

SIMULATORSTUDIE ZUR ERMITTLUNG MENTALER HANDLUNGSMODELLE VON PILOTEN BEIM ENERGIEMANAGEMENT

S. Müller*, K. Schreiter+, D. Manzey*

***Technische Universität Berlin (TUB)**

Institut für Psychologie und Arbeitswissenschaft
Arbeits-, Ingenieur- und Organisationspsychologie

+Technische Universität Berlin (TUB)

Institut für Luft- und Raumfahrt
Flugmechanik, Flugregelung und Aeroelastizität

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes „nxControl“ wurde eine Simulatorstudie mit zwölf lizenzierten Verkehrspiloten zur Ermittlung mentaler Handlungsmodelle beim Energieabbau durchgeführt. Die Aufgabe der Piloten war es, drei Sink- und drei Landeanflüge mit variierten Randbedingungen zu absolvieren. Anhand der Versuchsergebnisse sollen Empfehlungen für die pilotenzentrierte Entwicklung eines Assistenzsystems zur Unterstützung der manuellen Steuerung von Flugzeugen in Längsrichtung abgeleitet werden. Die Ergebnisse der Versuche machten es möglich Handlungsstrategien der Piloten für konkrete Handlungsschritte aufzuzeigen. Die Folgerung eines allgemeingültigen Handlungsmodells war auf Grund der differierenden Strategien nicht möglich. Dennoch konnten mit Hilfe der Handlungsstrategien spezifische Fragestellungen beantwortet werden, die für die Entwicklung des Assistenzsystems wertvolle Informationen beinhalteten.

NOMENKLATUR

F	Flaps (Landeklappen)
FL	Flight Level (Flughöhe)
GS	Glide Slope (Gleitpfad)
GS*	Glide Slope Intercept (Schnittpunkt mit Gleitpfad)
H	Flughöhe
IAS	Indicated Airspeed (Fluggeschwindigkeit)
ILS	Instrument Landing System (Instrumentenlandesystem)
M	Mittelwert
n	Versuchspersonenanzahl
N1	Fan-Drehzahl
PAX	Passagiere
SD	Standardabweichung
SEPHIR	Simulator for Educational Projects and Highly Innovative Research
ToD	Top of Descent (Anfangspunkt des Sinkfluges)
TW	Triebwerk
V	Geschwindigkeit
VGND	Geschwindigkeit über Grund
V/S	Vertikalgeschwindigkeit
WP	Wegpunkt

1. EINLEITUNG

Im Forschungsprojekt „nxControl“ wird ein Pilotenassistenzsystem zur Unterstützung der manuellen Steuerung von Flugzeugen in Längsrichtung entwickelt. Das System besteht aus einem Vorgaberegler für die Längsbeschleunigung und einer Mensch-Maschine-Schnittstelle. Der Regler soll die Stellgrößen Triebwerksschub, Bremsklappen und

Hochauftriebshilfen ansteuern, welche die Kräfte in Längsrichtung beeinflussen [1]. Der Bedienhebel und die primäre Fluganzeige der Benutzerschnittstelle sollen als Teil des Assistenzsystems an das neue Bedienkonzept angepasst werden (für eine ausführliche Projektbeschreibung siehe [2]). Ziel des Projekts ist es, zukünftige komplexe Flugbahnen auch manuell erfliegen zu können, ohne die Arbeitsbelastung der Piloten zu erhöhen. Als Beispiel für erwartete komplexe Flugbahnen sind gekrümmte Trajektorien bei Start und Landung zur Vermeidung von Fluglärm über bewohnten Gebieten zu nennen. Auch die 4D-Navigation, in der Wegpunkte zu vorgegebenen Zeiten exakt überflogen werden müssen, stellt eine der zukünftig zu erwartenden Flugbahnen dar.

Um die Akzeptanz der Piloten hinsichtlich der zusätzlichen Automatisierung im Cockpit sicherzustellen, ist es unumgänglich das Assistenzsystem von vornherein pilotenzentriert zu entwickeln. Dazu soll es in seiner Funktionsweise möglichst nachvollziehbar und transparent sein, damit die Piloten jederzeit ein angemessenes Situationsbewusstsein bezüglich dieser Funktion aufrechterhalten können [3]. Dies kann erreicht werden, wenn sich die Reglerfunktion so verhält, wie es die Piloten auf Basis ihrer eigenen mentalen Handlungsmodelle erwarten würden. Unter mentalen Handlungsmodellen verstehen wir das von Piloten im Training bzw. im Laufe der Berufserfahrung erworbene Handlungswissen, aus dem die erforderlichen Handlungsschritte in spezifischen Situationen abgeleitet werden.

Zur Untersuchung der Handlungsmodelle wurden Simulatorversuche durchgeführt, in denen lizenzierte Verkehrspiloten vorgegebene Flugaufgaben zu absolvieren hatten. Da

bezüglich mentaler Handlungsmodelle für die zu betrachtenden Flugphasen wenig Vergleichsliteratur existiert, wurde für die Methodik der Untersuchung ein explorativer Ansatz gewählt. Allgemeines Ziel der Versuche war es einen Einblick in Verhaltens- und Denkweisen von Piloten hinsichtlich der ausgewählten Flugphasen zu erhalten. Das detaillierte Wissen über die Aufgaben und Tätigkeiten der Zielgruppe ist Grundlage für eine erfolgreiche nutzerzentrierte Entwicklung [4].

Das Assistenzsystem soll zukünftig in allen Flugphasen, in denen der Pilot die manuelle Steuerung des Flugzeuges übernimmt, Unterstützung leisten. Die Flugphasen, in denen Energieabbau durchgeführt wird (Sinkflug, Landeanflug) stehen für diese Versuche im Fokus. Hier sind die Einsatzmöglichkeiten der Stellgrößen des zu entwickelnden Reglers am vielfältigsten.

Die in diesem Beitrag beschriebenen Simulatorstudien sind Teil einer größeren Versuchsreihe. Im Folgenden werden die für die Fragestellungen nach den mentalen Handlungsmodellen entscheidenden Teilausschnitte im Detail beschrieben. Die hier präsentierten Ergebnisse sind zur besseren Übersicht in zwei Teilstudien gegliedert. In Teilstudie 1 war es Aufgabe der Piloten mehrere Sinkflüge durchzuführen. Anschließend sollten sie in Teilstudie 2 Landeanflüge absolvieren. Ein weiterer Versuch hat sich mit der Energierepräsentation im Endanflug beschäftigt, wird jedoch hier nicht näher erläutert (Details siehe [5]).

Eine übergeordnete Fragestellung für den Gesamtversuch bezieht sich darauf, wie konsistent die Handlungsmodelle von Piloten beim Abbau von Energie sind. Dazu wurden für Teilstudie 1 Versuchsszenarien entworfen, die Sinkflüge mit gleichzeitiger Geschwindigkeitsreduktion beinhalten. In dieser Teilstudie lag der Fokus auf dem Vergleich der Handlungsstrategien in einer Flugsituation ohne festgelegte Prozedur. Dazu wurde jeweils als Aufgabenstellung Start- und Endzustand vorgegeben. Die zu absolvierenden Handlungsschritte konnten frei gewählt werden. Im Sinkflug wurden insbesondere die Wahl des Anfangspunktes des Sinkflugs (engl. *top of descent*, ToD) und die dafür getätigte Schubwahl betrachtet.

In Teilstudie 2 galt es mittels Szenarien zu Anflug und Landung die Konsistenz der Handlungsmodelle in einem prozeduralisierten Verfahren zu untersuchen. Wieder wurden Start- und Endzustand vorgegeben, wobei die Handlungsschritte zur Lösung der Flugaufgabe entsprechend der operationellen Vorgehensweise gewählt werden sollten. Die Prozedur wurde in den Versuchen nicht explizit vorgegeben. Die Piloten sollten die ihnen aus Training und Flughandbüchern (z.B. *Flight Crew Operating Manual*) bekannten Vorgehensweisen anwenden. In dieser Teilstudie wurden der Moment des ersten Verzögerns und die Konfigurationszeitpunkte als Handlungsschritte untersucht. Ergänzend wurden die Landeanflüge durch unangekündigte Störungen (Wind, Flugsicherungskommandos) variiert. Damit sollte die Anpassung der Handlungsschritte auf Störungen geprüft werden. In beiden Teilstudien wurde über Kurzinterviews auf Basis eines festgelegten Fragebogens jeweils erfasst, woran sich die Piloten bei der Wahl ihrer Handlungsstrategie orientieren.

Eine zweite Fragestellung war, welche Informationen innerhalb der Anzeigen in den verschiedenen Flugsituationen wertvoll bzw. unverzichtbar sind. Dazu sollten die Piloten in beiden Teilstudien nach der Durchführung der gestellten Flugaufgaben angeben, welche angezeigten Informationen

sie als Entscheidungsgrundlage verwertet haben.

Die Ergebnisse der beiden Fragestellungen dienen der Entwicklung des Assistenzsystems. Die Handlungen bezüglich des Einsatzes der Stellgrößen werden für die Auslegung des Vorgaberegler herangezogen, während die Befragungen zu genutzten Informationen für die Entwicklung der Mensch-Maschine-Schnittstelle verwendet werden. So soll erreicht werden, dass das Assistenzsystem die Piloten optimal unterstützen kann und der manuelle Flug auf komplexen Flugbahnen möglich wird.

2. TEILSTUDIE 1: SINKFLÜGE

2.1. Stichprobe

An den Versuchen nahmen zwölf Verkehrspiloten teil (11 männlich, 1 weiblich). Durchschnittlich gaben sie rund 10000 Stunden (SD \approx 8000) Flugerfahrung an. Die Altersspanne der Piloten lag zwischen 27 und 67 Jahren (M = 43, SD = 12,5). Sechs der zwölf Teilnehmer waren als Kapitäne angestellt, wobei einer der Kapitäne seit zwei Jahren im Ruhestand war. Die Piloten besaßen Typenzulassungen für A320, A330 und/oder A340. Sieben Piloten gaben an, aktuell für Kurzstreckenflüge eingeteilt zu sein. Fünf der zwölf Piloten besaßen einen Ingenieurshintergrund.

2.2. Versuchsumgebung

Die Versuche wurden im Forschungssimulator SEPHIR (*Simulator for Educational Projects and Highly Innovative Research*) des Fachgebiets für Flugmechanik, Flugregelung und Aeroelastizität an der Technischen Universität Berlin durchgeführt. Das simulierte Flugzeug ist eine VFW614-ATD, welche über ein Flugsteuerungssystem ähnlich, dem eines modernen Verkehrsflugzeugs verfügt. Der Flugsimulator ist als modular aufgebauter Festsitz-Simulator konstruiert. Er besitzt ein hochwertiges Sichtsystem, das die Außensicht realitätsnah darstellt. Alle zum Fliegen wichtigen Bedienelemente sind als originale Flugzeugteile in das SEPHIR-Cockpit integriert, wie beispielsweise Sidesticks, Seitenruderpedale, Schub-, Klappen- und Fahrwerkshebel. Die Instrumentierung (*primary flight displays, navigation displays, electronic centralized aircraft monitoring*) wird auf kommerziellen Displays dargestellt. Obwohl geringe Unterschiede, insbesondere in Bezug auf höhere aerodynamische Widerstände der VFW614-ATD, vorhanden sind, ist der Simulator hinsichtlich Flugeigenschaften und Bedienung einem Airbus A320 sehr ähnlich.

Im Simulatorcockpit wurden zur Kontrolle des Versuchsablaufes und zur experimentellen Datenerhebung Bild und Ton mit einer Videokamera aufgezeichnet. Dazu wurde die Kamera auf einem Stativ hinter dem Versuchsteilnehmer so aufgestellt, dass die Anzeigen und die Bedienungsabläufe des Piloten zu erkennen waren.

2.3. Aufgaben

Die Sinkflugszenarien sollten dazu dienen, beobachten zu können, welche Strategien Piloten beim Abbau von Energie verfolgen. Des Weiteren sollte anhand der Wahl des ToD untersucht werden, wie einheitlich das Verhalten bei Flugaufgaben ohne festgelegte Prozedur ausfällt. Zudem war der Einsatz der Bremsklappen bei steilen Sinkflügen von Interesse.

Das zu diesem Zweck ausgewählte Szenario bestand aus einem Zielwegpunkt und einem Startwegpunkt, der sich 20 NM davor befand. Die Versuchsteilnehmer hatten die Aufgabe ihre Flughöhe aus der Flugfläche (engl. *flight level*,

FL) FL150 auf FL100 spätestens bis Erreichen des zweiten Wegpunkts zu reduzieren. Gleichzeitig sollte auch eine Geschwindigkeitsreduktion von 230 kn auf 200 kn erfolgen. Dabei war den Piloten gänzlich frei überlassen wie und wann sie Geschwindigkeit sowie Höhe anpassen. Die Wegpunkte wurden in der Navigationsanzeige dargestellt und der Abstand zum nächsten Wegpunkt in nautischen Meilen und Minuten angezeigt.

Diese Flugaufgabe wurde für jede Versuchsperson zweimal wiederholt. Die Wiederholung diente dazu, beobachten zu können, ob die Versuchspersonen im zweiten Durchgang denselben ToD wählten oder ob sie den ToD infolge ihrer Erfahrungen anpassen.

Für die dritte Wiederholung wurde der Startwegpunkt 15 NM vor den Zielwegpunkt gelegt und ein weiterer Wegpunkt bei 10 NM vor dem Zielwegpunkt eingefügt. Hier bekamen die Versuchsteilnehmer die Aufgabe bis zum zusätzlichen Wegpunkt die Geschwindigkeit und Höhe zu halten. Erst nach Passieren des Wegpunkts 10 NM vor dem Zielwegpunkt war die Höhen- und Geschwindigkeitsänderung auf die oben genannten Zielwerte freigegeben. Diese Anpassung der Randbedingung sollte die Piloten in eine Lage versetzen, in der sie den großen Energieüberschuss des Flugzeugs nur durch Zuhilfenahme von Bremsklappen abbauen konnten.

2.4. Erhobene Daten

Zur Ermittlung der Indikatoren gewählter Handlungsstrategien wurden während der Durchführung der Flugaufgaben folgende objektive Leistungsdaten erfasst. Es wurde angenommen, dass der Anfangspunkt des Sinkfluges, sowie die dazu gewählte Schubhebelstellung deutliche Rückschlüsse auf die vorherrschenden Handlungsmodelle liefern können. Für den Bremsklappeneinsatz sollten ebenfalls Handlungsstrategien untersucht werden. Daher wurden die Bremsklappenstellungen über Verlauf des Sinkfluges aufgezeichnet.

Um Hinweise zu erhalten, woran sich Piloten bei der Ausführung ihrer Handlungsschritte orientieren, wurden die subjektiven Begründungen aus den Nachbefragungen festgehalten. Entfernt wurden bei der Aufbereitung der Antworten für die Ergebnisdarstellungen alle Beschreibungen, die sich auf die veränderten Bedingungen der Versuchsumgebung zurückführen ließen.

2.5. Durchführungsdetails

Vor der Durchführung der Versuche bekamen die Teilnehmer ein Briefing, in dem die Versuchsaufgaben und der Simulator vorgestellt wurden. In einem Probedurchlauf, vor der eigentlichen Durchführung des Versuchs mit Messaufzeichnung, konnten die Versuchsteilnehmer sich an die Eigenschaften des Simulators und des simulierten Flugzeuges gewöhnen. Dazu wurde ein ILS-Anflug mit Landung auf den Flughafen Frankfurt durchgeführt.

Daraufhin begann die Versuchsdurchführung zur Erhebung der Versuchsdaten. Es folgten die drei in Abschnitt 2.3. beschriebenen Sinkflugaufgaben. Im Anschluss an die Sinkflugscenarien folgten die Szenarien zu Anflug und Landung (siehe Abschnitt 3.2). Nach jedem Szenario wurde die Simulation angehalten und auf den Startwegpunkt des darauffolgenden Szenarios zurückgesetzt.

Bei der Durchführung aller Flugaufgaben übernahm der Versuchsleiter die Position des *pilot not flying* in dem er die

Kommandos der Versuchsperson ausführte. Der Versuchsleiter wiederholte vor jeder Flugaufgabe die zugehörige Aufgabenstellung. Bedeutsame Ereignisse und Handlungen während der Versuchsdurchführung wurden durch den Versuchsleiter protokolliert. Im Anschluss an jedes Szenario wurden in Form eines kurzen Interviews vorher festgelegte Fragen zu Abläufen und Hintergründen beantwortet. Der Versuchsleiter protokollierte die Antworten mithilfe einer vorbereiteten Interviewmatrix. Darüber hinaus wurden die Flugzeug- und Bewegungsdaten aufgezeichnet und abgespeichert.

Anschließend folgte die Versuchsdurchführung zur Untersuchung der mentalen Repräsentation des Energiemanagements, der in [5] detailliert beschrieben ist. Zusammengefasst handelt es sich dabei um acht kurze Szenarien, in denen die Piloten künstlich generierte Höhen- und Geschwindigkeitsablagen im Landeanflug auf dem Gleitpfad korrigieren sollten. Im Anschluss an die Simulatorversuche wurde ein Debriefing-Fragebogen bearbeitet. Dieser war in Interviewform durch die Versuchsteilnehmer zu beantworten. Er war Teil des Versuchs zur mentalen Repräsentation des Energiemanagements und fragte zudem demographische Daten der Versuchsteilnehmer ab.

2.6. Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der durchgeführten Simulatorversuche zu den Sinkflugscenarien aufgeführt. Die Ergebnisse stellen sich sowohl aus den Simulatordatenaufzeichnungen, als auch aus den Kurzbefragungen zusammen. Für eine Versuchsperson fehlten aufgrund defekter Datenaufzeichnung die Messdaten zum dritten Sinkflugscenario.

Die Ergebnisse sind in vier Abschnitte unterteilt. Der erste Abschnitt zeigt die Wahl des ToD. Darauffolgend werden die Ergebnisse zur Schubhebel- und Bremsklappennutzung beschrieben. Die Resultate der Befragungen zu den verwendeten Anzeigen und Informationen schließen die Ergebnisdarstellung des ersten Teilversuchs ab.

2.6.1. Einleitung des Sinkflugs

Um das Verhalten der Piloten bei Sinkflügen analysieren zu können, wurden die Simulatordaten hinsichtlich der Einleitung des Sinkens ausgewertet.

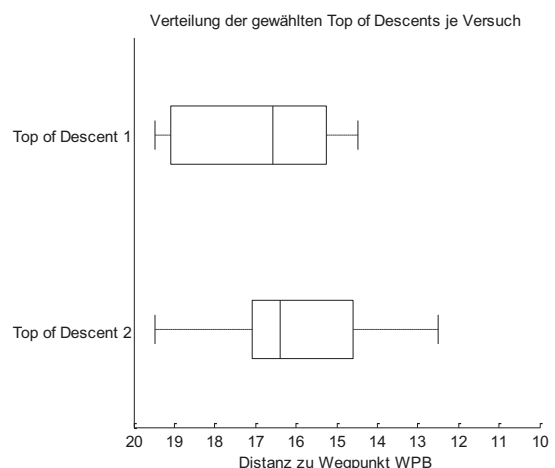


BILD 1. Boxplotdiagramm für Landeszenario 1 und 2 der gewählten ToD aller Versuchspersonen über die Distanz zum Zielwegpunkt.

In BILD 1 werden die Werte der ToD aller Versuchspersonen über die Distanz zum Zielwegpunkt dargestellt. Die Werte sind in Form von Boxplots für jeweils das erste und zweite Sinkscenario mit frei wählbarem ToD zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass einige Versuchspersonen im zweiten Durchlauf derselben Flugaufgabe ihre Wahl des ToD anpassten und ihn auf einen späteren Zeitpunkt verschoben haben. Dennoch verschiebt sich der Median nur geringfügig. Des Weiteren ist erkennbar, dass einige Versuchspersonen sowohl im ersten als auch im zweiten Szenario ein Profil mit sofortigem Sinkflug wählen.

In der durchgeführten Kurzbefragung wurde nach der Ermittlung des ToD gefragt. BILD 2 zeigt ein Histogramm dieser Ergebnisse. Eine deutliche Sammlung der Antworten ist bei der Faustformel „Die Höhendifferenz in Fuß mal drei entspricht etwa der benötigten Distanz in nautischen Meilen (durch tausend)“ zu erkennen. Im zweiten Durchgang wurde zudem häufig Schätz- bzw. Erfahrungswerte zur Ermittlung des ToD genannt.

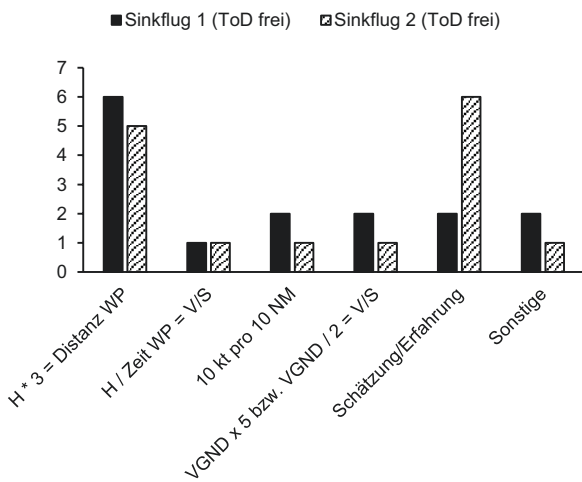


BILD 2. Histogramm der Antworten auf die Frage „Wie haben Sie den ToD ermittelt?“. Mehrfachnennungen waren möglich.

2.6.2. Schubhebelnutzung

Die Ergebnisse der Schubhebelnutzung am ToD zeigen, dass bei Sinkflugszenario 1 und 2 etwa die Hälfte der Versuchsteilnehmer eine Schubhebelstellung wählten, die der Leerlaufdrehzahl der Triebwerke entsprach (Szenario 1: n = 6, Szenario 2: n = 7). Zur Wahl der Schubhebelstellung argumentierte die Mehrheit der Versuchspersonen, die bei Beginn des Sinkfluges die Schubhebelstellung auf Leerlauf festlegten, mit einem angestrebten verbrauchsökonomischen Verhalten (siehe BILD 3).

Die einzige Häufung der Antworten der übrigen Versuchspersonen, die zur Einleitung des Sinkfluges eine vom Leerlauf abweichende Schubwahl trafen, betraf den Passagierkomfort. Häufig wurde auch der ungewohnt hohe Widerstand der VFW614-ATD genannt. Dies weist darauf hin, dass in diesem Punkt der Ergebnisbetrachtung möglicherweise Verzerrungen durch die Versuchsumgebung entstanden sind. In den ersten beiden Sinkflugszenarien wurden die Bremsklappen von allen Versuchspersonen nicht verwendet.

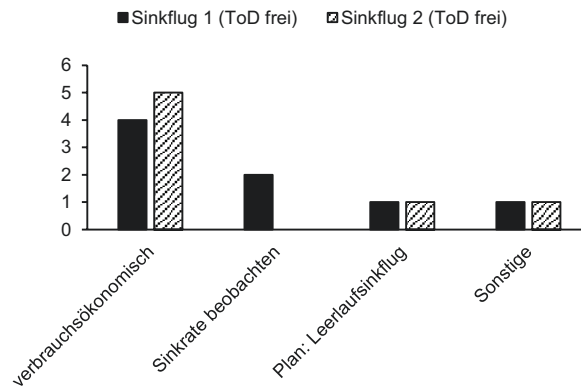


BILD 3. Histogramm der Antworten der betreffenden Versuchspersonen auf die Frage „Weshalb wurde am ToD die Schubhebelstellung in den Leerlauf verstellt?“. Mehrfachnennungen waren möglich.

2.6.3. Bremsklappennutzung

Das Sinkflugszenario 3 wurde in dieser Betrachtung separat ausgewertet. Dies ist damit begründet, dass durch den kurz bemessenen Bereich, in dem das Sinken erlaubt war, alle Versuchspersonen sofort am gegebenen Punkt das Sinken einleiteten. Zudem wurde dies durchweg mithilfe der Leerlaufstellung der Triebwerke herbeigeführt. In diesem Flugszenario stand die Bremsklappennutzung im Vordergrund.

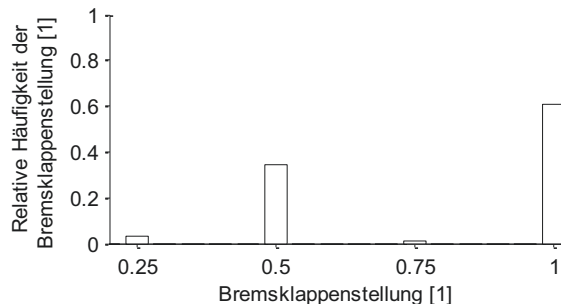


BILD 4. Histogramm der ausgefahrenen Bremsklappenstellungen im Sinkflug 3.

Die Häufigkeitsverteilung der Bremsklappenstellungen sind in BILD 4 verdeutlicht. Hier ist zu erkennen, dass sich die Bremsklappenstellungen hauptsächlich auf den vollen Ausschlag und in halb ausgefahrener Position verteilt. Es wurden ausschließlich Stellungen in der vorgegebenen Rasterung des Bedienhebels verwendet (1/4, 1/2, 3/4, 1). Zwischenstellungen wurden nicht gewählt. Dies ließ sich auch anhand der Antworten in der Kurzbefragung nach der Flugaufgabe nachvollziehen. Es bildeten sich zwei Anwendungskategorien ab. Die eine Gruppe verwendete die Bremsklappen binär. Sie setzte die Bremsklappen hauptsächlich mit vollem Ausschlag ein, um sie nur so häufig wie nötig und so effektiv wie möglich zu verwenden. Die andere Gruppe setzte die Bremsklappen behutsamer ein und wählte selten den Vollausschlag. Dies begründeten sie mit der Rücksicht auf den Komfort der Passagiere.

Es wird zudem vermutet, dass Piloten Bremsklappen äußerst ungerne einsetzen. Nach einigen Aussagen bewerteten sie den Einsatz von Bremsklappen als Folge ihres fehlerhaften Energiemanagements.

2.6.4. Anzeigen und Informationen

In BILD 5 ist die Häufigkeitsverteilung der Antworten der Versuchspersonen auf die Frage nach den verwendeten Informationen zur Bestimmung des Zeitpunkts zur Einleitung des Sinkflugs aufgezeigt. Eine Häufung der Antworten ist bei der Distanz zum nächsten Wegpunkt (WP) zu erkennen. Dieses Ergebnis korreliert auch mit dem Histogramm in BILD 2.

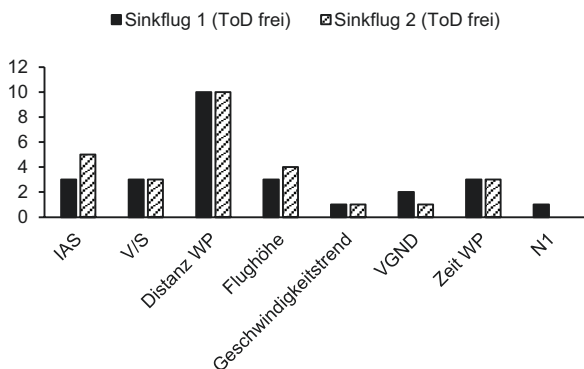


BILD 5. Histogramm der Antworten auf die Frage „Welche angezeigten Informationen haben Sie für die Ermittlung des ToD genutzt?“. Mehrfachnennungen waren möglich.

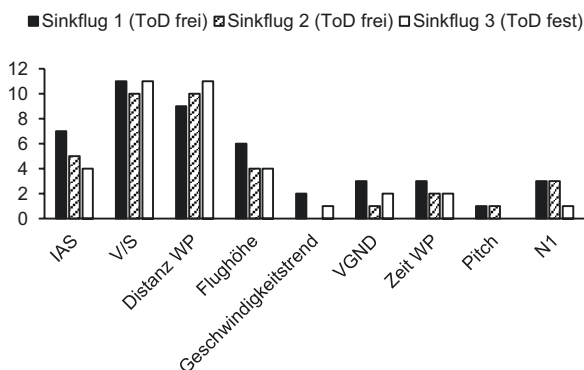


BILD 6. Histogramm der Antworten auf die Frage „Welche angezeigten Informationen haben Sie während des Sinkflugs verwendet, um Ihr Ziel zu erreichen?“. Mehrfachnennungen waren möglich.

Die Informationen, die laut Versuchspersonen während des Sinkflugs häufig verwendet werden, sind in BILD 6 als Histogramm dargestellt. Häufungen sind bei der Vertikalgeschwindigkeit (engl. *vertical speed*, V/S) und Distanz zum nächsten Wegpunkt sowie bei der angezeigten Flugeschwindigkeit (engl. *indicated airspeed*, IAS) und Flughöhe sichtbar.

Auch die verwendeten Anzeigen zu Schubeinstellung wurden erfragt. BILD 7 zeigt das Histogramm der Resultate der Befragung. Hier wurden die Informationen zur Fan-Drehzahl N1 sowie IAS und Geschwindigkeitstrend am Zahlreichsten genannt.

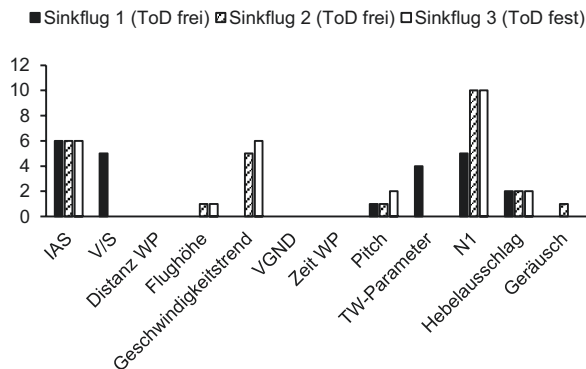


BILD 7. Histogramm der Antworten auf die Frage „Mit Hilfe welcher dargestellten Informationen haben Sie Ihre Schubeinstellung vorgenommen?“. Mehrfachnennungen waren möglich.

2.7. Diskussion

Um bewerten zu können, wie einheitlich die Handlungsstrategien der Piloten waren, wird insbesondere der Anfangspunkt des Sinkfluges, dessen Ermittlung und die dafür verwendete Schubhebelstellung betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl des ToD über alle Versuchspersonen nicht einheitlich war. Es scheinen mindestens zwei Gruppen mit verschiedenen Lösungsstrategien zu existieren. Die eine Gruppe behielt eine Zeit lang Höhe und Geschwindigkeit bei und leitete den Sinkflug erst möglichst spät ein. Darauf weist die Anpassung des ToD an den erhöhten Widerstand des simulierten Flugzeugs im zweiten Sinkflug hin. Die andere Gruppe sank sofort. Sie behielten auch ihre Strategie im zweiten Durchlauf bei.

Zum anderen weisen ebenfalls die Befragungsergebnisse auf zwei unterschiedliche Konzepte hin. Zwei der beschriebenen Faustformeln berechnen eine zum Sinken benötigte Distanz. Diese Formel passt zur Strategie der ersten Gruppe. Dagegen ergeben zwei weitere Faustformeln eine Vertikalgeschwindigkeit, die für Strategie 2 angewandt werden kann.

Die Schubhebelstellung am ToD sowie die Ergebnisse der Kurzbefragung geben Aufschluss über die Hintergründe der zwei verschiedenen Handlungsstrategien. Zusammengefasst kann geschlussfolgert werden, dass die Piloten, deren Strategie den Leerlaufsinkflug beinhaltete, dies aus verbrauchsökonomischer Sicht taten. Piloten, die einen gemäßigeren Sinkflug durchführten, begründeten dies mit ihrer Rücksichtnahme auf den Komfort der Passagiere.

Diese Erkenntnisse sind bestimmend für die Auslegung des Vorgabereglers. Der Regler sollte so entwickelt werden, dass die Unterstützung beider Strategien vorgesehen ist. Auch die Art der Nutzung der Bremsklappen in Sinkflugszenario 3 geben Hinweise für die Entwicklung des Reglers. Hier sollten ebenfalls die zwei verschiedenen Anwendungsstrategien, die in 2.6.3 beschrieben sind, Beachtung finden.

Für die Gestaltung der Anzeigen des Assistenzsystems sind ebenfalls einige Hinweise den Resultaten der Sinkflugszenarien zu entnehmen (siehe Abschnitt 2.6.4). Allgemein geben die Ergebnisse einen Überblick über die Verwendung der Informationen und sind somit Indiz für die Notwendigkeit der Implementierung. Auch kann anhand von Häufungen der Antworten eine Priorisierung der Information angenommen werden. Für die Bestimmung des ToD

liegt beispielsweise die Priorisierung der Information in der Distanz zum Zielwegpunkt. Während der Durchführung des Sinkfluges waren Sinkgeschwindigkeit und ebenfalls die Distanz zum nächsten Wegpunkt primär in Verwendung. Die Schubeinstellung wurde meist anhand der Fan-Drehzahl N1 und der angezeigten Fluggeschwindigkeit gewählt. Bemerkenswert ist hierbei, dass im ersten Sinkflug deutlich weniger Piloten N1 als Anhaltspunkt für die Schubeinstellung nutzen. Das lässt sich dadurch erklären, dass die Piloten mit diesem Flugmodell nicht vertraut waren und sich im ersten Sinkflug nötige N1-Werte einprägten. Erst in den darauffolgenden Durchgängen konnte dann auf erlernte N1-Werte zurückgegriffen werden und diese als Anhaltspunkt für die Schubeinstellung genutzt werden.

Für die Entwicklung der Anzeigen bedeuten die Ergebnisse, dass oben genannte Informationen in den betreffenden Situationen zur Verfügung stehen und salient sowie eindeutig dargestellt werden müssen.

3. TEILSTUDIE 2: LANDEANFLUG

3.1. Stichprobe und Versuchsumgebung

Die Landeanflüge der Teilstudie 2 wurden im direkten Anschluss an die oben beschriebene Teilstudie 1 (Sinkflüge) durchgeführt. Die Stichprobe sowie die Versuchsumgebung entspricht exakt den ausführlichen Beschreibungen in Abschnitt 2.1 und 2.2.

3.2. Aufgaben

Die zweite Flugaufgabe beinhaltete einen Anflug mit Instrumentenlandesystem (engl. *instrument landing system*, ILS) und anschließender Landung auf der Landebahn 25R in Frankfurt. Der Anflug begann 20 NM vor der Landebahnschwelle in 4000 ft Höhe über dem mittleren Meeresspiegel mit einer Geschwindigkeit von 250 kn.

Die Versuchspersonen bekamen die Aufgabe, den Anflug und die Landung möglichst wie im realen Linienflug durchzuführen. Dazu mussten sie den Gleitpfad in 4000 ft Höhe einfangen und dann seinem 3°-Profil bis zu Landeschwelle folgen. Des Weiteren war selbstständig die Geschwindigkeit anzupassen (Landegeschwindigkeit 115 kn), Landeklappenkonfiguration durchzuführen und das Fahrwerk auszufahren. Bis 1000 ft über Grund musste das Flugzeug zur Landung konfiguriert und stabilisiert sein.

Diese Flugaufgabe wurde ebenfalls dreimal wiederholt. Jedes Szenario ging von der oben beschriebenen Aufgabenstellung aus. Die Varianten unterschieden sich lediglich im Störungsfall. Landeszenario 1 war ohne Störung zu absolvieren. Landeszenario 2 beinhaltete eine Störung durch eine unangekündigte Windböe. Bei der Böe handelte es sich um einen in 10 Sekunden linear ansteigenden Gegenwind von 20 kn, der sich nach 15 Sekunden linear auf 10 kn reduzierte. Sie wurde durch den Versuchsleiter bei rund 9,4 NM vor Landebahnschwelle initiiert. 9,4 NM entsprechen bei einem 3°-Gleitpfad einer Höhe von 2000 ft über Grund. Die Versuchspersonen hatten Zeit bis 1000 ft über Grund, die entstandene Ablage zu korrigieren.

Landeszenario 3 unterschied sich durch eine unangekündigte Vorgabe der Fluggeschwindigkeit. Die Piloten wurden von der Flugsicherung aufgefordert ihre Fluggeschwindigkeit auf 120 kn zu reduzieren und diese bis 5 NM vor der Landeschwelle zu halten. Die Ansage der Flugsicherung wurde durch den Versuchsleiter 9,4 NM vor Landebahnschwelle simuliert. Die Versuchspersonen hatten auch in

diesem Szenario Zeit bis 1000 ft über Grund die entstandene Ablage zu korrigieren. Um Lerneffekte ausschließen zu können, wurde die Abfolge der Wiederholungen variiert und gleichmäßig auf die Versuchspersonen verteilt.

Zweck dieser Szenarien war es, aufzuklären wie die Strategien der Piloten aussehen, Energie bei einem Landeanflug abzubauen. Im Vergleich zum Sinkflugszenario aus Teilstudie 1 war hier das Zusammenspiel des Energieabbaus mit dem Ausfahren von Landeklappen und Fahrwerk sowie das Verhalten nach fester Prozedur von Bedeutung. Durch die drei Varianten des Anflugszenarios sollte ebenfalls untersucht werden, wie Piloten auf dem Gleitpfad auf unerwartete Energieüberschüsse in Form einer Windböe bzw. kurzfristigen Geschwindigkeitsreduktion reagieren.

3.3. Erhobene Daten

Als objektive Leistungsdaten zur Ermittlung gewählter Handlungsstrategien wurden in diesem Teil des Versuchs der Anfangspunkt des ersten Verzögerens sowie die Zeitpunkte der Konfigurationsschritte aufgezeichnet. Um die Hinweise zu erhalten, woran sich die Versuchspersonen für ihren Handlungsablauf orientierten, wurden ebenfalls die subjektiven Begründungen aus den Nachbefragungen festgehalten. Neben der Konfigurationsabfolge wurde außerdem nach der Reaktion auf die unangekündigten Störungen gefragt. Auch in dieser Teilstudie wurden bei der Aufbereitung der Antworten für die Ergebnisdarstellungen alle Beschreibungen, die sich auf die veränderten Bedingungen der Versuchsumgebung zurückführen ließen, entfernt.

3.4. Durchführungsdetails

Die Landeanflüge wurden im Anschluss an die Sinkflüge der bereits beschriebenen Teilstudie 1 durchgeführt. Für eine ausführliche Durchführungsbeschreibung des gesamten Versuchsablaufs siehe Abschnitt 2.5.

3.5. Ergebnisse

Die Versuchsergebnisse der Szenarien zu den durchgeführten Anflügen und Landungen werden in den folgenden drei Abschnitten dargestellt. Der erste Abschnitt befasst sich mit der Abfolge der Konfiguration. Die Ergebnisse zur Schubhebelnutzung werden im zweiten Abschnitt vorgestellt. Abschließend werden die Befragungsergebnisse zu den Anzeigen und Informationen während der Landung beschrieben.

3.5.1. Konfiguration

Im Unterschied zu den Sinkflugszenarien soll mit Hilfe der Ergebnisse der Flugaufgaben mit Anflug und Landung das Verhalten von Piloten bei fester Prozedur erkannt werden. Des Weiteren sind Gründe und Informationen von großem Interesse, die den Piloten als Auslöser für die Konfigurationsdurchführung dienen.

In BILD 8 ist die Verteilung der Konfigurationsschritte über den Abstand zur Landebahnschwelle im Landeszenario ohne Störung dargestellt. Zusätzlich zu den Klappenstellungen „Flaps 1“, „Flaps 2“, „Flaps 3“ und „Flaps 4“ (auch „Flaps full“) ist der Punkt, in dem das Fahrwerk ausgefahren wurde sowie der Punkt der ersten Geschwindigkeitsreduktion, gezeigt. Es ist zu erkennen, dass schon für den Normalfall ohne äußere Störungen eine große Streuung im Ablauf der Konfiguration über alle Versuchspersonen feststellbar ist. Dies gilt insbesondere für den Punkt der ersten Geschwindigkeitsreduktion und das Setzen der Landeklappenkonfiguration Flaps 2. Außerdem lässt sich feststellen,

dass das Ausfahren des Fahrwerks und die Konfiguration auf Flaps 3 und full in direkter Abfolge durchgeführt wurden.

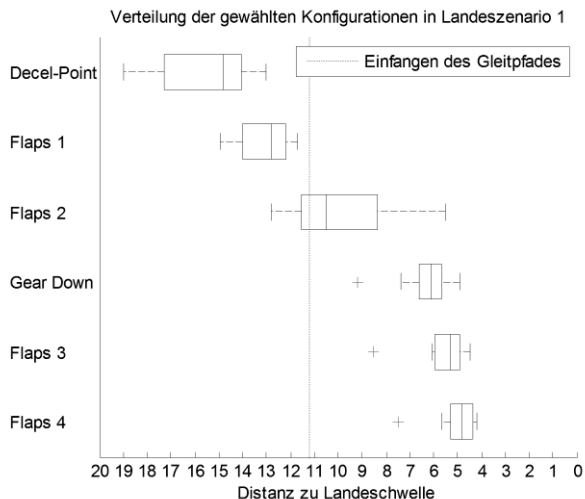


BILD 8. Verteilung der gewählten Konfigurationen im Landeszenario ohne Störung über die Distanz zur Landebahnschwelle.

Bei Vergleich des Normalfalls mit den Störszenarien sind nur marginale Unterschiede zu erkennen. Einzig im Landeszenario 3 mit unangekündigter Vorgabe zur Reduzierung der Geschwindigkeit wurden die letzten drei Konfigurationsschritte etwas früher durchgeführt. In Hinblick auf die Fluggeschwindigkeiten, die bei den Konfigurationsdurchführungen anlagen, kann keine bedeutsame Verschiebung festgestellt werden.

In der Nachbefragung zu den Störszenarien ergaben sich entsprechende Resultate. Als Reaktion auf die Windböe gab die Mehrzahl an Versuchspersonen eine Anpassung des Schubes an. Sieben davon setzten die Triebwerke sofort auf Leerlaufdrehzahl. Drei der Piloten beobachteten erst die Reaktion des Flugzeugs auf die Windböe. Die Reaktion auf die unangekündigte Flugsicherungsanweisung beschrieb die Mehrheit der Versuchsteilnehmer mit dem Einstellen des Triebwerkschubs auf Leerlaufdrehzahl und frühzeitigem Konfigurieren um den Widerstand zu erhöhen. Drei der Piloten setzten zudem Bremsklappen ein.

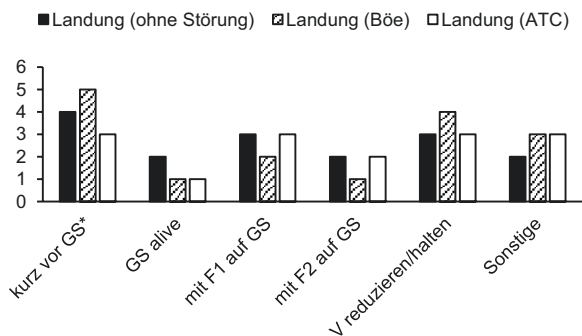


BILD 9. Histogramm der Antworten auf die Frage „Welche Gründe gab es für das Konfigurieren auf Flaps 1?“. Mehrfachnennungen waren möglich.

BILD 9 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Antworten auf die Frage nach den Gründen für das Konfigurieren auf Landeklappenstellung Flaps 1. Es war zu erwarten, dass keine

merklichen Unterschiede zwischen den Szenarien erkennbar sind. Dies begründet sich dadurch, dass sich die verschiedenen Szenarien zu diesem Zeitpunkt noch nicht unterschieden. Die in der Abbildung dargestellten Ergebnisse bestätigen diesen erwarteten Zusammenhang. Der Großteil der Versuchspersonen gab an vor oder beim Erreichen des Gleitpfades die Konfiguration auf Flaps 1 zu veranlassen.

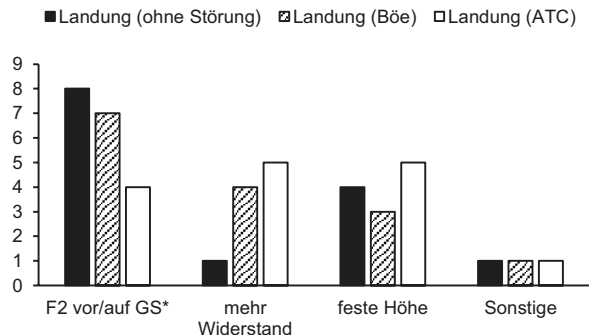


BILD 10. Histogramm der Antworten auf die Frage „Welche Gründe gab es für das Konfigurieren auf Flaps 2?“. Mehrfachnennungen waren möglich.

Die Antworten auf die Frage „Welche Gründe gab es für das Konfigurieren auf Flaps 2?“ sind in BILD 10 zu sehen. Die häufigste Begründung fällt auf das Konfigurieren der zweiten Klappenstellung vor oder beim Erreichen des Gleitpfades. Andere oft genannte Antworten der Piloten waren, dass sie sich anhand einer festen Höhe orientieren und dass die Konfiguration zur Widerstandserhöhung genutzt wurde. Diese Konfiguration kann zum Teil schon von den unangekündigten Störungen beeinflusst sein. Vor allem letzte Antwortkategorie weist auf den Einfluss der Störungen hin.

Die Auslöser für das Ausfahren der Fahrwerke sind in BILD 11 dargestellt. Als häufigster Grund war die Höhe über Grund von rund 2000 ft angegeben.

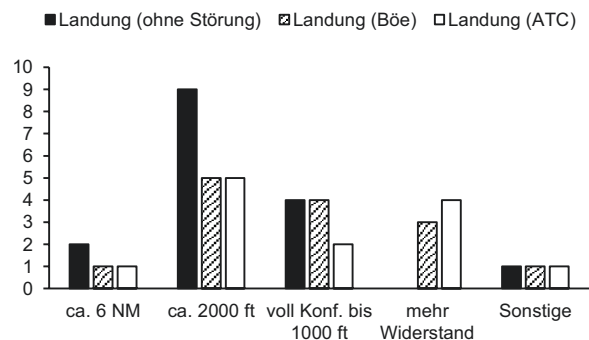


BILD 11. Histogramm der Antworten auf die Frage „Welche Gründe gab es für das Ausfahren des Fahrwerks?“. Mehrfachnennungen waren möglich.

In den Antworten zum Ausfahren des Fahrwerks sowie zur Konfiguration auf Flaps 3 und Flaps full ist auffällig, dass viele Versuchspersonen für alle drei Konfigurationen als Grund die nötige Stabilisierung mit voller Landekonfiguration angaben. Ebenfalls wurde häufig für Flaps 3 und full das Durchkonfigurieren bzw. aneinander anschließende

Konfigurieren genannt. Diese Aussagen weisen ebenfalls auf die Konfiguration im Anschluss an das Ausfahren des Fahrwerks in einem „Paket“ aus.

3.5.2. Schubhebelnutzung

Zur Untersuchung der Schubhebelnutzung in den Landeanflugszenarien wurde als bedeutsamster Moment der Zeitpunkt des ersten Verzögern gewählt. Es ist zu erkennen, dass jeweils mindestens die Hälfte aller Piloten zum Verzögern den Schub auf die Leerlaufdrehzahl reduziert hatte (Anflug 1: n = 8, Anflug 2: n = 7, Anflug 3: n = 9). In BILD 12 sind die Werte der Schubhebelstellungen in einem Boxplotdiagramm über die drei Landeanflüge zu erkennen. Aus der anschließenden Befragung ließen sich jedoch keine einheitlichen Begründungen für die Wahl der Schubhebelstellungen ableiten.

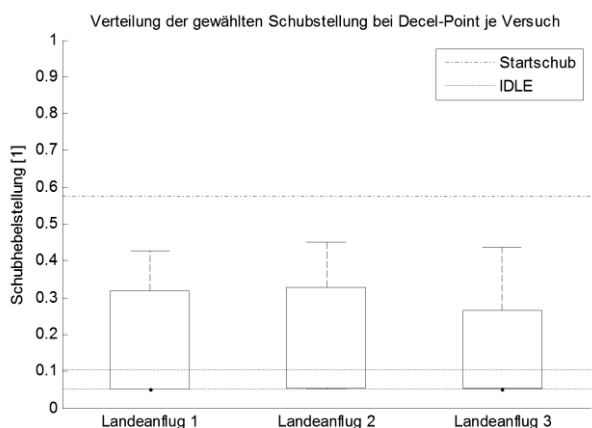


BILD 12. Boxplotdiagramm der gewählten Schubhebelstellung zum Zeitpunkt des ersten Verzögerns.

3.5.3. Anzeigen und Informationen

Die folgenden Abbildungen sollen verdeutlichen welche Anzeigen und Informationen für die Piloten während der Landeanflüge in den erfragten Situationen erforderlich waren. BILD 13 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Antworten der Piloten auf die Frage „Welche dargestellten Informationen waren ausschlaggebend auf Flaps 1 zu konfigurieren?“.

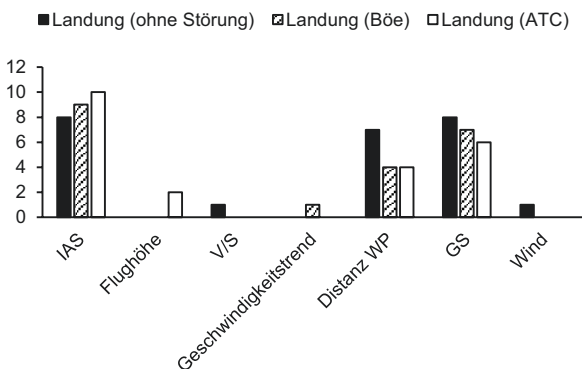


BILD 13. Histogramm der Antworten auf die Frage „Welche dargestellten Informationen waren ausschlaggebend auf Flaps 1 zu konfigurieren?“. Mehrfachnennungen waren möglich.

Häufigste Antworten waren angezeigte Fluggeschwindigkeit, Gleitpfad und Distanz zum nächsten Wegpunkt

(Schnittpunkt mit Gleitpfad).

Die Frage nach den benötigten Informationen zur Konfiguration auf Klappenstellung Flaps 2 beantworteten die Versuchsteilnehmer ähnlich. Zu der angezeigten Fluggeschwindigkeit, Gleitpfad und Distanz zum nächsten Wegpunkt kam zusätzlich die Flughöhe dazu, wie schon anhand der Begründungen für die Konfiguration in BILD 10 zu erwarten war.

In BILD 14 ist zu erkennen, dass der Großteil der Versuchspersonen für die Entscheidung das Fahrwerk auszufahren die angezeigte Fluggeschwindigkeit sowie die Flughöhe zurate ziehen.

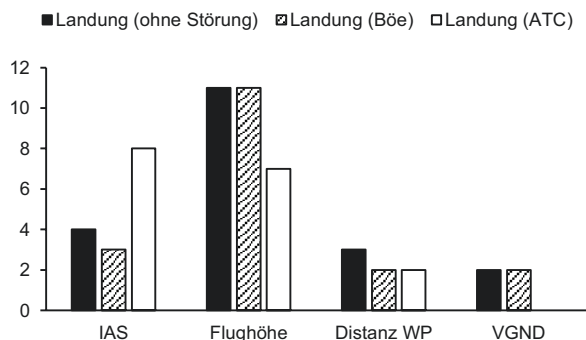


BILD 14. Histogramm der Antworten auf die Frage „Welche dargestellten Informationen waren für die Entscheidung ausschlaggebend das Fahrwerk auszufahren?“. Mehrfachnennungen waren möglich.

Um die Konfiguration auf Flaps 3 und Flaps full durchzuführen, benötigten die Piloten laut Nachbefragung ähnliche Informationen. Die angezeigte Fluggeschwindigkeit und die Flughöhe wurden hier mit Abstand am häufigsten genannt.

3.6. Diskussion

Obwohl der Konfigurationsablauf des Landeanflugs durch Vorgaben der Fluglinien stark prozeduralisiert ist, unterschieden sich die Handlungsstrategien der Versuchspersonen laut der vorliegenden Ergebnisse deutlich. Dies konnte auch durch die subjektiven Begründungen bestätigt werden. Die Ergebnisse der Kurzbefragungen zeigten unterschiedlichste Auslöser für die Konfiguration auf Flaps 1 und 2 auf. Nur für das Ausfahren der Fahrwerke mit anschließendem Konfigurieren auf Klappenstellung Flaps 3 und Flaps full ergaben sich einheitlichere Verhaltensmuster. In der Mehrheit wurden die letzten drei Konfigurationen direkt aufeinanderfolgend durchgeführt. Sie wurden durch das Fahrwerkfahren bei rund 2000 ft über Grund bzw. 6 NM vor Landebahnschwelle eingeleitet. Bei anstehender hoher Geschwindigkeitsreduktion werden Bremsklappen und Fahrwerk früher eingesetzt, vermutlich um eine schnellere Fahrtreduktion durch einen höheren Widerstand zu erzeugen. Des Weiteren war vereinzelt zu beobachten, dass die Piloten die Klappenkonfiguration 3 vor dem Ausfahren des Fahrwerks veranlassten.

Wie in diesem Beispiel schon zu sehen ist, sind in den Ergebnissen der Befragung zu den Auslösern zum Teil konkrete Anhaltspunkte genannt, wann Piloten generell eine Konfiguration durchführen. In diesen eindeutigen Fällen, sollte sich die Automation des Reglers ebenfalls an diesen Auslösern orientieren. Die Ergebnisse der Schubhebelnutzung im Zeitpunkt des ersten Verzögerns zeigen zwar eine

Tendenz zur Reduzierung des Triebwerkschubs auf Leerlaufdrehzahl, sind dennoch nur mit Vorsicht zu generalisieren, da die subjektiven Begründungen stark voneinander abweichen.

In den Ergebnissen der Befragung zu den verwendeten Anzeigen und Informationen bestätigten die Piloten die Antworten zu den Konfigurationsauslösern. Andererseits fällt auf, dass hier sehr häufig die angezeigte Fluggeschwindigkeit genannt wurde. Dies weist vermutlich auf den Umstand hin, dass Piloten vor der Durchführung des Konfigurationsschrittes anhand der angezeigten Fluggeschwindigkeit prüfen, ob sie sich für die zu initiierte Konfiguration im sicheren Geschwindigkeitsbereich befinden. Somit kann für die Konfigurationsautomatik des Reglers nicht davon ausgegangen werden, dass Piloten Geschwindigkeiten als Konfigurationsauslöser ausschließen.

4. FAZIT

Mithilfe der hier vorgestellten Versuche konnten einige Fragen geklärt werden, die es im Vorfeld der Entwicklung des Assistenzsystems zu untersuchen galt. Jedoch war es nicht möglich konkrete Handlungsmodelle abzuleiten, die sich auf die Mehrheit der Piloten abbilden ließe. Dafür waren auch bei prozeduralisierten Verfahren die Handlungsabläufe der einzelnen Versuchspersonen sowie deren Argumentationsgrundlagen zu verschieden. Dennoch sind anhand der Resultate Empfehlungen für eine pilotenzentrierte Entwicklung des Assistenzsystems, insbesondere des Vorgabereglers sowie der Anzeigen, abzuleiten.

Es ist noch darauf hinzuweisen, dass die hier vorgestellten Ergebnisse nur mit Vorsicht verallgemeinert werden sollten, da die getestete Stichprobe wenig repräsentativ für die Gesamtheit aller Verkehrspiloten scheint. Dies begründet sich erstens in dem geringen Stichprobenumfang dieser Untersuchung und zweitens in dem unüblich hohen Anteil von Versuchsteilnehmern mit Ingenieurshintergrund. Überdies muss in Betracht gezogen werden, dass hier vorliegende Ergebnisse verzerrt sein können, da die Piloten kein ihnen vertrautes Flugzeug flogen.

Entwickler der Benutzerschnittstellen können sich dennoch an den Resultaten der Befragungen zu verwendeten Anzeigen und Informationen orientieren, um diese pilotenzentriert zu gestalten. Die Entwicklung des Vorgabereglers kann ebenfalls von den hier gezeigten Versuchsergebnissen profitieren. Es konnten einige Handlungsstrategien für den freien Sinkflug sowie für den prozeduralisierten Landeanflug aufgezeigt werden. Zudem werden die Handlungsstrategien der Piloten durch die Ergebnisse der Befragungen mit Auslösern und Begründungen zu speziellen Situationen gestützt.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Projektes „nxControl“, welches durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), GZ: LU 1397/3-1, MA 3759/3-1, gefördert wird. Die Autoren möchten sich auch herzlich bei den zwölf Piloten für die Teilnahme und Unterstützung der Versuche bedanken.

LITERATUR

- [1] Brockhaus, R., Alles, W., Luckner, R. (2011). *Flugregelung* (3. Auflage). Berlin: Springer-Verlag.
- [2] Schreiter, K., Müller, S., & Luckner, R. (2013). *nxCon-*

trol: Konzept zur Vorgaberegulung für die Längsbeschleunigung des Flugzeugs. Paper präsentiert bei 62. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. Stuttgart.

- [3] Manzey, D. (2012). *Systemgestaltung und Automatisierung*. In: P. Badke-Schaub, G. Hofinger, K. Lauche (Hrsg.), *Human Factors, Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen*, 2. Aufl., S. 333-352, Berlin: Springer-Verlag.
- [4] International Organization for Standardization (1999). *ISO 13407:1999(E) Human-centred design processes for interactive systems*. Genf
- [5] Müller, S., Manzey, D., Bleyer, A., Schreiter, K., Voigt, A., Luckner, R. (2013). *Untersuchung der mentalen Repräsentation von Energiemanagement bei der Flugzeugführung zur Entwicklung eines Pilotenassistenzsystems*. Paper präsentiert bei 10. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme. Berlin