist nicht aus einer sinusförmigen und harmonischen Schwingung, sondern besitzt ein weites Frequenzspektrum mit variablen Amplituden, in dem sich die Schwingungen überlagern. Hierbei wird zwischen deterministischer und zufälliger Vibration unterschieden. Ist Vibration deterministisch, folgt sie einem bestimmten Muster, so dass das Frequenzspektrum und die Amplituden für jeden zukünftigen Zeitpunkt ermittelt werden können. Handelt es sich um zufällige Vibration, so sind zukünftige Schwingungszustände nicht vorhersagbar und eine Charakterisierung der Vibration ist allein durch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Frequenzen und deren Auslenkungen möglich.

### 3.4.1.3. Turbulenzen

Turbulenzen sind Beschleunigungen, die aus dem Antwortverhalten des Flugzeugs auf umweltbedingte Anströmungsänderungen wie Windböen oder andere inhomogene Luftschichten entstehen. Sie entsprechen einer schockartigen Systemauslenkung und zeichnen sich durch eine nicht-periodische Erregung aus, die durch die Einleitung eines kurzzeitigen und sprunghaften Impulses in das mechanische System hervorgerufen wird. Die Bezeichnung Schock impliziert hierbei eine plötzliche und heftige Erregung des Systems (Harris, 1988). Das Antwortverhalten des Flugzeugs auf Windböen und atmosphärische Turbulenzen wird durch den Anstellwinkel abhängigen Auftriebsbeiwert  $C_{A\alpha}$  und durch die Flächenbelastung der Tragflügel (abhängig vom Verhältnis Flugzeuggewicht zu Flügelfläche) beeinflusst. Je größer  $C_{A\alpha}$  und je kleiner die Flächenbelastung ist, desto größer sind die resultierenden Anstellwinkel bei Böeneinwirkung in der vertikalen Flugzeugachse (z-Achse, vgl. Abb. 3-2). Das Antwortverhalten des durch einen Schock erregten Systems wird durch die freie und gedämpfte Schwingung in der Eigenfrequenz des erregten Systems charakterisiert.

### 3.4.2. Beschleunigungsspektrum - Analyse von Flugdaten

Das Beschleunigungsspektrum hochagiler Flugzeuge besteht aus omnidirektionalen Schwingungen unterschiedlicher Frequenzen und Amplituden, besitzt nichtperiodische und schockartige Anteile und wird von temporär auftretenden Beschleunigungssprüngen einer endlichen Wirkungsdauer überlagert. Es kann sich dabei um intendierte Beschleunigungen, Flugzeugvibrationen oder Turbulenzen handeln (vgl. Kap. 3.4.1).

Die Beschleunigungen lassen sich durch die Parameter Frequenz, Amplitude, Wirkdauer und Richtung der Auslenkung klassifizieren. Die Richtung der Auslenkung wird in dem bereits eingeführten Koordinatensystem (vgl. Kap. 3.2.1) angegeben. Das Beschleunigungsspektrum ist in erheblichem Maße abhängig von den atmosphärischen Gegebenheiten wie Luftdichte, Windgeschwindigkeit, -richtung und der Homogenität der Luftschichten sowie von der situationsbedingten Dynamik des Flugzeugs.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Flugdaten eines mit entsprechender Messinstrumentierung ausgestatteten Versuchsträgers des Flugzeugmusters Eurofighter hinsichtlich der im Cockpit auftretenden vertikalen und lateralen Beschleunigungen repräsentativer Flugzustände analysiert. Der Verlauf des Versuchsfluges war so gewählt, dass die atmosphärischen Gegebenheiten und die Flugdynamik den drei Anwendungsfällen in Kap. 3.3.1 entsprechen. Die Beschleunigungsdaten wurden während des gesamten Fluges in allen Flugphasen von *Take Off* bis *Approach & Landing* aufgezeichnet (vgl. Kap. 3.1).

Das Beschleunigungsmessgerät wurde vom DEP (vgl. Abb. 3-3) aus gesehen in Flugrichtung hinter den Cockpitanzeigen im Bereich der Flugzeuglängsachse montiert. Die durch Drehungen um den Flugzeugschwerpunkt hervorgerufenen Beschleunigungsamplituden im Cockpit sind daher in jedem Fall etwas niedriger als die vom Gerät gemessenen Beschleunigungen. Es wurden vertikale und laterale Beschleunigungen aufgezeichnet. Beschleunigungen in Richtung der Flugzeuglängsachse werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Sie sind für diese Betrachtung irrelevant, da sie größtenteils aus Schubänderungen des Piloten resultieren. Zu diesem Zeitpunkt finden keine Eingaben am Hauptinstrumentenbrett statt, da sich die Hände des Piloten an Schubhebel und Stick

befinden. Darüber hinaus ist das Display nahezu senkrecht zur Flugzeuginnenachse montiert. Beschleunigungen in dieser Richtung führen daher zu keinen oder nur sehr geringen Positionsänderungen des Fingers auf dem Hauptinstrumentenbrett.

In Abb. 3-11 sind die vom Messgerät aufgezeichneten Beschleunigungsverläufe in y- und z-Richtung in Vielfachen der Erdbeschleunigung über die Dauer des gesamten Fluges dargestellt. Das Abtastintervall der aufgezeichneten Daten beträgt 0,001536 s. Die Daten wurden mit Hilfe des Programms „Origin<sup>®</sup>“ analysiert und der Beschleunigungsverlauf mittels Fast-Fourier-Transform (FFT) in die einzelnen Frequenzanteile zerlegt. Da die Beschleunigungen im Cockpit während des gesamten Fluges größtenteils nichtperiodisch sind, lässt die FFT nur qualitative Aussagen über die Frequenzverteilung und die entsprechenden Amplituden zu. Die Beschleunigungsamplituden der Einzelfrequenzen werden daher normiert dargestellt (vgl. Abb. 3-12). Um quantitative Aussagen über die Amplituden und Frequenzen einzelner Schwingungsverläufe machen zu können, werden repräsentative und zeitlich diskrete Signalintervalle mit möglichst harmonischer Schwingungsverteilung gewählt. Zur Glättung der Sprünge der endlichen Signalstruktur der FFT wird die Rechteck-Fensterfunktion verwendet (Rapuano & Harris, 2007).

#### *Vertikale Beschleunigungen*

Die Beschleunigungen in z-Richtung betragen für diesen Flug maximal 5,5 G und minimal 0,0 G. Die Beschleunigungsamplituden liegen, ausgehend von der im Horizontalflug wirkenden einfachen Erdbeschleunigung von 1,0 G, zwischen +4,5 G und -1,0 G. Eine qualitative Analyse der Beschleunigungsdaten mit Hilfe einer FFT zwischen Start und Landung zeigt für Frequenzen unter 1,0 Hz vergleichsweise große Beschleunigungen. Frequenzen über 1,0 Hz treten dagegen mit sehr geringen Beschleunigungsamplituden auf, dies entspricht auch der Frequenzbeschreibung für Flugzeuge bei Griffin (1996).

#### *Beschleunigungsanteile mit einer Frequenz $f > 1,0$ Hz*

Lokale Maxima im Frequenzbereich über 1,0 Hz befinden sich bei 8 Hz und 13 Hz. Eine graphische Auswertung der Daten zeigt, dass diese Frequenzen mit Schwingungsamplituden von jeweils maximal 0,1 G auftreten. Dies entspricht Bewegungsamplituden des Flugzeugs von 0,4 mm bis 0,15 mm. Bei diesen Bewegungen ist von Schwingungen auszugehen, die von Flugzeugvibrationen und Turbulenzen hervorgerufen werden (vgl. Kap. 3.4.1.).

Die Beschleunigungen mit Frequenzen kleiner als 1 Hz lassen sich in zwei Gruppen über- und unterhalb von 0,5 Hz aufteilen.

#### *$0,5\text{Hz} < f < 1,0$ Hz*

Die maximalen Beschleunigungsamplituden der Frequenzen zwischen 0,5 Hz und 1,0 Hz liegen nach einer graphischen Analyse der vorliegenden Daten bei 0,2 G. Dies entspricht Bewegungsamplituden des Flugzeugs zwischen 202,6 mm und 50,6 mm. Hierbei handelt es sich um Flugzeugbewegungen, die durch intendierte Schwingungen und Turbulenzen hervorgerufen werden.

#### *$f < 0,5$ Hz*

Für Frequenzen unterhalb von 0,5 Hz betragen die Beschleunigungsamplituden nach graphischer Analyse der Flugdaten bis zu 4,5 G. Dabei handelt es sich hauptsächlich um intendierte und länger andauernde Beschleunigungen (vgl. Kap. 3.4.1.).

#### *Laterale Beschleunigungen*

In y-Richtung variieren die Beschleunigungen symmetrisch um den Nullpunkt. Maximalwerte der Beschleunigungen in y-Richtung reichen in wenigen Situationen bis zu +/- 0,4 G, betragen über die gesamte Flugdauer jedoch weniger als +/- 0,1 G. Die FFT-Analyse der Beschleunigungsdaten in y-Richtung zeigt für das gesamte Frequenzspektrum deutlich niedrigere Beschleunigungen als in z-Richtung. Die Frequenzen von Beschleunigungen in lateraler Richtung mit nennenswerten Amplituden liegen im gesamten Flugverlauf über 5 Hz. Die maximalen Schwingungsamplituden betragen daher weniger als 0,5 mm.

#### Zusammenfassung

Das Frequenzspektrum und die Verteilung der zugehörigen Amplituden entsprechen den Erwartungswerten des regelungstechnischen Modells des Eurofighters (Osterhuber, 2009). Beschleunigungen mit Frequenzen unter 1,0 Hz resultieren größtenteils aus dem Antwortverhalten des Flugzeugs auf Steuereingaben des Piloten sowie der Antwort auf Turbulenzen. Die Frequenzanteile über 1,0 Hz lassen sich aufgrund ihrer verhältnismäßig geringen Beschleunigungsamplituden größtenteils unter dem Begriff Flugzeugvibrationen zusammenfassen (vgl. Kap. 3.4.1). Diese Aufteilung der Beschleunigungen in Frequenzbereiche über und unter 1,0 Hz sowie die Klassifizierung und Quantifizierung gilt durch Berücksichtigung der gesamten Flugdaten für alle Flugphasen und Anwendungsfälle.

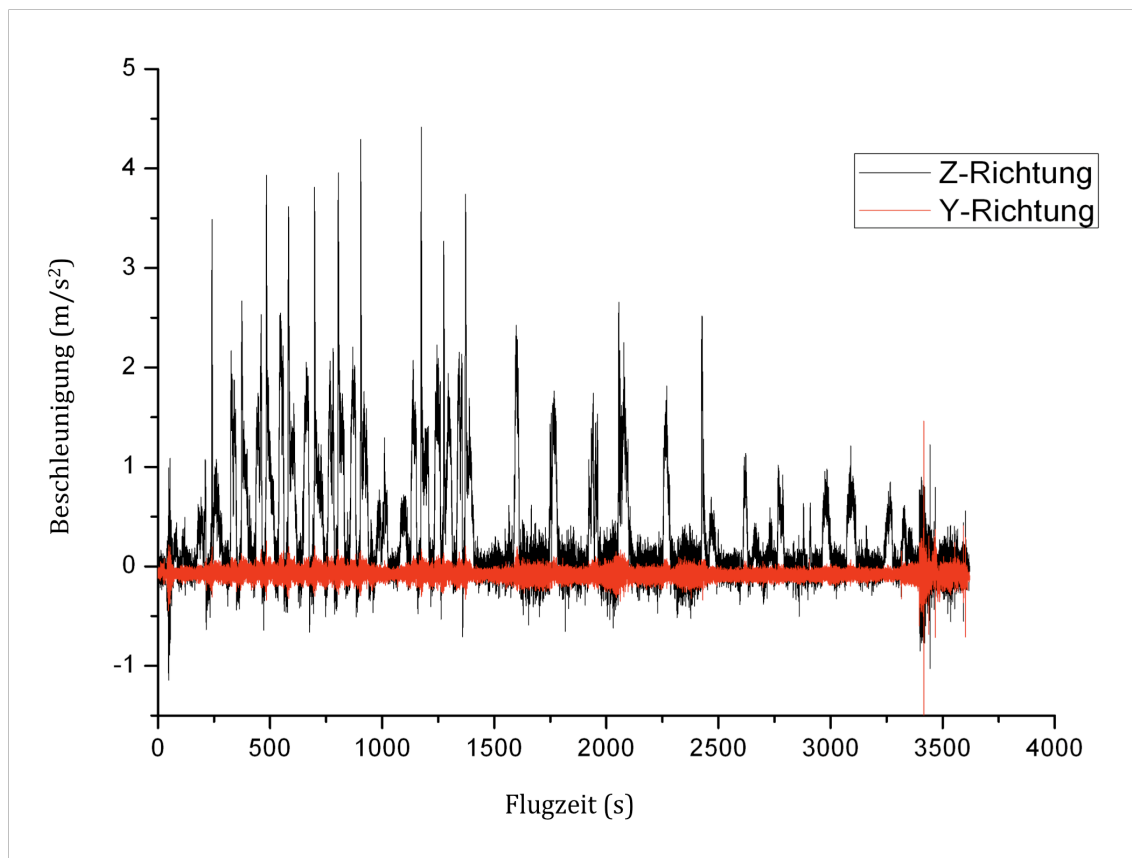


Abb. 3-11: Beschleunigungen im Flugzeugcockpit eines Eurofighters. Die Beschleunigungen in z-(schwarz) und y-Richtung (rot) wurden während des gesamten Fluges dokumentiert und werden als Vielfache der Erdbeschleunigung G angegeben.



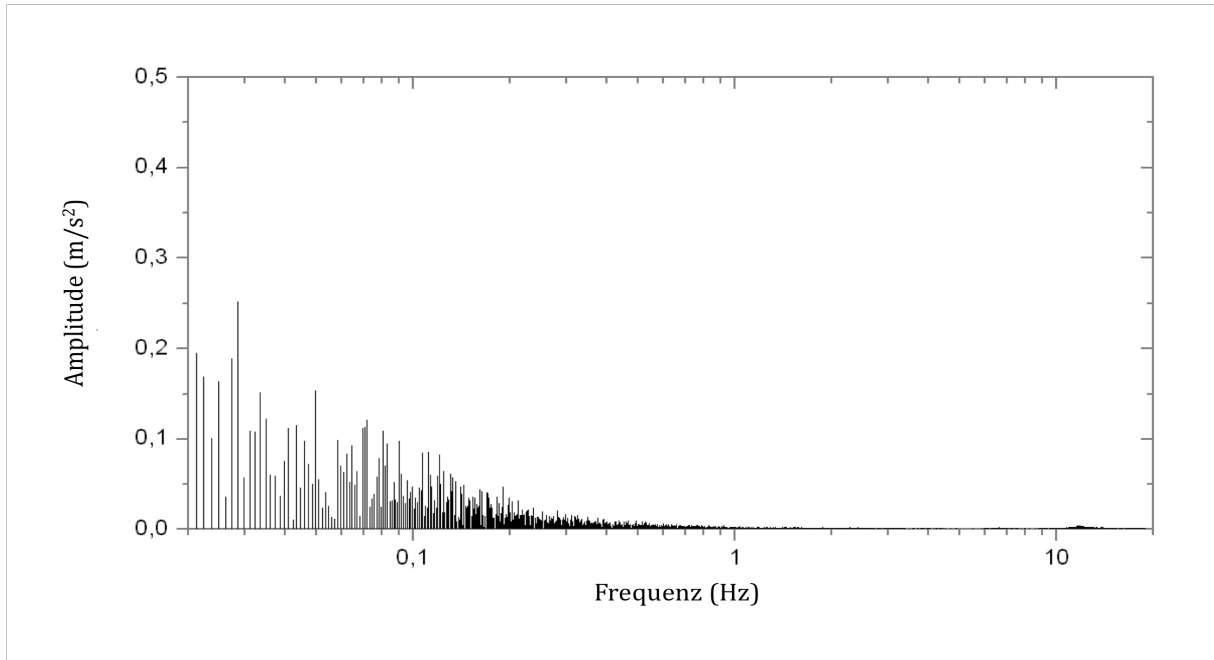


Abb. 3-12: Ergebnis einer FFT-Analyse der Beschleunigungen in z-Richtung für den in Abb. 3-11 dargestellten Eurofighter-Flug. Es werden die jeweiligen Anteile der Frequenzen am Gesamtspektrum der Schwingungen des Cockpits während des Fluges angetragen.

### 3.5. Einfluss von Beschleunigungen auf die Bedienleistung des Piloten

Werden Handlungen in einem bewegten Arbeitsumfeld ausgeführt, so ist beim Auftreten einer erhöhten Schwingungsbelastung stets eine Beeinträchtigung der menschlichen Leistungsfähigkeit zu erwarten. Das Ausmaß der Beeinträchtigung ist abhängig von der Intensität der Beschleunigungen (Schmidtke, 1974; Kolich, 2006). Im Folgenden werden zunächst die unterschiedlichen Auswirkungen von Beschleunigung auf die menschliche Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von Frequenz und Amplitude zusammengefasst. Auf Grundlage des in Kap. 3.4.3. erarbeiteten Beschleunigungsspektrums des betrachteten Flugzeugmusters wird das Antwortverhalten des Hand-Arm-Systems auf mechanische Schwingungseinwirkung und die Kompensationsfähigkeit des Menschen im Kontext dieser Arbeit analysiert. Hieraus lässt sich die Beeinträchtigung des Operateurs bei Eingabehandlungen auf dem Großflächendisplay bestimmen und neben dem Aufgaben- und Belastungsspektrum auch die Flugdynamik bei den vorliegenden Betrachtungen der Gebrauchstauglichkeit berücksichtigen.

#### 3.5.1. Leistungsfähigkeit des Menschen in bewegter Umgebung

Es treten nach von Gierke et al. (1991) drei Möglichkeiten der Beeinflussung der menschlichen Leistungsfähigkeit durch Beschleunigungen und Vibrationen auf. Diese setzen sich aus mechanischer, physiologischer und psychologischer Beeinflussung zusammen.

*Mechanische Auswirkungen* von Beschleunigungen beschreiben die Vergrößerung des Gewichts einzelner Körperteile oder des gesamten Körpers. Dies kann sich sowohl auf innere Organe als auch auf die Position der Extremitäten beziehen. Beschleunigungen und Schwingungen können zu

Beeinträchtigungen innerer Körperfunktionen bis zur Schädigung von Organen führen. Erhöhte Beschleunigungen und deren Änderungen bedingen höhere Muskelkräfte, um Kopf, Torso und Extremitäten in der gewünschten Position zu halten (Henning, 1991). Hier können Ermüdungserscheinungen beanspruchter Muskelgruppen auftreten, die ohne das Einhalten entsprechender Erholzeiten die Handlungsausführung erschweren und nach dem Erreichen der Leistungsgrenze zum Handlungsabbruch führen (Rohmert, 1981). Nach Coermann (1963), NASA-STD-3000 (1995), Griffin (1996) und von Gierke et al. (1991) liegen für Personen in sitzender Haltung die Resonanzfrequenzen innerer Organe, des Oberkörpers und der Hals-Kopf-Region zwischen 2 Hz und 30 Hz. Die Auswirkungen der Flugzeugschwingungen auf innere Organe werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Die Resonanzfrequenz des Hand-Arm-Systems ist abhängig von der Stellung der beteiligten Gelenke und der Kontraktion unterschiedlicher Muskelgruppen und daher nur im Kontext der Handlungsausführung und der jeweiligen Umweltbedingungen zu bestimmen. Wird das Hand-Arm-System bei den in dieser Arbeit betrachteten Touchscreen-Eingaben in der Resonanzfrequenz angeregt, so sind Relativbewegungen zwischen Finger und Display zu erwarten.

Die *physiologische Beeinflussung* der menschlichen Leistungsfähigkeit umfasst die Auswirkungen auf den menschlichen Organismus wie Sicht, Nervensystem, Herzschlagrate und Blutdruck. Nach Grether (1971) verändern sich die Reaktionszeiten bei einfachen Wahlreaktionsaufgaben unter Schwingungsbelastung nicht. Carver (1977) und Dudek & Clemens (1965) stellen gegenüber statischen Bedingungen eine Verkürzung der Reaktionszeiten unter Vibrationseinflüssen fest. Eine Beeinträchtigung der Reaktionszeit durch Schwingungseinwirkung ist also nicht zu erwarten.

Eingaben auf visuellen Anzeigegeräten im hier betrachteten Kontext finden unter ständiger visueller Kontrolle statt. Eine Verschlechterung der Sicht tritt nach Griffin (1996) bei einer Frequenz zwischen 8 Hz und 9 Hz und Vibrationsamplituden von  $1,5 \text{ m/s}^2$  auf. Erhöhte Beschleunigungsexposition über 5,5 G in z-Richtung können zu einem Ausgrauen der Sicht, temporärem Sichtverlust bis zur Bewusstlosigkeit führen (Gauer & Zuidema, 1961). Die Ergebnisse der Analyse der Beschleunigungen im Cockpit zeigen klar, dass bei Eingaben auf den Multifunktionsdisplays die oben genannten Werte für Schwingungen und Beschleunigungen nicht erreicht werden (vgl. Kap. 3.4.2). Eine Beeinträchtigung der Sicht bei Eingaben auf dem Hauptinstrumentenbrett ist folglich nicht zu erwarten.

Änderungen von Gelenkstellungen, Bewegungen und aufgebrachten Kräften dieser Bewegungen werden durch kinästhetische Sinneszellen in Gelenken, Muskeln und Sehnen erfasst (Goldstein, 2002; Grunwald & Beyer, 2001) und lösen Korrekturbewegungen der Stützmotorik aus. Die Einwirkung erhöhter mechanischer Schwingungen und Beschleunigungen kann durch die Beeinträchtigung der kinästhetischen Wahrnehmung zu Störungen der menschlichen Motorik und zu einer Abnahme oben genannter Korrekturbewegungen führen (Rühmann, 1983). Eine Beeinträchtigung der kinästhetischen Sinneszellen durch Schwingungsbelastung ist für die in Kap. 3.4.2 ermittelten Frequenzen und Amplituden jedoch nicht zu erwarten (Hornick, 1963). Die Fähigkeit des Menschen die oben genannten mechanischen Auswirkungen auf das Hand-Arm-System zu kompensieren ist daher hauptsächlich vom Antwortverhalten des Menschen auf unwillkürliche Auslenkungen des Hand-Arm-Systems abhängig.

*Psychologische Effekte* können durch die Reduzierung verfügbarer kognitiver Ressourcen auftreten und führen zu einer Beeinträchtigung der visuellen Informationsaufnahme, mentaler Speicher- und Informationsverarbeitungskapazitäten und der Bedienhandlungen (von Gierke et al.,

1991). Die mentale Informationsverarbeitung und Leistungsfähigkeit, wie etwa Additionsaufgaben, Mustererkennung und Navigationsverhalten, wird nach Hornick (1963) und Griffin (1996) bei Frequenzen bis 20 Hz nicht beeinträchtigt. Beeinträchtigungen mentaler Leistungsfähigkeit treten nach Albery, Ward & Gill (1985) bei Belastungen bis 6 G in z-Richtung nicht auf. Nach Hornick (1963) und Grether (1971) verändern sich die Reaktionszeiten bei einfachen Wahlreaktionsaufgaben unter Schwingungsbelastung nicht. Die mentale Leistung wird nach Schohan et al. (1965) nicht oder nur in geringem Maße durch Beschleunigungseinwirkung und frequenzunabhängig beeinträchtigt. Psychologische Effekte, die durch die hier betrachteten Beschleunigungen hervorgerufen werden und zu einer Reduzierung der Bedienleistung im Cockpit führen, sind demnach nicht zu erwarten.

*Zusammenfassung*

In NASA-Std-3000 (1995) ist der Einfluss von Schwingungen auf die menschliche Leistungsfähigkeit abhängig von der Frequenz für unterschiedliche Aufgabenarten zusammengefasst. Vergleicht man die Ergebnisse der Analyse der Beschleunigungen und Schwingungen in Kap. 3.4.2. mit den Frequenzbereichen in Tab. 3-2, sind aufgrund geringer Frequenzanteile und niedriger Amplituden in der Dynamik des Eurofighters keine Beeinträchtigungen der menschlichen Leistungsfähigkeit zu erwarten. Insbesondere im Frequenzintervall von 3 Hz bis 8 Hz, in dem nach NASA-STD-3000 (1995) eine Beeinträchtigung des manuellen Trackings auftritt, sind die Frequenzanteile und Amplituden im Frequenz- und Beschleunigungsspektrum des Eurofighters sehr gering.

Die Beeinträchtigung der menschlichen Leistungsfähigkeit bei Eingaben auf einem Touchscreen-Display durch Schwingungs- und Beschleunigungsbelastung in Kampfflugzeugen ist daher vor allem abhängig von mechanischen Auswirkungen auf das Hand-Arm-System, die zu einer ungewollten Disposition zwischen Hand und Display führen, und der physiologischen Beeinflussung des Regelverhaltens des Menschen bei Korrekturbewegungen.

Tab. 3-2: *Einflussbereich von Schwingungsbelastung auf unterschiedliche Aufgaben (NASA-STD-3000, 1995).*

| <b>Aufgabe</b>                 | <b>Frequenzbereich (Hz)</b> |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Gleichgewichtssinn             | 30 - 300                    |
| Taktiler Sinn                  | 30 - 300                    |
| Sprache                        | 1 - 20                      |
| Kopfbewegungen                 | 6 - 8                       |
| Lesen (Text)                   | 1 - 50                      |
| Tracking                       | 1 - 30                      |
| Ablesefehler (Instrumente)     | 5.6 - 11.2                  |
| Manuelles Tracking             | 3 - 8                       |
| Tiefenempfindung               | 25 - 40, 60 - 40            |
| Von Hand gehaltener Haltegriff | 200 - 240                   |
| Visuelle Aufgaben              | 9 - 50                      |

### 3.5.2. Antwortverhalten des Hand-Arm-Systems auf mechanische Schwingungen

Die vom Piloten intendierten Bewegungsabläufe des Hand-Arm-Systems werden durch die resultierenden Kräfte der auftretenden Beschleunigungen und Schwingungen überlagert. Dies kann je nach Frequenz und Amplitude der wirkenden Beschleunigung zu einer unbeabsichtigten Disposition des Hand-Arm-Systems bei freien, zielmotorischen Bewegungen führen, wie sie bei Eingaben auf berührungsempfindlichen Anzeigegeräten der Fall sind.

Im Folgenden wird mit Hilfe biomechanischer Grundlagen sowie dem Regelverhalten des Menschen das Antwortverhalten des Hand-Arm-Systems auf mechanische Schwingungen und Beschleunigungen hergeleitet. Dadurch lassen sich die Ablenkungen des Hand-Arm-Systems und Relativbewegungen zwischen Finger und Displayoberfläche infolge statischer Lastvielfache und dynamischer Flugzeugschwingungen des betrachteten Flugzeugmusters abhängig von den in den Missionsphasen auszuführenden Bedienhandlungen herleiten.

#### 3.5.2.1. Richtung der Beschleunigungseinwirkung

Beschleunigungen in y-Richtung werden aufgrund der geringen Amplituden von weniger als 0,5 mm (vgl. Kap. 3.4.2.) nicht weiter betrachtet. Die Analyse des Antwortverhaltens beschränkt sich daher im Folgenden auf Beschleunigungen und Schwingungen in z-Richtung.

#### 3.5.2.2. Statische Lastvielfache

Bei Änderungen der Beschleunigung auf Körperteile müssen zusätzliche Kräfte aufgebracht werden, um die gewünschte Körperhaltung beizubehalten (vgl. Kap. 3.5.1). Nach Henning (1991) wird ab einer Belastung von 2 G in der z-Achse das Aufstehen erheblich schwieriger, ab 3 bis 4 G nahezu unmöglich. Die Fähigkeit zu Sprechen wird mit steigender Belastung zunehmend eingeschränkt, bleibt jedoch bis zu einer Belastung von 9 G in der z-Achse erhalten (Henning, 1991). Treten erhöhte Schwingungsbelastungen über einen längeren Zeitraum auf, so kann dies in den vom Muskelapparat gestützten Körperteilen zu Ermüdungserscheinungen führen (Rohmert, 1981). Müssen Muskeln aufgrund statischer Belastung mehr als 15 % der maximalen Haltekraft aufbringen, so führt dies temporär zu einer Abnahme der maximalen Haltekraft und zu einer Begrenzung der Haltezeit (Rohmert, 1981). Kommt es im Navigationsflug z.B. zur Änderung des Kurses oder der Fluglage, können erhöhte Beschleunigungen mit Beschleunigungsmaxima von bis zu 4,5 G auftreten (vgl. Kap. 3.4.2). Bleibt die Hand des Piloten während dieser kurzzeitigen Beschleunigungsphase an den Eingabeelementen am Hauptinstrumentenbrett, so treten auch hier Ermüdungserscheinungen auf, welche zu Beeinträchtigungen der Leistungsfähigkeit des Piloten führen können. Für eine nähere Betrachtung dieser Ermüdungserscheinungen wird im Folgenden ein vereinfachtes biomechanisches Modell des Hand-Arm-Systems verwendet.

Es wird hier davon ausgegangen, dass aufgrund der hohen Belastung die Muskelgruppen, die zur Stabilisierung des Hand-Arm-Systems beitragen, maximal angespannt sind. Aus diesem Grund wird das Schultergelenk als feste Einspannung des Hand-Arm-Systems am Rumpf betrachtet. Das Schultergelenk kann daher Normal- und Querkräfte sowie Drehmomente um die y-Achse aufnehmen. Das Ellbogengelenk setzt sich aus den drei Gelenkteilen des Oberarm-Ellen-Gelenks (Articu-

latio humeroulnaris), des Oberarm-Speichen-Gelenks (Articulatio humeroradialis) und des proximalen Ellen-Speichen-Gelenks (Articulatio radioulnaris proximalis) zusammen und kann wegen der Haltung des Hand-Arm-Systems und der möglichen Gelenkwinkel des Ellbogengelenks als starres Gelenk betrachtet werden (Hermsdörfer, 2002).

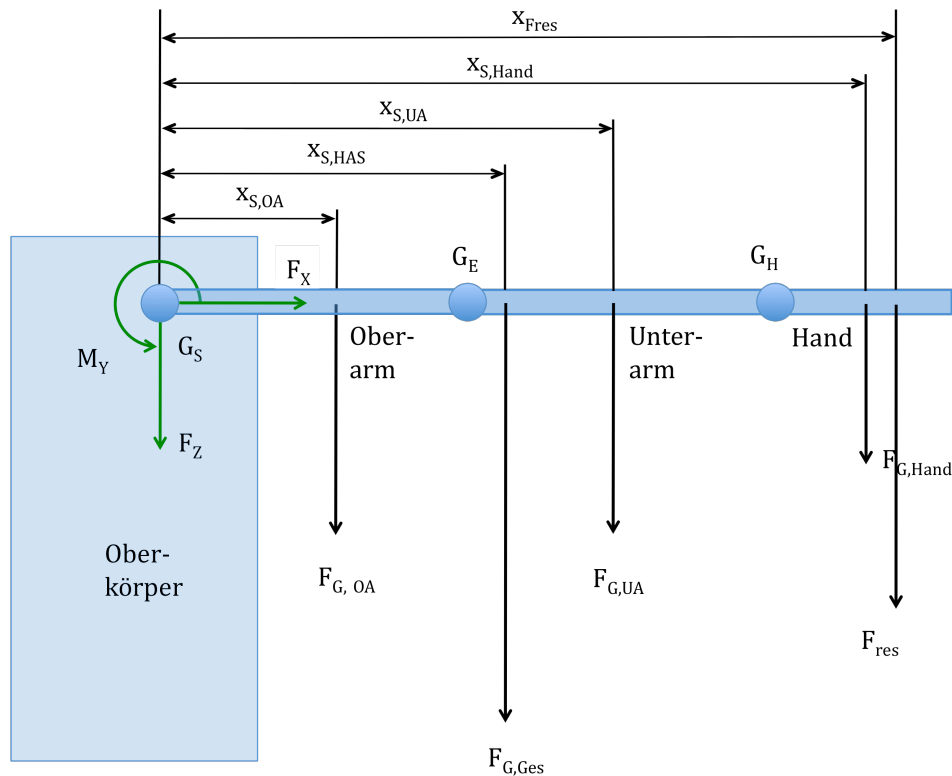


Abb. 3-13: Vereinfachte Skizze des biomechanischen Modells des Hand-Arm-Systems. Gelenke in Ellbogen und Hand ( $G_E$  und  $G_H$ ) werden aufgrund der Kräfteinwirkung als starr angenommen. Die Gewichtskräfte ( $F_G$ ) von Oberarm, Unterarm und Hand, sowie das Gesamtgewicht des Hand-Arm-Systems werden mit dem Abstand des jeweiligen Schwerpunktes ( $x_s$ ) vom Schultergelenk ( $G_S$ ) aus angegeben (vgl. Anhang A). Aus dem Momentengleichgewicht im Schulterdrehpunkt lässt sich die aus der Schwerkraft des Hand-Arm-Systems resultierende Kraft im Kraftangriffspunkt des Umfassungsgriffes der Hand berechnen.

Wegen der geringen Belastung des Handgelenks durch das Gewicht der Hand wird dieses ebenfalls als starr angenommen. Die maximalen Haltekräfte des Hand-Arm-Systems sind in DIN 33411-4 (1987) für das 50. Perzentil von Männern zwischen 20 und 25 Jahren zusammengefasst. Angaben zu anderen Perzentilgruppen sind in der Literatur nicht zu finden. Für die Berechnungen der Haltezeiten der beiden extremen Perzentilgruppen, des 5. und 95. Perzents, werden daher aus Mangel an entsprechenden Angaben die maximalen Haltekräfte aus der DIN 33411-4 (1987) übernommen. Werte zur Körpermasse, Körperhöhe und den Positionen der Schwerpunkte der Elemente des Hand-Arm-Systems der Stichprobe werden dort nicht angegeben. Sie werden daher der Sammlung aus Kap. 3.2.3 entnommen. In Anhang A sind die benötigten biomechanischen Kennwerte der Schwerpunkte und Massen der Einzelelemente des Hand-Arm-Systems angegeben. Daraus kann der Gesamtschwerpunkt des Hand-Arm-Systems für das 5. und 95. männliche Perzentil ermittelt werden. Dieses wird für die Berechnung der Haltekraft benötigt.

Bei dem Auftreten einer erhöhten Beschleunigungsbelastung wirkt eine zusätzliche Gewichtskraft im Gesamtschwerpunkt  $F_{G,Ges}$  des Hand-Arm-Systems. Gewichtskräfte und Hebelarme dieser zu-

sätzlichen Belastung sind in Abb. 3-13 in einem vereinfachten biomechanischen Modell des Hand-Arm-Systems zusammengefasst. Diese Kraft erzeugt aufgrund der Anspannung der Muskelgruppen der Schulter ein Drehmoment um die y-Achse in der Schulter des Piloten. Zur Stabilisierung des Hand-Arm-Systems müssen dabei entsprechend der Zunahme des Drehmoments Haltekräfte in der Schulter aufgebracht werden.

$$M_{SDP} = F_{G,OA} \cdot x_{S,OA} + F_{G,UA} \cdot x_{S,UA} + F_{G,Hand} \cdot x_{S,Hand}$$

$M_{SDP}$ : Moment im Schulterdrehpunkt

$F_{G,OA}$ : Gewichtskraft des Oberarms

$F_{G,UA}$ : Gewichtskraft des Unterarms

$F_{G,Hand}$ : Gewichtskraft der Hand

$x_{S,OA}$ : Schwerpunkt des Oberarms, vom Schulterdrehpunkt gemessen

$x_{S,UA}$ : Schwerpunkt des Unterarms, vom Schulterdrehpunkt gemessen

$x_{S,Hand}$ : Schwerpunkt der Hand, vom Schulterdrehpunkt gemessen

Aus diesem Drehmoment im Schulterdrehpunkt und der Entfernung des Handangriffspunkts vom Schulterdrehpunkt kann die resultierende Kraft im Kraftangriffspunkt in der Hand entsprechend dem in DIN 33411-4 (1987) definierten Kraftangriffspunkt errechnet werden.

$$F_{res} = \frac{M_{SDP}}{x_{Fres}}$$

$M_{SDP}$ : Moment im Schulterdrehpunkt

$x_{Fres}$ : Kraftangriffspunkt des in diesem Punkt resultierenden Gesamtgewichts des Hand-Arm-Systems, vom Schulterdrehpunkt gemessen

$F_{res}$ : Resultierendes Gesamtgewicht des Hand-Arm-Systems im Kraftangriffspunkt in der Hand (Umfassungsgriff) bei einfacher Erdbeschleunigung 1 G

Mit Hilfe der DIN 33411-4 (1987) kann die maximale Haltekraft für die hier vorliegende Armhaltung bestimmt werden. Aus aufgewendeter und maximaler Haltekraft kann nach Bubb (1981) und Schmidtke & Groner (1989) die maximale Haltezeit und die Erholzeit bei bekannter Haltedauer ermittelt werden.

$$t_{max} = -1,5 + 2,1 \cdot \left( \frac{F_{max}}{F_h} \right) - 0,6 \cdot \left( \frac{F_{max}}{F_h} \right)^2 + 0,1 \cdot \left( \frac{F_{max}}{F_h} \right)^3$$

$t_{max}$ : Maximale Haltezeit

$F_h$ : tatsächliche zu haltende Gewichtskraft im Kraftangriffspunkt in der Hand

$F_{max}$ : Maximal haltbare Gewichtskraft im Kraftangriffspunkt in der Hand

$$t_{EZ} = 18 \cdot t_a \cdot \left( \frac{t_a}{t_{max}} \right)^{1,4} \cdot \left( \frac{t_a}{t_{max}} - 0,15 \right)^{0,5}$$

$t_{EZ}$ : Erholzeit bei zeitlich begrenzter statischer Haltearbeit

$t_a$ : Dauer der statischen Haltearbeit

$t_{\max}$ : Maximale Haltezeit

Aus Kap. 3.4.2. lassen sich aufgrund einer graphischen Analyse der Flugdaten längerfristige Beschleunigungsbelastungen im Bereich bis 2 G und kurzfristige Beschleunigungsspitzen bis zu 4,5 G feststellen. Die Interaktionsdauern können für einfache Eingabesequenzen im Bereich bis 2 G mit 15 s angegeben werden. Hierzu werden Interaktionssequenzen von bis zu zehn Eingabehandlungen angenommen. Diese reichen aus, um grundlegende Funktionen, wie etwa die Änderung von Wegpunkteigenschaften, durchzuführen (vgl. Anhang B). Für komplexere Eingaben auf dem Hauptinstrumentenbrett ist davon auszugehen, dass der Pilot einen Flugabschnitt mit einer geringeren Beschleunigungsbelastung auswählt. Rühmann (1983) stellt einen solchen Effekt bei der Durchführung seiner Evaluation in einem bewegten Simulator fest und spricht hier von einer Abwarte-Strategie der Versuchspersonen. Beschleunigungsspitzen im Bereich von 4 G treten nach graphischer Analyse der Flugdaten nur für wenige Sekunden auf. Hier wird deshalb ein Zeitintervall von maximal 6 s angenommen, in dem der Pilot zwei bis drei Eingabehandlungen durchführen kann. Es ist davon auszugehen, dass weitere Eingabesequenzen unter derartigen physischen und auch psychischen Belastungen vom Piloten nicht durchgeführt werden. In der folgenden Berechnung der maximalen Haltezeiten bzw. der jeweiligen Erholzeiten werden diese Werte als Anhaltspunkt bzw. als Beispielwerte für die Einschätzung der Belastung der Piloten im Cockpit bei Touchscreeneingaben verwendet. Für die beiden Belastungssituationen lassen sich zwei unterschiedliche Haltekräfte im Handangriffspunkt berechnen.

$$F_{h,2G} = 2 \cdot F_{res} ; \text{ für Belastungsniveau} = 2 \text{ G}$$

$$F_{h,4G} = 4 \cdot F_{res} ; \text{ für Belastungsniveau} = 4 \text{ G}$$

$F_{h,2G}$ : Die im Kraftangriffspunkt resultierende Haltekraft bei einer Belastung von 2 G auf den Gesamtorganismus (Beschleunigungen im Flugzeug)

$F_{h,4G}$ : Die im Kraftangriffspunkt resultierende Haltekraft bei einer Belastung von 4 G auf den Gesamtorganismus (Beschleunigungen im Flugzeug)

$F_{res}$ : Resultierendes Gesamtgewicht des Hand-Arm-Systems im Kraftangriffspunkt in der Hand (Umfassungsgriff) bei einfacher Erdbeschleunigung 1 G

Tab. 3-3: Zusammenfassung der resultierenden Haltekräfte, maximalen Haltezeiten und Erholzeiten für die beiden Belastungsstufen von 2 G für einen Zeitraum von 15 s und 4 G für 6 s.

| Belastung (a, t) | Parameter       | 5. Perzentil      | 95. Perzentil    |
|------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| 2 G, 15 s        | $F_{res, Hand}$ | 28,70 N           | 47,97 N          |
|                  | $t_{\max}$      | 2,27 min          | 1,37 min         |
|                  | $t_{EZ}$        | 0,06 min (3,6 s)  | 0,16 min (9,6 s) |
| 4 G, 6 s         | $F_{res, Hand}$ | 57,40 N           | 95,95 N          |
|                  | $t_{\max}$      | 0,70 min          | 0,27 min         |
|                  | $t_{EZ}$        | 0,22 min (13,2 s) | 1,00 min (60 s)  |

Die daraus resultierenden Halte- und Erholzeiten sind in Tab. 3-3 zusammengefasst. Hieraus folgt, dass Eingaben mit einer Dauer von 6 s am Hauptinstrumentenbrett bis 4 G ausgeübt werden können, das Hand-Arm-System dann jedoch bis zu 60 s (95. Perzentil) benötigt, um sich von dieser Anstrengung wieder vollständig zu erholen. Anhand dieser Daten ist grundsätzlich von Touch-



screen-Eingaben ohne weitere Hilfsmittel, wie etwa der in Kap. 2.3.5 vorgestellten haptischen Rahmenleiste, abzusehen. Bei Beschleunigungen bis zu 2 G, bei denen nach Kap. 3.3.1 Eingabehandlungen am Hauptinstrumentenbrett stattfinden, ist die maximale Haltezeit sehr viel größer mit gleichzeitig sehr geringen Erholzeiten. Bei einer Belastung von 2 G sind daher Eingabesequenzen von mehr als zehn Eingabehandlungen möglich, ohne zu größeren Ermüdungserscheinungen beim Operateur zu führen.

Werden also die Erholzeiten eingehalten tritt bei Touchscreen-Eingaben auf dem Hauptinstrumentenbrett und längeren Betätigungszeiten bei 2 G keine dauerhafte Ermüdung des Hand-Arm-Systems und dadurch keine Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit des Piloten auf.

### 3.5.2.3. Dynamische Flugzeugschwingung

Das Antwortverhalten des Menschen auf Schwingungsbelastung hängt neben der Körpermasse und deren Verteilung von der Körperhaltung und der Muskelspannung ab, die wiederum von der jeweiligen Situation und Handlungsabsicht des Menschen beeinflusst werden (ISO 5982, 2001). Die Eigenfrequenz des Körpers ist dabei direkt proportional zur Federsteifigkeit, die sich aus Muskelspannung und deren Beschaffenheit ergibt. Werden also die Muskeln im Körper angespannt, so führt dies zu einer höheren Eigenfrequenz verglichen mit einer entspannten Körperhaltung. Eine allgemeine Definition des Schwingungsverhaltens des Körpers, seiner Organe und der Extremitäten ist nicht möglich. Dies gilt, aufgrund der unterschiedlichen Gelenkstellungen und Muskelspannungen sowie unterschiedlicher Bewegungsvarianten, im Besonderen für das Hand-Arm-System (ISO 5982, 2001).

Nach ISO 5982 (2001) lassen sich nur qualitative Aussagen über ein typisches Schwingungsverhalten des Körpers treffen. Demnach verhält sich der menschliche Körper bei der Einleitung von Schwingungen unterhalb von 2 Hz wie ein einfacher Massepunkt. Die Auslenkungen der Anregung entsprechen somit den Auslenkungen des Körpers. Für Frequenzen über 2 Hz nähert sich das Verhalten des Körpers denen eines gedämpften Feder-Masse-Schwingers an. Für Sitzhaltungen im Automobil wurde der Bereich der Eigenfrequenz für Ganzkörperschwingungen nach Rakheja (2002) zwischen 6,5 und 8,6 Hz angegeben. Die Resonanzfrequenz des Rumpfes und der Schulter für Beschleunigungen in der z-Achse liegt nach ISO 5982 (2001) und NASA-3000 (1995) zwischen 4 Hz und 6 Hz. Für die Hand liegt der Bereich der Resonanzfrequenz zwischen 30 Hz und 40 Hz. Die Auslenkungen des Körpers bei einer Anregung in dieser Eigenfrequenz können dabei das 1,5 bis 2-fache der Anregungsamplitude betragen. Im Intervall zwischen 8 und 15 Hz tritt eine weitere Körperresonanz auf (ISO 5982, 2001). Nach Griffin (1996) werden Ganzkörperschwingungen mit Maximalbeschleunigungen unter 0,001 G kaum wahrgenommen. Unter 1 Hz bzw. über 20 Hz werden höhere Amplituden für die Wahrnehmung benötigt. Der Bereich erhöhter Schwingungswahrnehmung liegt zwischen 1 Hz und 30 Hz (NASA-STD-3000, 1995).

Die im Eurofighter auftretenden Schwingungen teilen sich im Navigationsflug in einen niederfrequenten Bereich unter 1 Hz mit Beschleunigungen von bis zu 4,5 G und einen Bereich mit geringen Beschleunigungsanteilen über 1 Hz auf. Dies entspricht den Angaben bei Griffin (1996). Die in der Nähe des Sitzes gemessene Vibration in z-Richtung beschreibt er für „modern military jet aircraft“ folgendermaßen: „... the vibration is not particularly severe. It can be seen that the spectrum is dominated by motion at frequencies below 1 Hz.“ (Griffin, 1996). Dies entspricht auch den Untersuchungen von Rühmann (1983) und Paddan & Griffin (1995).

Die Schwingungsamplituden im Bereich über 1 Hz liegen unterhalb von 1,0 mm und sind daher im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigbar. Dies gilt für die in Kap. 3.4.2. analysierten Flugdaten. Schwingungen mit Frequenzen unter 1 Hz treten mit deutlich wahrnehmbaren Beschleunigungsamplituden über 100 mm auf. Für diesen Bereich kann der menschliche Körper bei gestrecktem Hand-Arm-System und ausreichender Muskelspannung als einfacher Massepunkt betrachtet werden. In diesem Fall gilt für Schwingungen im Flugzeug unter 1 Hz, dass keine Phasenverschiebung zwischen Finger und Touchscreen-Oberfläche zu erwarten ist. Änderungen der Muskelspannung können zu einem veränderten Dämpfungs- bzw. Schwingungsverhalten des Hand-Arm-Systems führen. Treten Beschleunigungen unerwartet und mit Amplituden bis zu 4 G auf, kann dies aufgrund einer zu geringen Vorspannung des Muskelapparates zu ungewollten Relativbewegungen zwischen Display und Finger führen.

An dieser Stelle hängt die Abweichung vom Regelverhalten des Piloten und der Qualität der ausgeführten Korrekturbewegungen ab.

### 3.5.2.4. Regelverhalten

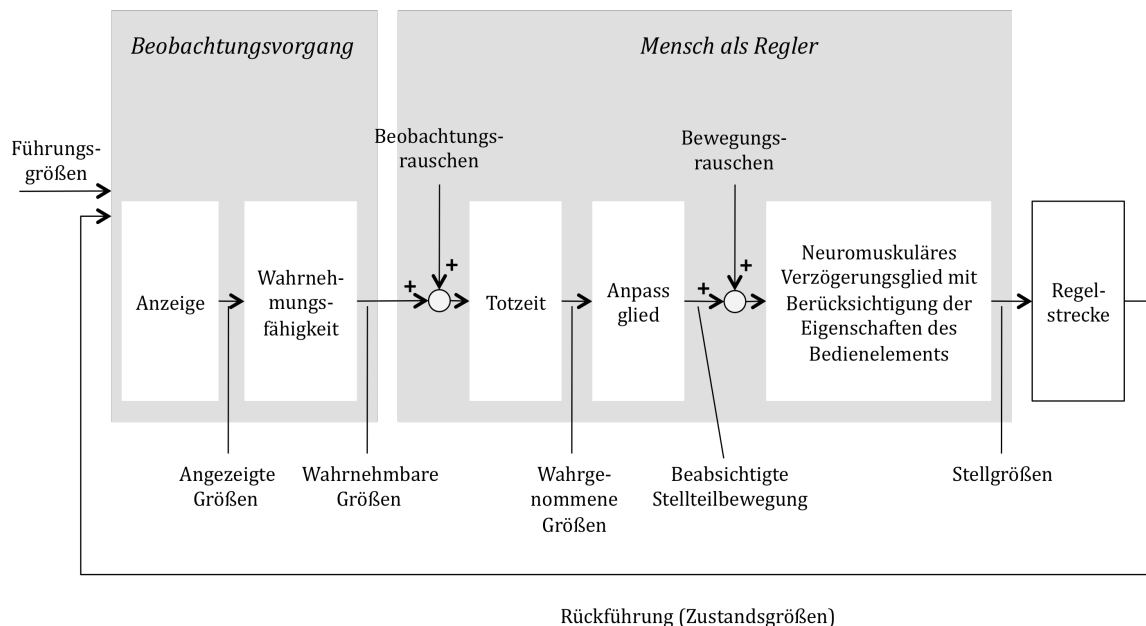


Abb. 3-14: Modell des Menschen als Regler nach Bubb (1981). Unterschiedliche Einflüsse beeinträchtigen Qualität und Geschwindigkeit von Reaktionen des Menschen auf wahrgenommene Reize aus der Umwelt und begrenzen dadurch die maximale Regelfrequenz des Menschen.

In der Mensch-Maschine-Dynamik wird der vom Menschen regelbare Frequenzbereich von der Reaktions- bzw. Erkennungszeit des Operators festgelegt (vgl. Abb. 3-14). Die Obergrenze bildet die Reizschwelle des jeweiligen Informationsaufnahmekanals. Vorgänge, die schneller als 200 ms ablaufen, überschreiten diese Reizschwelle und werden vom Menschen als sprunghaft empfunden (Bubb, 1981). Die maximal regelbare Grenzfrequenz beträgt demnach 2,5 Hz. Bedingt durch die Trägheit der menschlichen Extremitäten liegt eine sinnvolle Grenze bei 1 Hz (Bubb, 1981). Nach Brockhaus (1994) und MIL-STD-1797 (1990) liegt der vom Pilot gewünschte Frequenzbereich der Anstellwinkelschwingung bei simulierten Zielverfolgungsaufgaben in hochagilen Flugzeugen zwischen 0.4 bis 0.6 Hz. Extrem langsam ablaufende Vorgänge unterschreiten dagegen die

Schwelle der menschlichen Bewegungswahrnehmung und bilden die untere Grenzfrequenz des regelbaren Frequenzbereichs. Die Schwingungen in dem hier betrachteten Flugzeug liegen deutlich unter 1 Hz. Man kann also davon ausgehen, dass der Pilot bei Turbulenzen bzw. nicht intendierten Flugzeuggewebungen in der Lage ist, die resultierenden Relativbewegungen des Hand-Arm-Systems zwischen Displayoberfläche und Finger bei Touchscreen-Eingaben zu kompensieren. Dies entspricht den Ergebnissen bei Rühmann (1983), wonach „die mit einer praxisnahen Belastungssituation einhergehende Leistungsreduktion bei hoch geübten sensomotorischen Koordinationsleistungen (Touchscreen-Eingaben), anders als bei kontinuierlichen Regelaufgaben, vernachlässigbar klein ist“ (Rühmann, 1983).

#### 3.5.2.5. Zusammenfassung

Im horizontalen Navigationsflug sind keine Beeinträchtigungen des Hand-Arm-Systems bei Touchscreen-Eingaben auf dem Hauptinstrumentenbrett zu erwarten. Ablenkungen des Fingers bei Eingaben aufgrund von Flugzeugvibrationen und Turbulenzen, die nicht vom Piloten kompensiert werden können, betragen im betrachteten Anwendungsfall auch bei maximalen Beschleunigungsamplituden weniger als 1,0 mm und sind daher für Genauigkeitsbetrachtungen von Touchscreen-Eingaben zu vernachlässigen. Treten intendierte Beschleunigungen auf, so können diese aufgrund der niedrigen Schwingungsfrequenzen vom Piloten sensomotorisch kompensiert werden und führen in dem Beschleunigungsintervall von 0,0 G bis zu 2,0 G und den angenommenen Belastungszeiten zu keinen Ermüdungserscheinungen, die über längere Zeit hinweg eine Reduzierung der Bedienleistung erwarten lassen würden.

Eine Beeinträchtigung der Bedienleistung bei Touchscreen-Eingaben auf Großflächendisplays in hochagilen Flugzeugen ist daher im Allgemeinen nicht zu erwarten. Sollte während des Fluges die Notwendigkeit bestehen, auch in extremen Situationen über 4,0 G Eingaben auf dem Hauptinstrumentenbrett durchzuführen, verfügt der Pilot über die Möglichkeit auf redundante Eingabegeräte wie XY-Controller oder DVI auszuweichen.

## 4. Evaluation der Bedienelemente

Im Rahmen dieser Evaluation erfolgt der qualitative Vergleich der Bedienleistung von Touchscreen und Trackball sowie die Erhebung quantitativer Leistungsmaße in dem in Kap. 3 beschriebenen Verwendungskontext mit dem Ziel der Überprüfung der Hypothesen (vgl. Kap. 2.5). Die Bedienleistung wird dabei direkt über die Eingabeleistung der beiden Bedienelemente in Zeigeaufgaben und indirekt über unterschiedliche Leistungsmaße repräsentativer Zusatzaufgaben ermittelt. Die Ausprägungen der erhobenen Leistungsmaße bilden die Grundlage zur Auswahl des primären Bedienelements sowie der Formulierung weiterführender Gestaltungsvorschläge.

### 4.1. Experimentelles Vorgehen

Das experimentelle Vorgehen zur Überprüfung der Hypothesen muss durch die Auswahl geeigneter Versuche und Versuchsbedingungen die Erhebung von Bedienleistung und Benutzerakzeptanz der betrachteten Bedienelemente sowie einen repräsentativen Belastungskontext sicherstellen. Dazu werden aus den Hypothesen Konsequenzen für das Versuchsdesign abgeleitet, die Inhalte und Vorgehen festlegen (vgl. Abb. 4-1).

Die Erhebung der Bedienleistung der beiden Interaktionselemente erfolgt anhand von Zeigeaufgaben auf dem Großflächendisplay. Dabei werden durch unterschiedliche Konfigurationen der anzuwählenden Ziele repräsentative, standardisierte und realitätsnahe Eingaben in hochagilen Flugzeugen abgebildet (Kellerer et al., 2009). Eine detaillierte Beschreibung der Zeigeaufgaben *Single Targets* und *Multiple & Moving Targets* folgt in Kap. 4.2.1. Grundlage für die Gestaltung der Zielkonfigurationen bilden die in Kap. 3.3.1. ermittelten Eingabesequenzen (vgl. Anhang B). Die Benutzerakzeptanz von Touchscreen und Trackball wird über Fragebögen erfasst.

Der Belastungskontext wird durch die Verwendung von Zusatzaufgaben realisiert, die gleichzeitig mit den Zeigeaufgaben zu bearbeiten sind. Die Wahl der Zusatzaufgaben beruht auf der ermittelten Belastungsstruktur im Cockpit, die sich durch mäßige auditive und verbale und hohe visuelle, kognitive und manuelle Belastungsqualitäten auszeichnet. Eindimensionale visuelle, kognitive und manuelle Belastung wird durch die standardisierten Zusatzaufgaben *Sternberg Aufgabe (kognitiv)*, *Visuelle Suchaufgabe* und *Motorische Aufgabe* realisiert. Mehrdimensionale Belastung wird durch die Kombination mehrerer Einzelaufgaben in der Zusatzaufgabe *Komplexe Aufgabe* realisiert.

Belastung im Cockpit zeichnet sich neben den unterschiedlichen Arten und der Dimension der Belastung ebenfalls durch das Belastungsniveau aus. In Expertengesprächen mit Eurofighter Testpiloten der EADS in Manching wurde das Belastungsniveau im Cockpit und die Häufigkeit des Auftretens der verschiedenen Niveaus ermittelt (Eichinger, 2010). Es wird an dieser Stelle zwischen sehr niedriger, geringer, mittlerer, erhöhter und sehr hoher Belastung unterschieden. Dabei wechseln sich längere Zeitintervalle mit sehr niedriger bis mittlerer Belastung mit kurzen Intervallen mit erhöhter und sehr hoher Belastung ab. Diese Belastungsniveaus werden durch zwei

Schwierigkeitsstufen der Zusatzaufgaben, die einer sehr niedrigen bis mittleren und einer erhöhten bis sehr hohen Belastung entsprechen, in den Versuchen abgebildet. Die Anpassung der Schwierigkeit der unterschiedlichen Zusatzaufgaben ermöglicht daher eine repräsentative Abbildung der in Kap. 3.3.2. erstellten Belastungsstruktur. Die Schwierigkeitsstufen der Zusatzaufgaben wurden in Vorversuchen so angepasst, dass sie den Belastungssituationen hinsichtlich Struktur und Niveau entsprechen (Eichinger, 2010). Eine Überprüfung der tatsächlichen Belastung der Versuchspersonen bei der Bearbeitung der unterschiedlichen Aufgabenvarianten findet nach jedem Experimentaldurchgang mittels einer Fragebogenerhebung statt.

| Hypothesen            | Vorgangsbeschreibung   | Konsequenzen der Hypothesenprüfung für das Versuchsdesign  |
|-----------------------|--|--|
| Hypothese H1          | Erhebung der Bedienleistung von Touchscreen und Trackball in <i>Zeigeaufgaben</i>  | Zeigeaufgaben  |
| Hypothese H2          | Erhebung der Bedienleistung von Touchscreen und Trackball in Zeigeaufgaben und <i>Berücksichtigung des Belastungskontextes durch das simultane Bearbeiten von Zusatzaufgaben</i> | Zusatzaufgaben   |
| Hypothese H3a         | Leistungsprüfung der Bedienelemente in einem standardisierten Handlungskontext   | Definition der standardisierten Aufgaben:<br><i>Zeigeaufgabe Single Targets;</i><br><i>Zusatzaufgaben Sternberg Aufgabe, Motorische Aufgabe &amp; Visuelle Suchaufgabe</i> |
| Hypothese H3b         | Leistungsprüfung der Bedienelemente in einem realitätsnahen Handlungskontext   | Definition der realitätsnahen Aufgaben:<br><i>Zeigeaufgabe Multiple &amp; Moving Targets;</i><br><i>Zusatzaufgabe Komplexe Aufgabe</i>                                     |
| Hypothese H4          | Berücksichtigung unterschiedlicher Belastungsstufen bei der Leistungsprüfung   | Ausführung der Zusatzaufgaben in den Schwierigkeitsstufen niedrig und hoch   |
| Hypothese H5          | Die Wahl des Bedienelements wirkt sich auf die Leistung in Zeige- und Zusatzaufgabe aus  | Erhebung der Bedienleistung in den Zeige- und Zusatzaufgaben   |
| Hypothese H6          | Die Verwendung des Touchscreens ist zufriedenstellender als die des Trackballs   | Akzeptanzprüfung durch <i>Usability-Fragebögen</i>   |
| Zentrale Hypothese ZH | Summe der Untersuchungsergebnisse  | -  |

Abb. 4-1: Übersicht über die Hypothesen mit einer Kurzbeschreibung und die Konsequenzen der Hypothesenprüfung auf das Versuchsdesign, die sich auf die Inhalte und die Art und Weise der Leistungserhebung erstrecken.

Aufgrund begrenzter Handlungsressourcen der Versuchspersonen ist eine Variation der Bedienleistung in den Zeige- und Zusatzaufgaben, abhängig von dem Bedienelement der Zeigeaufgabe und von der Verteilung der Aufmerksamkeit auf Zeige- und Zusatzaufgabe, zu erwarten (vgl. Kap. 2.4.2). Aus diesem Grund wird die Verteilung der Aufmerksamkeit auf Zeige- und Zusatzaufgabe für die verschiedenen Versuchsdurchgänge vom Versuchsleiter vorgegeben. Dabei wird zwischen einer gleichmäßigen Verteilung der Aufmerksamkeit auf beide Aufgaben und einer Priorisierung der Zeige- bzw. Zusatzaufgabe unterschieden. Dies führt zu folgendem Vorgehen bei der Hypothesenprüfung (vgl. Abb. 4-1).

Die Überprüfung der Hypothese H1 findet durch den direkten Vergleich der Eingabeleistung der beiden Bedienelemente ohne Zusatzaufgaben statt.

Die Hypothese H2 sieht die Berücksichtigung des Belastungskontextes im Cockpit vor und wird daher bei gleichzeitiger Bearbeitung von Zeige- und Zusatzaufgaben überprüft.

Die Hypothese H3 spezifiziert den Handlungskontext der Eingabehandlungen und sieht den Leistungstest der beiden Eingabemittel in einem standardisierten und einem realitätsnahen Kontext vor.

Die Überprüfung der Hypothese H4 bezieht sich auf Belastungsniveaus im Cockpit und sieht eine Variation der Belastungsintensität bei der Bearbeitung der Aufgaben durch eine niedrige und eine hohe Schwierigkeitsstufe der Zusatzaufgaben vor.

Zur Überprüfung der Hypothese H5 wird die Eingabeleistung der beiden Bedienelemente in der Zeigeaufgabe abhängig vom Erfüllungsgrad der Zusatzaufgabe und von der Belastungsstruktur interpretiert. Hierzu ist es notwendig, die Belastung der Versuchspersonen bei der Aufgabenbearbeitung festzuhalten.

Die Überprüfung der Hypothese H6 findet durch eine Erhebung der Nutzerzufriedenheit am Ende der jeweiligen Versuchsdurchläufe statt.

Tab. 4-1: Unabhängige Variable des Versuchsdesigns mit deren Ausprägungen

| Unabhängige Variable | operationalisiert durch die Ausprägungen |
|----------------------|--|
| Eingabeelement       | Touchscreen                              |
|                      | Trackball                                |

Tab. 4-2: Abhängige Variable des Versuchsdesigns mit deren Ausprägungen

| Abhängige Variable  | operationalisiert durch die Ausprägung(en)  |
|---------------------|---|
| Effizienz           | Bedienzeit  |
| Effektivität        | Fehlerhäufigkeit  |
|                     | Auslassungsfehlerrate   |
| Nutzerzufriedenheit | Freiheit von Beeinträchtigungen und positive Einstellungen gegenüber der Nutzung des Produkts |
| Belastungsstruktur  | visuell   |
|                     | auditiv   |
|                     | kognitiv  |
|                     | motorisch   |
|                     | verbal  |

Tab. 4-3: Übersicht der Versuchsparameter und deren Variationsmöglichkeiten

| Versuchsparameter | Variationen               |
|-------------------|---------------------------|
| Zeigeaufgabe      | Single Targets            |
|                   | Multiple & Moving Targets |

| Versuchsparameter               | Variationen   |
|---------------------------------|---|
| Zusatzaufgabe                   | Sternberg Aufgabe<br>Visuelle Suchaufgabe<br>Motorische Aufgabe<br>Komplexe Aufgabe mit Tracking und Readback |
| Schwierigkeit der Zusatzaufgabe | niedrig<br>hoch   |
| Aufmerksamkeitsverteilung       | Fokus auf der Zeigeaufgabe (80:20)<br>Gleichverteilung (50:50)<br>Fokus auf der Zusatzaufgabe (20:80)         |

Kernpunkt der experimentellen Untersuchung ist der Vergleich der beiden Bedienelemente Touchscreen und Trackball. Die statistische Prüfung der Hypothesen erfolgt durch Signifikanztests. Die Hypothesen können daher als Unterschiedshypothesen bezeichnet werden. Mit Hilfe des T-Tests für abhängige Stichproben wird anhand der Teststatistik die Irrtumswahrscheinlichkeit der Nullhypothesen ermittelt (Bortz & Döring, 2006).

Die Datenerhebung erfolgt anhand abhängiger und unabhängiger Variablen (vgl. Tab. 4-1, Tab. 4-2). Die abhängigen Variablen legen nach Bortz & Döring (2006) fest, wie die Wirkung einer Maßnahme erfasst werden soll. Die unabhängigen Variablen legen die Maßnahme selbst fest. Als Maßnahme wird im Folgenden das Bedienelement verstanden. Es kommt in den Ausprägungen Touchscreen und Trackball vor. Die Wirkung der Maßnahme ist darüber hinaus abhängig von der kontrollierten Versuchsumgebung. In diesem Fall wird die Versuchsumgebung durch die Variation des Belastungskontextes festgelegt. Der Belastungskontext setzt sich aus Zeigeaufgabe, Zusatzaufgabe, Schwierigkeit der Zusatzaufgabe und Aufmerksamkeitsverteilung zusammen (vgl. Tab. 4-3).

Die Wirkung der unabhängigen Variablen und der Versuchsvariation wird durch die Usability-Maße Effizienz, Effektivität und Nutzerzufriedenheit abgebildet. Diese werden wiederum von den abhängigen Variablen operationalisiert (vgl.

Tab. 4-2). Sie werden im Laufe der Untersuchung aufgezeichnet und dienen als Datenbasis der Signifikanztests.

## 4.2. Versuchsbeschreibung

### 4.2.1. Zeigeaufgaben

Die Zeigeaufgabe wird durch die beiden Aufgaben Single Targets (ST) und Multiple & Moving Targets (MT) repräsentiert und bildet typische Eingabehandlungen auf dem Hauptinstrumentenbrett ab (vgl. Kap. 3.3.1). Sie werden bei der Versuchsdurchführung mit unterschiedlichen Zusatzaufgaben kombiniert und müssen von der Versuchsperson simultan bearbeitet werden. Die Dauer eines Versuchsdurchlaufs beträgt 90 sec. Es ist davon auszugehen, dass ein Großteil der Piloten rechts-händig ist, da dies kein Selektionsmerkmal von Piloten darstellt. Die Durchführung von Bedien-



handlungen mit der linken Hand stellt daher diesbezüglich den schwierigsten anzunehmenden Fall der Einhandbedienung dar („Worst Case“-Bedingung). Eingaben mit dem Trackball werden analog zu der Einbauposition des vergleichbaren XY-Controllers am Schubhebel mit der linken Hand ausgeführt. Die Versuchsteilnehmer werden daher in allen Versuchen angewiesen, die Eingaben auf dem Touchscreen und dem Trackball mit der linken Hand durchzuführen. Der Trackball wird hierzu entsprechend der Position des Schubhebels im Eurofighter auf der linken Seite des Versuchsteilnehmers positioniert (vgl. Kap. 3.2.2). Die Bedienleistung wird in den Zeigeaufgaben in Abhängigkeit von Bedienelement, Belastungskontext und Position der Anwahlflächen auf dem Display erhoben.

In Kap. 3.2.3 wurde die Erreichbarkeit der Displayfläche bei Touchscreen-Eingaben ermittelt. Demzufolge verfügen unterschiedliche Displaybereiche über eine unterschiedliche Güte der Erreichbarkeit. Bei Eingaben auf dem Touchscreen, bei denen nur eine Hand zur Verfügung steht, ist daher eine Variabilität der Bedienleistung in Abhängigkeit der Zielflächenposition auf dem Display zu erwarten. Die Verteilung von Zielsymbolen in einem Versuchsdurchlauf erfolgt zufällig und wird vor den Versuchsdurchläufen durch Konfigurationsdateien festgelegt. Jedem Versuchsdurchlauf wird eine Konfigurationsdatei zugewiesen. Die Reihenfolge wird zufällig bestimmt und ist für jede Versuchsperson unterschiedlich. Die Anzahl der Konfigurationsdateien für die Zeigeaufgaben entspricht der Anzahl der Kombinationen aus Zeige- und Zusatzaufgaben. Die Variation der Symbolpositionen wurde so gewählt, dass die Auftrittswahrscheinlichkeit eines Symbols für jede Displayposition gleich ist.

Während eines Versuchsdurchlaufs wird die Cursorposition bei der Bedienung mit Trackball und Touchscreen durch ein weißes Kreuz repräsentiert. Die Rückmeldung bei Eingaben erfolgt haptisch und optisch. Die optische Rückmeldung findet für die beiden Bedienelemente in gleicher Weise statt (vgl. Kap. 2.3.5). Befindet sich der Cursor über einer der Aktivierungsflächen der dargestellten Symbole, so erfolgt eine sofortige optische Rückmeldung durch die Darstellung einer gelben Begrenzungslinie um die Aktivierungsfläche. Die Rückmeldung endet, sobald der Cursor wieder aus der Aktivierungsfläche heraus bewegt wird. Bei erfolgreicher Anwahl eines Symbols folgt eine Rückmeldung der Eingabe durch das Ausblenden des Symbols. Die Umrandungslinie der Aktivierungsfläche wird dann ebenfalls nicht mehr angezeigt.

Die haptische Rückmeldung erfolgt abhängig vom verwendeten Bedienelement. Bei der Touchscreenbedienung erhält die Versuchsperson eine haptische Rückmeldung, sobald der Finger bei Eingabehandlungen die Displayfläche berührt. Wird der Finger auf der Displayfläche bewegt, wird der Versuchsperson durch die Fingerbewegung und die gleichzeitige Berührung des Displays die Verschiebung des Cursors vermittelt. Endet die haptische Empfindung der Displayberührung, so wird an der entsprechenden Fingerposition eine Eingabehandlung an das System gemeldet. Die haptische Rückmeldung des Trackballs liefert durch die kinästhetische Wahrnehmung der Drehung der Kugel eine Bewegung des Cursors. Bei Drücken und Loslassen des Eingabeschalters mit dem linken Daumen wird eine Eingabehandlung an den Rechner gesendet. Dabei ist der Zeitpunkt der Übermittlung der Eingabehandlung an das System durch den Druckpunkt des Schalters fühlbar.

Die Aktivierungsflächen sind entsprechend den Empfehlungen von Rühmann (1984) und Eichinger et al. (2008) in allen Versuchen gleich gestaltet. Sie sind quadratisch und haben eine Seitenlänge von 17 mm (vgl. Kap. 2.3.4). Die dargestellten Zielsymbole und Distraktoren sind ebenfalls quadratisch und besitzen eine Kantenlänge von 7 mm. Die Symbolgröße orientiert sich an der

Symboldarstellung auf Multifunktionsdisplays moderner Kampfflugzeuge (Spinoni et al., 1986). Die Gestaltung der Zeigeaufgaben orientiert sich zudem an den Vorgaben zur Gestaltung von Pilotenarbeitsplätzen in STANAG 3705 (1997).

#### 4.2.1.1. Single Targets (ST)

Die Zeigeaufgabe *Single Targets* ist eine standardisierte Zeigeaufgabe zur Erhebung der Bedienleistung und Nutzerzufriedenheit für die Anwahl einfacher Ziele. Die Ziele erscheinen einzeln und statisch auf dem Display in einem zeitlichen Abstand von 6 sec. Die zeitliche Staffelung der Ziel-darstellung legt die gleiche Abfolge der Zeigeaufgabe für alle Versuchspersonen, unabhängig von deren individueller Eingabeleistung und Beanspruchung durch den Belastungskontext, fest. Das Zeitintervall von 6 sec wurde in Vorversuchen festgelegt. Dies geschah mit dem Ziel, das Erreichen von Deckeneffekten der Eingabeleistung und des Erfüllungsgrades in Zeige- und Zusatzaufgabe durch eine zu hohe oder zu niedrige Belastung des Probanden ausschließen zu können und die Belastungsstruktur entsprechend der Belastung im Flugzeugcockpit anzupassen (vgl. Kap. 3.3.2). Die Dauer eines Versuchsdurchlaufs wurde mit 90 sec festgelegt. Es werden daher sequentiell 15 anzuwählende Ziele dargestellt (vgl. Abb. 4-2). Die Verteilung der Ziele erfolgt in jedem der Versuchsdurchläufe zufällig. Durch die Vielzahl von Messwiederholungen wird eine gleichmäßige Verteilung der Ziele über die gesamte Displayfläche erreicht. Die Versuchspersonen werden angewiesen, die dargestellten Ziele möglichst schnell und genau anzuwählen.

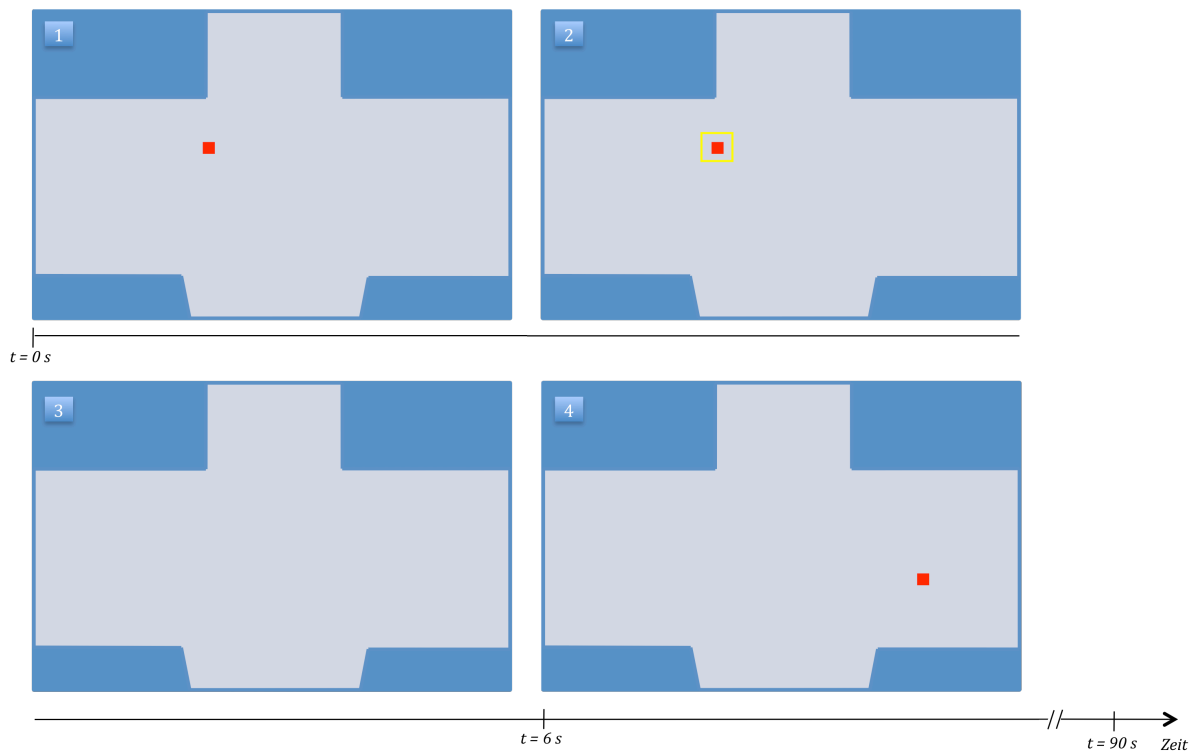


Abb. 4-2: Eingabesequenz der Aufgabe ST. Alle 6 s wird ein Ziel eingeblendet (1 und 4). Wird der Cursor auf dieses Ziel bewegt erhält die Versuchsperson eine visuelle Rückmeldung (2). Erfolgt dann eine Anwahleingabe auf dem Ziel, wird dieses ausgeblendet (3).

Die abhängigen Variablen in diesem Versuch sind Bedienzeit, Fehlerrate und Auslassungsfehlerrate. Sie werden operationalisiert durch die Zeit zwischen Erscheinen und richtiger Anwahl eines

Ziels, die Anzahl der Fehleingaben bei denen kein Ziel angewählt wurde und die Anzahl nicht angewählter Ziele während eines Versuchsdurchlaufs.

#### 4.2.1.2. Multiple & Moving Targets (MT)

Die Zeigeaufgabe *Multiple & Moving Targets* baut auf der Aufgabe *ST* auf und berücksichtigt darüber hinaus die Möglichkeit multipler Anwahlflächen. Dies entspricht typischen Aufgaben des Piloten bei der Interaktion mit den auf den MFD dargestellten Informationen. Im Rahmen dieser Aufgabe wird die Aufgabenstruktur der Anwendungsfälle (vgl. Kap. 3.3.1) für Eingabehandlungen auf dem Hauptinstrumentenbrett durch die Verwendung von Distraktorreizen (blau) und Ziel-elementen (rot) berücksichtigt (vgl. Abb. 4-3). Dem Piloten wird ein konkreter Handlungskontext vermittelt, der ihm eine repräsentative Situation im Cockpit vorgibt. Bei der Bearbeitung dieser Aufgabe werden Bedienleistung und Nutzerzufriedenheit der beiden Bedienelemente erhoben.

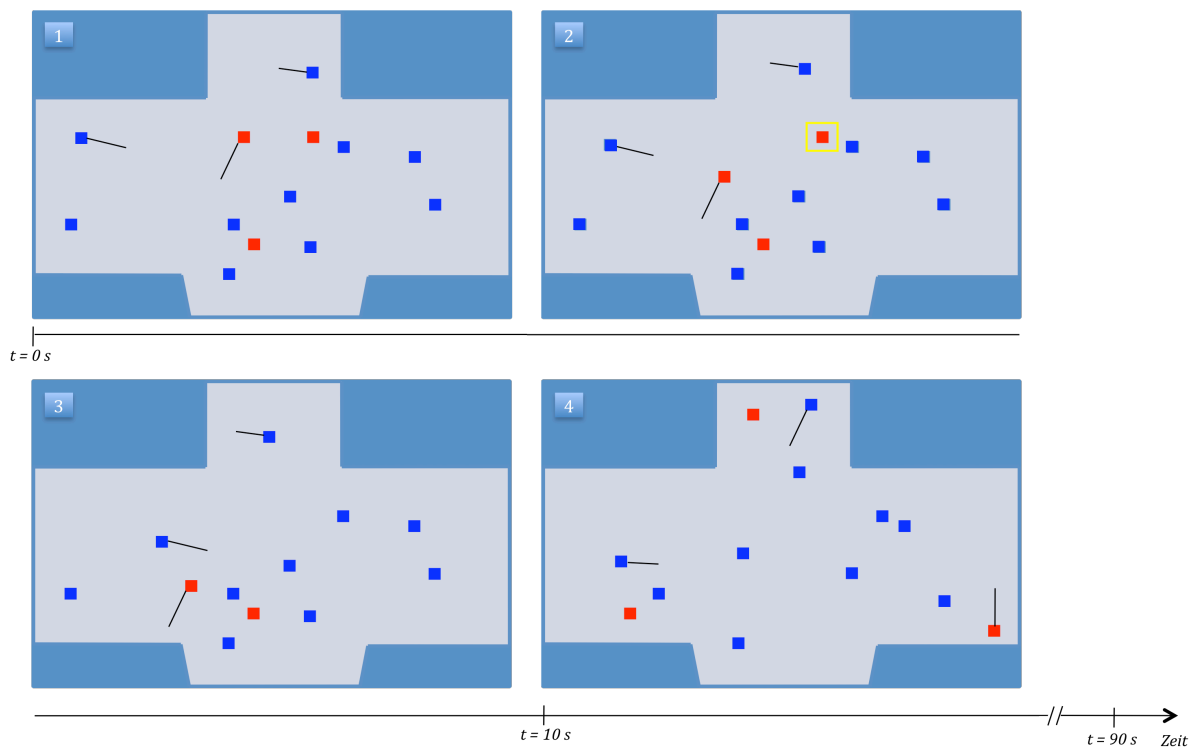


Abb. 4-3: Eingabesequenz der Aufgabe MT. Alle 10 s werden drei Ziele und zehn Distraktoren eingeblendet (1 und 4). Einige dieser Elemente bewegen sich (Bewegung wird in dieser Abbildung durch eine Linie indiziert). Wird der Cursor auf ein Ziel oder einen Distraktor bewegt, erhält die Versuchsperson eine visuelle Rückmeldung (2). Erfolgt dann eine Anwahlung auf dem Ziel oder dem Distraktor, wird es bzw. er ausgeblendet (3).

Während eines Versuchsdurchgangs werden gleichzeitig drei rote Zielsymbole und zehn blaue Distraktoren dargestellt, wovon sich ein Ziel und zwei Distraktoren bewegen (vgl. Abb. 4-3). Die Verteilung der Ziele erfolgt in jedem der Versuchsdurchläufe zufällig. Es wurde jedoch darauf geachtet, dass ein Mindestabstand der Aktivierungsflächen der dargestellten Elemente von 2 mm nicht unterschritten wird (vgl. Kap. 2.3.4). Die Bewegungsgeschwindigkeiten der Zielelemente und Distraktoren entsprechen Relativgeschwindigkeiten zwischen dem eigenen Flugzeug und anderen Flugobjekten zwischen 0,0 und 2,0 Mach und einem Kartenmaßstab von 1:500.000. Ähnlich

der Aufgabe *Single Targets* wird die Konfiguration der Ziele und Distraktoren nach gleichen Zeitabständen geändert. Alle 10 sec werden die dargestellten Elemente aus-, und eine neue Elementkonfiguration eingeblendet. Dies geschieht unabhängig von der Anzahl der angewählten Ziele und Distraktoren. Der Zeitabstand wurde wie für die Zeigeaufgabe *Single Targets* in Vorversuchen ermittelt. Der Versuchsteilnehmer erhält die Aufgabe alle roten Ziele möglichst schnell und genau anzuwählen. Die Anwahl eines Distraktors wird als Eingabefehler bei der Fehlerrate gewertet.

Die abhängigen Variablen in diesem Versuch sind Bedienzeit, Fehlerrate und Auslassungsfehlerrate. Sie werden operationalisiert durch die Zeit zwischen Erscheinen und richtiger Anwahl eines Ziels, die Anzahl der Fehleingaben bei denen kein Ziel angewählt wurde und die Anzahl nicht angewählter Ziele während eines Versuchsdurchlaufs.

#### 4.2.2. Zusatzaufgaben

Es muss davon ausgegangen werden, dass das gleichzeitige Auftreten von Zusatzbelastung im Cockpit die Bedienleistung des Piloten bei Zeigeaufgaben auf dem Großflächendisplay beeinträchtigt. Die standardisierten und realistischen Zusatzaufgaben wurden so gewählt, dass sie die im Informationsverarbeitungsprozess inhärenten Belastungsdimensionen visuell, auditiv, kognitiv, verbal und motorisch entsprechend der Belastungsstruktur im Cockpit abbilden (vgl. Kap. 2.4.2 & 3.3.2). Diese Aufteilung hat das Ziel, eine differenzierte Klassifizierung und Quantifizierung der Beeinträchtigung der Bedienleistung, abhängig von der Art der Belastungsdimension, zu ermöglichen und im Rahmen der Evaluation zu erfassen. Die Zusatzaufgaben wurden simultan mit den Zeigeaufgaben bearbeitet und hatten daher dieselbe Versuchsdauer.

##### 4.2.2.1. Kognitive Aufgabe

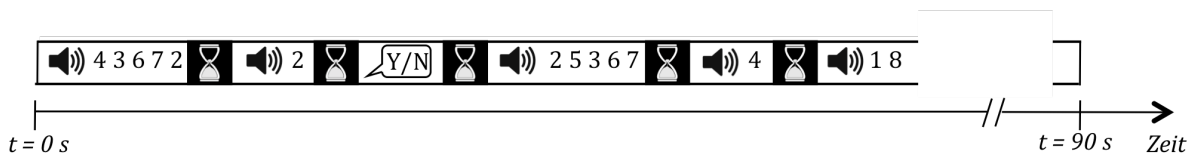
Zur Abbildung kognitiver Belastung auf die Versuchspersonen wird die *Sternberg Aufgabe* verwendet. Sie ist eine klassische Methode zur experimentellen Untersuchung kognitiver Belastung und verwendet das Paradigma der Suche im Kurzzeitgedächtnis (Sternberg, 1966; Sternberg, 2004). Sie wird für Untersuchungen im Bereich der Luftfahrt häufig als kognitive Zusatzaufgabe eingesetzt (Wickens et al., 1986; Tsang, 2007). Dem Probanden werden in gleichen zeitlichen Abständen eine Reihe unterschiedlicher einstelliger Zahlen vorgelesen. Nach einem akustischen Signal wird eine weitere Zahl vorgelesen. Die Aufgabe des Probanden ist es zu entscheiden, ob sich diese Zahl in der Menge der zuvor vorgelesenen Zahlen befand. Der Proband wird angewiesen, dies dem Versuchsleiter verbal durch ein „ja/nein“-Urteil möglichst schnell und richtig mitzuteilen. Die Aufgabe beginnt daraufhin von neuem (vgl. Abb. 4-4). Die Schwierigkeit der Aufgabe kann durch die Menge der Elemente, die zu merken sind, manipuliert werden.

Tab. 4-4: Festlegung der Versuchsparameter der Zusatzaufgabe *Sternberg Aufgabe* in Vorversuchen.

| Parameter                                      | Werte    |
|--|----------|
| Vorlesegeschwindigkeit                         | 1 Zahl/s |
| Zeit zwischen zwei Sequenzen (Ende bis Anfang) | 3 s      |
| Wartezeit zwischen Vorlesen und Antwort        | 3 s      |
| Antwortzeitraum                                | 5 s      |

In Vorversuchen wurden diese Angaben hinsichtlich der kognitiven Ausprägung der Belastungsstruktur im Cockpit überprüft. Für eine leichte bis mittlere Schwierigkeit der *Sternberg Aufgabe* wurden daraufhin fünf Zahlen und für eine schwere bis sehr schwere Aufgabe acht Zahlen festgelegt. Die weiteren Versuchsparameter sind in Tab. 4-4 zusammengefasst. Die abhängigen Variablen in diesem Versuch sind Bedienzeit und Fehlerrate. Die Variable Bedienzeit wird operationalisiert durch das Zeitintervall zwischen der akustischen Aufforderung zur verbalen Wiedergabe des Ergebnisses und der erfolgten verbalen Eingabe. Die Bedienzeit wird jeweils als arithmetischer Mittelwert aller Eingaben eines Versuchsdurchgangs angegeben. Die Fehlerrate wird durch die Anzahl der falschen Antworten pro Versuchsdurchgang erfasst.

Schwierigkeitsstufe niedrig:  
5 Ziffern



Schwierigkeitsstufe hoch:  
8 Ziffern

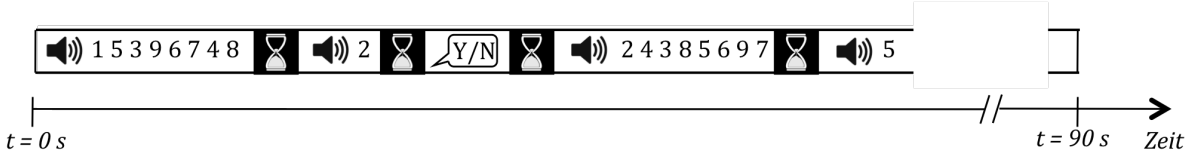


Abb. 4-4: Sternberg Aufgabe in den beiden Schwierigkeitsstufen niedrig und hoch. Jeder Sequenz mit jeweils fünf bzw. 8 Ziffern, die vorgelesen werden folgt eine Kontrollzahl. Der Versuchsteilnehmer muss dann entscheiden, ob sich die Kontrollzahl in der vorgelesenen Sequenz befindet. Dies wird so lange wiederholt, bis die 90 s eines Versuchsdurchgangs abgelaufen sind.

#### 4.2.2.2. Visuelle Suchaufgabe

Die sog. *Visuelle Suchaufgabe* ist eine klassische Methode zur Erzeugung visueller Belastung (Treisman & Gelade, 1980; Wilschut et al., 2008; VanRullen et al., 2004). Die Aufgabe des Probanden besteht darin, aus einer visuell dargebotenen Menge von gleichartigen Distraktor-Reizen einen Zielreiz zu identifizieren, der sich von den Distraktoren hinsichtlich Größe, Form oder Farbe unterscheidet.

Die Darstellung der *Visuellen Suchaufgabe* findet auf einem auf Augenhöhe der Probanden direkt oberhalb des Großflächendisplay positionierten Display statt. Diese Position entspricht der Position des HUD im Flugzeug (vgl. Abb. 4-10). Die Versuchspersonen werden angewiesen, den dargebotenen Zielreiz zu identifizieren und mit Hilfe der links/rechts Pfeiltasten einer Tastatur anzugeben, ob sich der Zielreiz in der rechten oder linken Displayhälfte befindet. Diese Eingabeform wird zur Minimierung der aus dieser Eingabe resultierenden motorischen Belastung gewählt. Die Tastatur wird mit der rechten Hand bedient. Die Position von Ziel- und Distraktorreizen auf der Anzeigefläche erfolgt zufällig. Der Proband kann die Bearbeitungsgeschwindigkeit selbst bestimmen. Wählt er eine der beiden Seiten aus, kann er in einem Zeitintervall von 2 s diese Eingabe durch erneutes Drücken der Tasten beliebig oft ändern. Die Eingabe wird erst dann vom System

akzeptiert, wenn 2 s lang keine Eingabe des Probanden mehr erfolgt. Dann erst wird eine neue Ziel- und Distraktorkonfiguration eingeblendet (vgl. Abb. 4-5).

Die Schwierigkeit der *Visuellen Suchaufgabe* kann durch die Anzahl der Distraktoren sowie durch die Ähnlichkeit von Ziel und Distraktor hinsichtlich Größe und Farbe bestimmt werden. Die für diese Untersuchung zur Verfügung stehende Software variiert die Aufgabenschwierigkeit ausschließlich durch die Größe der Distraktoren (Daimler Chrysler AG, 2005). Die Größe des Zielreizes, die Farbe und die runde Form des Ziels und der 50 Distraktoren bleiben unverändert. In Vorversuchen wurden die Ausprägungen der Parameter dieser Aufgabe untersucht und auf die Anforderungen zur Verwendung als Zusatzaufgabe angepasst. Die Form der Ziel- und Distraktorreize ist rund. Der Außendurchmesser der Distraktoren beträgt in der Schwierigkeitsstufe niedrig 12 mm und in der Schwierigkeitsstufe hoch 14 mm. Die Ziele haben einen Außendurchmesser von 21 mm (niedrige Schwierigkeitsstufe) und 15 mm (hohe Schwierigkeitsstufe). Die Strichstärke von Zielen und Distraktoren beträgt 2 mm (niedrige Schwierigkeitsstufe) und 1 mm (hohe Schwierigkeitsstufe).

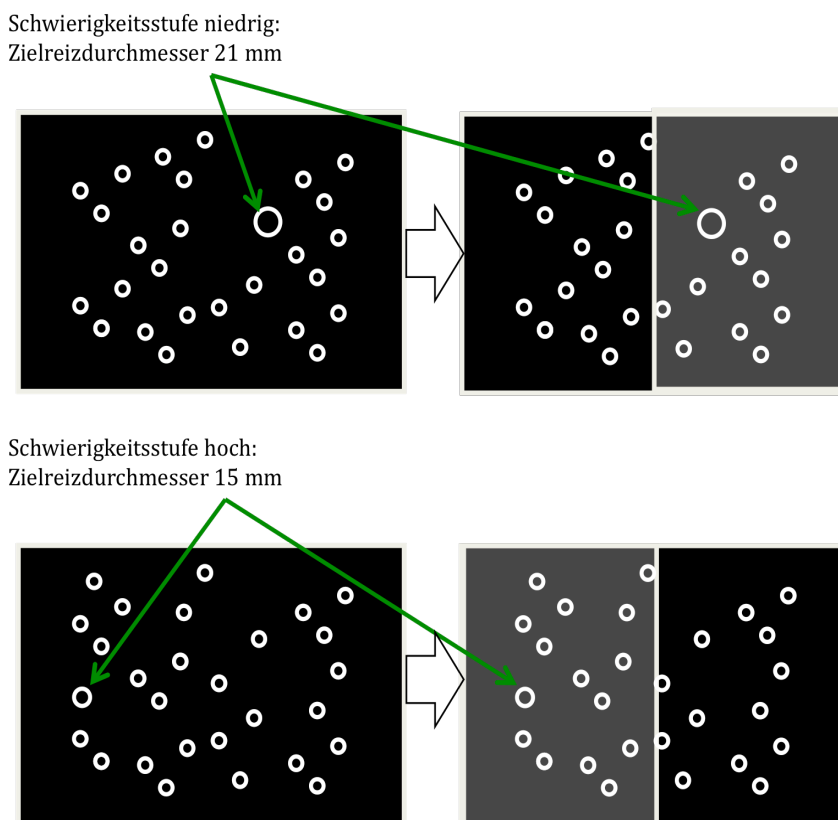


Abb. 4-5: *Visuelle Suchaufgabe. Es wird eine Schar von gleich großen Distraktoren und ein etwas größerer Zielreiz (indiziert durch grünen Pfeil) dargestellt. Die Versuchspersonen wählen nach dem Auffinden des Ziels die Seite aus, in der sich der Zielreiz befindet und erhält eine visuelle Rückmeldung der angewählten Seite (jeweils rechtes Bild).*

Die abhängigen Variablen in diesem Versuch sind Eingabezeit und Fehlerrate. Die Eingabezeit wird durch die Zeit zwischen Erscheinen einer Kreiskonfiguration und der Auswahl der richtigen

Seite, die Fehlerrate durch die Anzahl der Fehleingaben bei denen die falsche Seite ausgewählt wurde und die Anzahl der Durchgänge während eines Versuchsdurchlaufs operationalisiert.

#### 4.2.2.3. Motorische Aufgabe

Die motorische Belastung wird durch eine Steckaufgabe abgebildet (Kuhn, 2005). Bei der *Motorischen Aufgabe* muss ein Holzgriffel in einer bestimmten Reihenfolge in Bohrungen eines Matrizenbretts positioniert werden. Die Probanden werden angewiesen, diese Aufgabe ohne visuelle Unterstützung durchzuführen. Dadurch soll sichergestellt werden, dass durch diese Aufgabe keine visuelle Belastung auf die Versuchsperson wirkt. Die Ausführung dieser Aufgabe findet mit der rechten Hand statt und ist ohne Einnehmen einer Zwangshaltung bedienbar (vgl. Abb. 4-6).

Die Schwierigkeit kann durch den Durchmesser von Griffel und Bohrung, der Form des Griffels und durch die Reihenfolge sowie die Position der Bohrungen vorgegeben werden. Die Anpassung wurde anhand dieser Parameter in Vorversuchen durchgeführt. In der Schwierigkeitsstufe niedrig beträgt der Bohrungsdurchmesser 25 mm, der Griffeldurchmesser 24 mm und der Radius der Griffelkante 7 mm. In der hohen Schwierigkeitsstufe ist der Durchmesser der Bohrung 8 mm breit, der Griffeldurchmesser beträgt 7 mm und der Radius der Griffelkante 0,5 mm.

Die abhängigen Variablen in diesem Versuch sind Eingabegeschwindigkeit und Fehlerrate. Sie werden operationalisiert durch die Anzahl der Eingaben pro Versuchsdurchlauf und die Anzahl der Fehleingaben bei denen der Griffel nicht in der richtigen Reihenfolge in die Bohrungen gesteckt wurde.

Schwierigkeitsstufe niedrig:



Schwierigkeitsstufe hoch:

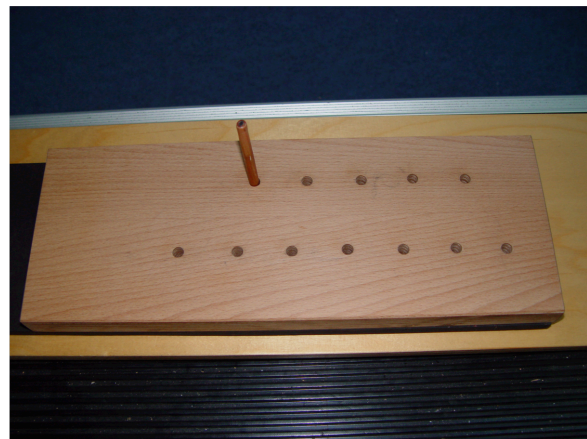


Abb. 4-6: *Motorische Aufgabe. Aufgabe der Versuchspersonen ist es, den Griffel im Uhrzeigersinn ohne visuelle Unterstützung nacheinander in die Bohrungen im Matrizenbrett zu positionieren. Die Schwierigkeit der Aufgabe wird durch Größe von Bohrung und Griffel und dem Radius der Griffelober- bzw. -unterkante beeinflusst.*

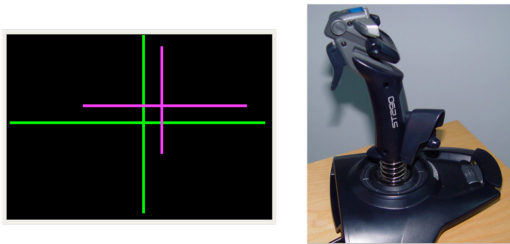
#### 4.2.2.4. Komplexe Zusatzaufgabe

Die Belastungsstruktur im Cockpit während des Fluges ist für alle betrachteten Anwendungsfälle annähernd identisch (vgl. Kap. 3.3.2). Sie zeichnet sich besonders durch hohe visuelle, kognitive und motorische Anteile aus. Auditive und verbale Belastung tritt in geringerem Maße und, wie



auch visuelle und motorische Belastung, stets gepaart auf (vgl. Kap. 3.3.2). Diese gepaarten Belastungsarten werden in der realistischen Zusatzaufgabe durch die Aufgaben *Tracking* und *Readback*, die gleichzeitig bearbeitet werden müssen, abgebildet. Dabei handelt es sich um repräsentative Aufgaben, die vom Piloten während des Fluges erfüllt werden müssen. Die *Tracking-Aufgabe* simuliert die Steuerung des Flugzeugs mit dem Steuerknüppel. Die *Readback-Aufgabe* stellt die Kommunikation des Piloten mit anderen Teilnehmern des taktischen Szenarios dar. Auch hier werden zwischen den Beteiligten Informationen ausgetauscht, die oftmals aus Zahlenreihen bestehen, wie etwa Kursangaben oder Funkfeuer- und Kommunikationsfrequenzen. Die komplexe Zusatzaufgabe wird in den Schwierigkeitsstufen *leicht* und *schwer* verwendet. Hierzu werden die beiden Teilaufgaben jeweils in einer leichten und einer schweren Schwierigkeitsstufe miteinander kombiniert. Die Probanden werden angewiesen, während der Versuchsdurchläufe die beiden Teilaufgaben *Tracking* und *Readback* der komplexen Zusatzaufgabe gleichzeitig und mit gleicher Priorität zu bearbeiten.

### Tracking

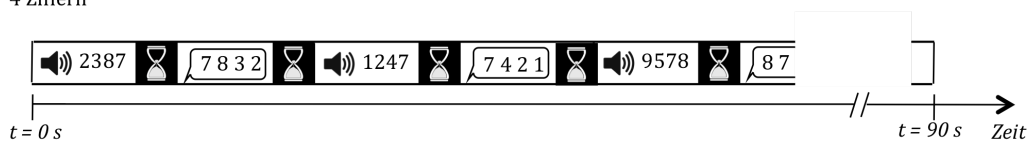


Schwierigkeitsstufe niedrig:  
mittlere Auswanderungsgeschwindigkeit Ist-Kreuz: ca. 0,5 mm/s

Schwierigkeitsstufe hoch:  
mittlere Auswanderungsgeschwindigkeit Ist-Kreuz: ca. 1,5 mm/s

### Readback

Schwierigkeitsstufe niedrig:  
4 Ziffern



Schwierigkeitsstufe hoch:  
6 Ziffern

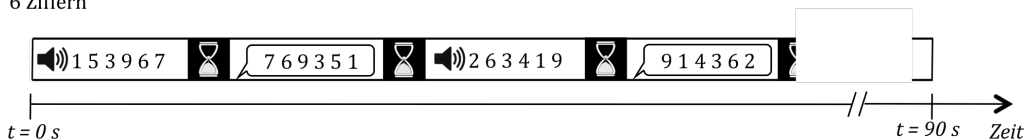


Abb. 4-7: *Tracking und Readback Aufgabe. Die Schwierigkeit der Tracking-Aufgabe wird durch die mittlere Auswanderungsgeschwindigkeit des Ist-Fadenkreuzes aus der Displaymitte beschrieben. Die Schwierigkeit der Readback-Aufgabe wird durch die Anzahl der Ziffern der Zahlenreihe bestimmt. Die beiden Aufgaben werden simultan bearbeitet.*

### Tracking

Die Aufgabe *Tracking* kombiniert kontinuierliche visuelle und motorische Belastung (Wickens & Hollands, 2000) und ist als Kompensationsaufgabe gestaltet. Auf dem oberen Display (vgl. Abb. 4-10) werden zwei verschieden farbige Kreuze dargestellt, ein Ist- und ein Soll-Kreuz. Der Mittel-