EIN ACTIVE-SIDESTICK-KONZEPT ZUR STEIGERUNG DER SITUATION AWARENESS VON PILOTEN SIDESTICK-GESTEUERTER FLUGZEUGE

F. J. J. Schmidt-Skipiol, P. Hecker Institut für Flugführung der TU Braunschweig, Hermann-Blenk-Str. 27, Deutschland

Zusammenfassung

Im letzten Jahrhundert haben sich Flugzeugcockpits zu einem komplexen Umfeld entwickelt, in dem automatisierte Systeme miteinander und mit dem Piloten wechselwirken. Diese Systeme wurden zusammen mit dem gesamten Cockpitlayout stetig weiterentwickelt, es gibt jedoch Anzeichen, dass dabei die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) nicht hinreichend berücksichtigt worden ist, mit negativen Folgen für die "Situation Awareness". Diese Arbeit führt in die Thematik der MMS in modernen Sidestick-gesteuerter Fly-by-Wire-Flugzeugen ein und entwickelt ein Konzept für ein haptisches Feedback zur Steigerung der Situation Awareness bezüglich der Flight Envelope. Dabei wird angestrebt, mittels eines "Active Sidestick" die Sicherheitsvorteile einer Flight Envelope Protection mit den Vorteilen eines haptischen Feedback zu verbinden, um dem Piloten intuitiv das Verlassen des sicheren Betriebsbereiches und die Annäherung an Grenzzustände aufzuzeigen. Um dieses Konzept im Rahmen einer experimentellen Simulatorstudie zu evaluieren, wurde eine Simulationsumgebung geschaffen, welche die Funktionsweise in einem Prüfszenario nachahmt. Mit Probanden unterschiedlicher Flugerfahrung wurde anschließend untersucht, ob das System Abweichungen bestimmter Parameter, wie Geschwindigkeit, Rollwinkel und Anstellwinkel von vorgegebenen Sollwerten verringert. Die Auswertung zeigt, dass das Konzept die Einhaltung von Envelope-Grenzen verbessern kann, aber noch umfangreiche Entwicklungsarbeit zu leisten ist.

1. EINLEITUNG

In den vergangenen Jahrzehnten hat eine Vielzahl automatisierter Systeme Einzug in die Cockpits moderner Verkehrsflugzeuge gefunden. Sie ermöglichten, stetig steigende Anforderungen an die Flugführungsaufgabe mit einer von vier auf drei und schließlich zwei Mitgliedern reduzierten Cockpit-Crew zu bewältigen.

Diese Systeme wurden zusammen mit dem gesamten Cockpitlayout fortlaufend weiterentwickelt und tragen maßgeblich zu dem sehr hohen Sicherheitsstandard in der zivilen Verkehrsluftfahrt bei. Es gibt jedoch Anzeichen, dass bei dieser Entwicklung die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) nicht hinreichend berücksichtigt worden ist, sodass sich Piloten zunehmend in Situationen wiederfinden, in denen es ihnen an einem umfassenden Lagebild bezüglich ihres Flugzeugs, ihres Flugzustandes und der Umgebung – zusammenfasst unter dem Begriff "Situation Awareness" – mangelt, mit bisweilen schwerwiegenden Folgen. [1]

Bei der Analyse von Unfällen wird der Mensch häufig als begrenzender Faktor im Cockpit wahrgenommen, da die Systeme zu komplex und die Informationsmengen zu groß geworden sind, um sie auf die herkömmliche Art über ein umfassendes mentales Modell verarbeiten zu können. [2]

Der Ansatz, den Menschen deshalb aus dem Gesamtsystem heraus zu kürzen, unterschlägt seine gegenüber der Automatisierung einzigartige Fähigkeit der kreativen Problemlösung – besonders bei der Lösung von nicht vorhergesehenen Situationen.[3]

Der Pilot und die Automatisierung könnten sich sehr gut ergänzen. Ohne die Nutzung dieses Potentials bleibt das Gesamtsystem Mensch-Maschine unter seinen Möglichkeiten. Um die Entfaltung seines Potentials zu ermöglichen, muss der Mensch in den Mittelpunkt der Gestaltung der MMS rücken. [4] Der dafür notwendige

Mehraufwand kann sich langfristig in Form besserer Leistungen bei geringerem Trainingsbedarf auszahlen. [5]

Eine ideale Automatisierung sollte daher so gestaltet sein, dass sie:

- Auch im Normalbetrieb während des Reisefluges den Piloten besser in das Geschehen integriert, ohne ihn zu ermüden.
- Bei auftretenden Problemen den Piloten dabei unterstützen, sich ein umfassendes Lagebild zu verschaffen.
- 3) Dem Piloten die Möglichkeit gibt, das Handeln der Automatisierung zu erkennen, zu verstehen, zu bewerten und gegebenenfalls einzugreifen.

Der Pilot erfüllt heute eine Rolle als Manager: Er muss nicht jedes Detail wissen, aber er muss soweit informiert sein über Funktion und Zustand des Systems, dass er im Notfall sofort angemessen handeln kann. Dazu muss er über Situation Awareness verfügen.

Die menschlichen Informationsaufnahmekanäle und Kapazitäten zur parallelen Aufbereitung sind jedoch begrenzt und weitgehend ausgereizt. Gerade in Situationen höchster Arbeitsbelastung, z. B. bei Ausfall oder Fehlfunktion der Automatisierung, ist dann eine Überlastung oft unvermeidlich. Das mentale Modell umfasst nicht mehr alle Prozessschritte, sondern weist "Black Boxes" auf. Die Folgen sind unter Umständen sehr schwerwiegende oder katastrophale Bedienungsfehler.

Zur Erstellung des angesprochenen Lagebilds benötigt ein Pilot ein zu seiner fliegerischen Aufgabe passendes mentales Modell, das mit Informationen über den aktuellen Flugzustand versorgt wird und damit ein inneres Abbild der entscheidungsrelevanten Aspekte der Umwelt darstellt. Verschiedene Studien und Untersuchungen nähren die Vermutung, dass es Piloten moderner automatisierter Verkehrsflugzeuge häufig Defizite bei

©2018 1

beiden zentralen Bestandteilen zur Erlangung von Situation Awareness (Definition siehe Abschnitt 2) aufweisen:

- 1) Das mentale Modell ist teilweise unzureichend.
- 2) Die Informationsversorgung ist unzureichend: Der Pilot kann aufgrund von suboptimaler Darstellung und Überlastung der genutzten Informationskanäle nicht alle für die Erstellung eines Lagebilds notwendigen Informationen aufnehmen. Darüber hinaus erhält er häufig nur dann eine Rückmeldung, wenn er sie aktiv sucht.

Dabei ist der zweite Punkt mitursächlich für den ersten. In modernen Flugzeugen wird vor allem der visuelle Kanal zur Informationsübertragung vom Flugzeug an den Piloten genutzt, sowie insbesondere in Notsituationen der akustische (Warnungen und Anweisungen). Die Kapazität beider Kanäle wird heute im Routinebetrieb bereits ausgereizt, in Notsituationen kommt es häufig zu Überlastungen. Der haptische Kanal hingegen wird kaum genutzt. Dabei bietet er viele Möglichkeiten, den Piloten mit intuitiv verständlichen Informationen über den aktuellen Flugzustand und dessen Entwicklung in nächster Zukunft zu versorgen, wie in diesem Beitrag gezeigt werden soll.

Vor diesem Hintergrund wurde ein Konzept zur Erstellung eines haptischen Feedback bei Sidestick-gesteuerten Flugzeugen entwickelt. [6] Dieses Feedback soll dem Piloten unter anderem eine intuitive Rückmeldung über die Position seines Flugzustandes relativ zu den Grenzen einer Flight Envelope geben, um ihn besser über den Flugzustand zu informieren und die anderen Sinneskanäle zu entlasten (Punkt 2). Längerfristig soll der Pilot dadurch auch ein besseres mentales Modell ausbilden (Punkt 1). Im Folgenden wird zunächst in die Thematik der Situation Awareness vor dem Hintergrund der MMS in modernen automatisierten und Sidestick-gesteuerten Flugzeugen eingeführt und ein Konzept zur Steigerung der Situation Awareness mit Hilfe eines haptischen Feedback präsentiert. Anschließend werden die Erstellung, die Durchführung und die Ergebnisse einer Studie zur Untersuchung dieses haptischen Feedback dargestellt. Ziel dieser experimentellen Simulatorstudie ist die Untersuchung, inwiefern das entwickelte Modell des haptischen Feedback das Bewusstsein von Piloten hinsichtlich der Grenzen der Flight Envelope verbessern kann. Gemessen wird dabei, wie genau die Probanden in einem Durchstartmanöver bestimmte als Sollwerte vorgegebene Parameterwerter mit Unterstützung des haptischen Feedback einhalten.

2. SITUATION AWARENESS UND FLUGSICHERHEIT

Awareness beschreibt im Kontext Situation der Flugsicherheit die "Wahrnehmung von Umgebungselementen innerhalb eines Bereichs, das Erfassen ihrer Bedeutung und die Projektion ihres Zustandes in der nahen Zukunft" [7, S. 36], also ein umfassendes mentales Lagebild. Dieses Lagebild ist die Grundlage für das Treffen richtiger Entscheidungen und ein zentraler Sicherheitsaspekt in der Luftfahrt, [8] deshalb bedroht ein Mangel an Situation Awareness langfristig die weitere Steigerung des Sicherheitsniveaus, insbesondere vor dem Hintergrund zusätzlicher Anforderungen an die Flugführung (z. B. im Rahmen von emissionsreduzierenden Continuous Descent Approaches, CDA).

Bei der statistischen Erfassung von Flugunfällen werden

viele Vorfälle als menschliches Versagen geführt, wo sie für ca. 75% der Totalverluste stehen, [9] hätten aber möglicherweise mit einem besseren Design der MMS im Sinne einer höheren Situation Awareness vermieden werden können, denn die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle hat große Auswirkung auf die Wahrscheinlichkeit eines Bedienfehlers. [10] Mangelnde Situation Awareness spielt bei 88% der Unfälle mit menschlichem Versagen eine wichtige Rolle. [11]

Als Grund für den angesprochenen Mangel an Situation Awareness wird unter anderem die hohe Belastung und teilweise Überlastung des visuellen und akustischen Kanals bei der Informationsübertragung an die Piloten gesehen. [12]

Diese Überlastung beruht unter anderem auf der technischen Weiterentwicklung im Laufe der letzten Jahrzehnte. Bei den ersten Flugzeugen wurde quasi als Nebeneffekt der direkten mechanischen Kopplung zwischen Steuerorgan und Steuerfläche eine Vielzahl an impliziten Informationen bezüglich des Flugzustandes an den Piloten übermittelt. [13] Die Nutzung des haptischen Kanals für die Übertragung dieser Informationen an den Piloten war zwar technisch bedingt, erwies sich aber als sehr vorteilhaft, denn die Informationsverarbeitung über den haptischen Kanal beansprucht nach kurzer Übung kaum mentale Kapazität und führt trotzdem zu sehr schnellen und präzisen Reaktionen. [14]

Mit der Einführung von *Fly-by-Wire* ging diese unmittelbare Rückmeldung verloren. Zwischen den Piloten und die Stellgröße (z. B. Steuerflächenausschlag) trat eine zunehmend komplexere, mit sich selbst wechselwirkende und sich selbst kontrollierende Regelstrecke. Ihre Kontrolle verlagerte sich zunehmend auf den visuellen Kanal.

Das Sidestick-Steuerkonzept stellt einen Endpunkt dieser Entwicklung dar: Mittels des Sidestick kommandiert der Pilot keine direkten Ruderausschläge, sondern Drehraten um die Längs- und Querachse des Flugzeugs; die Einnahme der Neutralposition des Sidestick bedeutet dabei grundsätzlich die Beibehaltung des aktuell vorliegenden Flugzustands. Die Ausschläge der Bedienelemente werden hierzu nicht mehr direkt an die Steuerorgane weitergeleitet, sondern gehen an einen Flugrechner, der die für das Erreichen der angestrebten Drehraten notwendigen Ausschläge der Aktuatoren berechnet und veranlasst. Dabei wird komplett auf eine Rückmeldung unter Nutzung des haptischen Kanals verzichtet

Die in der konventionellen Steuerung über den haptischen Kanal an den Piloten weitergeleiteten Informationen aerodynamischen Belastungen der Steuerflächen und der Steuereingaben des anderen Piloten oder des Autopiloten werden entweder auf den visuellen Kanal verlagert oder gehen verloren. Um zu vermeiden, dass der Pilot ohne diese Rückmeldung gefährliche Flugzustände ansteuert, wurde das System der Flight Envelope Protection entwickelt: Bei Annäherung an die Grenzen des sicheren Flugbereichs ändert sich die Art und Weise, auf welche der Flugrechner die Steuereingaben des Piloten umsetzt. So muss beispielsweise bei Erreichen eines gewissen Rollwinkels der Sidestick stärker ausgelenkt werden, um die Rollrate weiterhin konstant zu halten; bei Erreichen eines maximalen Rollwinkels werden die Befehle des Piloten bezüglich einer weiteren Erhöhung des Winkels nicht mehr umgesetzt.

©2018

2

Die Flight Envelope Protection hat sich als ein wichtiges Werkzeug bei der Erhöhung der Flugsicherheit erwiesen. Sie trennt aber den Piloten auf zwei Arten vom eigentlichen Fluggeschehen:

- Die Annäherung an Grenzen ist nicht mehr unmittelbar erfahrbar.
- Bei Erreichen einer in der Flight Envelope Protection programmierten Grenze werden die Handlungsmöglichkeiten des Piloten eingeschränkt.

Beide Punkte sind aus Sicht einer optimalen Gestaltung der MMS ungünstig. Der erste Aspekt verringert die Situation Awareness, da der Pilot weniger Informationen über seinen Flugzustand erhält. Der zweite Aspekt ist vor allem dann kritisch, wenn Situationen eintreten, die bei der Auslegung der Automatisierung nicht hinreichend berücksichtig worden sind. Ein Beispiel ist hier die Sturmlandung von LH 044 auf dem Flughafen Hamburg am 01.03.2008, als der Bordrechner unmittelbar nach dem Aufsetzen in den Ground Mode wechselte und damit die vom Piloten kommandierten und zur Aussteuerung einer Böe auch notwendigen großen Ruderausschläge nicht umsetzte. [15]

3. HAPTISCHES FEEDBACK ZUR UNTERSTÜTZUNG DER SITUATION AWARENESS BEZÜGLICH EINER FLIGHT ENVELOPE

Bei der Erkundung neuer Möglichkeiten, den Piloten bei der Erstellung seines Lagebilds zu unterstützen, erscheint die Nutzung des haptischen Kanals vorteilhaft, denn geeignet präsentiert können haptische Informationen sehr schnell aufgenommen und intuitiv verarbeitet werden und damit zu einer umfangreichen Situation Awareness beitragen. [16] Die Piloten erhalten damit wichtige Informationen für den Aufbau des Lagebildes bei gleichzeitiger Entlastung des visuellen und des akustischen Kanals. Aus diesem Grund werden bei verschiedenen Fly-by-Wire-gesteuerten Flugzeugmustern die aerodynamischen Belastung der Steuerflächen ermittelt und in Form simulierter Steuerkräfte an die Piloten weitergebene (beispielsweise bei Boeing 777 und 787 sowie Panavia Tornado). Dabei wird grundsätzlich die konventionelle Steuerlogik genutzt, bei der eine bestimmte Position des Steuerorgans mit einer bestimmten Stellung der Steuerflächen korrespondiert. Dieses System lässt sich nicht direkt auf das Sidestick-Steuerkonzept mit seiner Vorgabe von Drehraten übertragen (siehe Abschnitt 2). Außerdem erscheint es wünschenswert, nicht nur die Belastung der Steuerflächen zu berücksichtigen, sondern weitere Parameter hinzuzuziehen.

Deshalb wurde aufbauend auf diesen Überlegungen ein Konzept für ein haptisches Feedback zur Steigerung der Situation Awareness bezüglich einer Flight Envelope für Piloten von Sidestick-gesteuerten Fly-by-Wire-Flugzeugen entwickelt. Dabei wird dem Piloten mittels eines "Active Sidestick" über Widerstände und Auslenkungen intuitiv das Verlassen eines Sollbereichs und die Annäherung an Grenzzustände vermittelt, um so das Bewusstsein um die Position des aktuellen Flugzustandes relativ zu diesen Grenzen zu steigern. So können die Sicherheitsvorteile der Flight Envelope Protection mit den Vorteilen eines haptischen Feedback hinsichtlich der Steigerung der Situation Awareness kombiniert werden; dabei bleibt die Sidestick-Steuerlogik der Vorgabe von Drehraten anstatt Ausschlägen der Steuerflächen voll erhalten. Darüber hinaus ermöglicht dieses Konzept, die Vorteile einer Flight Envelope Protection zu nutzen und gleichzeitig dem

Piloten mehr Eingriffsmöglichkeiten zu gewähren, da die deutliche Information über die Annäherung an Grenzen die Wahrscheinlichkeit einer versehentlichen oder ungewollt großen Steuereingabe verringert.

Ein Beispiel erläutert die Funktionsweise des haptischen Feedback am besten: Ein Flugzeug fliegt zunächst in einem stabilen Geradeausflug. Jede mäßige Steuereingabe ist ohne Widerstand möglich. Der Pilot befiehlt durch ein kurzes, leichtes Ziehen am Sidestick eine Drehrate um die Nickachse und damit eine Erhöhung des Längsneigungswinkels (engl. Pitch), woraufhin sich auch der Anstellwinkel erhöht, das Flugzeug steigt und bei konstantem Schub an Geschwindigkeit verliert. Wird der Sidestick nun abermals aus der Neutralposition nach hinten bewegt um den Pitch noch weiter zu erhöhen, so widerfährt dem Piloten ein gewisser Widerstand. Dieser Widerstand wächst mit steigendem Anstellwinkel und sinkender Fluggeschwindigkeit, also Annäherung an die Grenzen der Flight Envelope und ist außerdem abhängig vom Betrag der aktuellen Steuereingabe und somit den Grad der weitere Annäherung an die Grenzen. Findet hingegen Gegensteuern, weg ein von Betriebsgrenzen statt, so spürt der Pilot ein ganz leichtes "Mitgehen" des Sidestick. BILD 1 skizziert das Prinzip anhand des Beispiels eines Steigflugmanövers bei konstantem Schub.

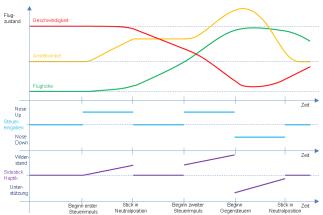


BILD 1. Skizzierte Darstellung deshaptischen Feedback am Beispiel eines Steigmanövers ohne Schubänderung.

Das haptische Feedback schafft also "weiche Grenzen", da der Widerstand mit zunehmender Abweichung eines Parameters vom Idealwert kontinuierlich anwächst.

Dieses Konzept geht damit über bisherige Ansätze zur Vermittlung eines haptischen Feedback bei Fly-by-Wire-Flugzeugen hinaus: Anstatt nur die aerodynamischen Belastungen zu ermitteln und an den Piloten in Form von Widerstandskräften und Auslenkungen weiterzuleiten, wird dem Piloten auf Grundlage der umfangreichen Berechnungen der Flight Envelope Protection ein Bewusstsein für die Annäherung an gefährliche Flugzustände vermittelt. Je stärker sich das Flugzeug einer Grenze der Flight Envelope annähert, desto stärker das haptische Feedback in Form Widerstandskräften in Erscheinung, selbst wenn diese Grenzannäherung nicht mit erhöhten aerodynamischen Belastungen einhergeht. Subjektiv empfunden "wehrt" sich das Flugzeug gegen die Steuereingaben. Dabei sind die maximalen Widerstandskräfte so zu wählen, dass sie sehr deutliche körperliche Anstrengung vom Piloten verlangen und damit auch bei großer Anspannung und Ablenkung bemerkt werden, aber trotzdem grundsätzlich überwindbar

©2018 3

sind.¹ Der Pilot kann sich damit (u. U. auch nur in weiter gefassten Grenzen) über die vom haptischen Feedback vermittelten Vorgaben der *Flight Envelope Protection* hinwegsetzen. So können Situationen entschärft werden, in denen die Begrenzungen notwendige Manöver unterbinden.

Das haptische Feedback soll gegenüber einer konventionellen *Flight Envelope Protection* folgende Vorteile bieten:

- Es wächst kontinuierlich und kann deshalb schon viel früher einsetzen. Damit soll es nicht nur über eine höhere Situation Awareness zur Vermeidung von gefährlichen Flugzuständen beitragen, [16] sondern auch die Einhaltung von Idealzuständen unterstützen (z. B. aus Gründen des Passagierkomforts, der Treibstoffersparnis oder des Lärmschutzes).
- Es soll eine höhere Schutzwirkung als die heutige Flight Envelope Protection bei gleichzeitig größerer Handlungsfreiheit des Piloten ermöglichen.

Das vorgestellte haptische Feedback ist kein Warnsystem an sich. Typische Warnsysteme alarmieren über einen bestimmten Reiz, beispielsweise Warnleuchte, Warnton oder Schütteln des *Stickshaker* und geben überwiegend eine eindimensionale und diskrete Handlungs-empfehlung vor, z. B. Ausruf "*Pull Up!*". [12]

Das in dieser Arbeit evaluierte System hingegen soll bei einer bemerkten Abweichung nicht primär alarmieren. Stattdessen gibt es über Größe und Richtung der dargestellten Kräfte eine implizite Handlungsanweisung an den Benutzer, idealerweise bereits lange bevor ein kritischer Wert erreicht und damit sofortiges Handeln notwendig wird. Diese Handlungsanweisung informiert den Piloten auf zwei Ebenen: Der Pilot bekommt über den Widerstand einen Denkanstoß, sein Handeln zu hinterfragen, da er es aus dem operativen Normalbetrieb gewohnt ist, dass die Steuereingaben nur geringe Kraftanstrengung erfordern. Ferner bekommt er eine Richtung für einen das Flugzeug von den Grenzen entfernenden Steuerimpuls vorgeschlagen. Vorschlag keinesfalls als zwingende ist Handlungsanweisung zu verstehen sondern nur als Hinweis, dass sich das Flugzeug in der Nähe einer Grenze befindet. Es kann je nach Situation durchaus möglich sein, dass die Umstände das Einnehmen eines Flugzustands in der Nähe einer Grenze verlangen, z. B. kann im Rahmen eines Abfangmanövers die Annäherung an die Maximalbelastung bezüglich des Lastvielfachen notwendig sein. Hierhin gleicht es konventionell gesteuerten Flugzeugen, bei denen ebenfalls bestimmten Situationen größere Steuerkräfte aufgebracht werden müssen.

Das haptische Feedback soll daher bestehende Warnsysteme nicht ersetzen, sondern ergänzen, um folgende Ziele zu erreichen:

- Freiräume zur Wahrnehmung von Warnungen schaffen, da für viele Aufgaben und Abgleiche (z. B. im Landeanflug) weniger Input über den visuellen Kanal benötigt wird.
- Im Sinne der Vermeidung einer Reizüberflutung [12] Zustände vermeiden, in denen visuelle oder akustische Warnungen erfolgen. Dies trägt dazu bei,

- andere Warnungen besser wahrzunehmen und vermindert das Stressniveau.
- Zusätzliche Handlungshinweise in kritischen Situationen bieten, wenn unter Umständen wegen einer Vielzahl Warnungen Unklarheit über notwendige Manöver herrscht.
- Den Piloten bereits im Vorfeld eine höhere Situation Awareness vermitteln, indem er sich besser über seine aktuelle Position innerhalb der Flight Envelope bewusst ist.

Im Sinne der Forderungen der FAA kann haptisches Feedback darüber hinaus auch dazu beitragen, langfristig durch instinktives Verhalten fliegerische Grundfähigkeiten zu trainieren. [17]

Im Folgenden wird eine experimentelle Studie zur Evaluierung des vorgestellten Grundkonzepts eines haptischen Feedback zur Steigerung der Situation Awareness bezüglich der Grenzen der Flight Envelope beschrieben.

4. DESIGN DER EMPIRISCHEN STUDIE

Um das vorgestellte Konzept im Rahmen einer experimentellen Simulatorstudie zu evaluieren, wurde eine Simulationsumgebung geschaffen. Die Simulation erfolgte auf Grundlage des *Microsoft Flight Simulator X*, welcher über die Schnittstelle *SimConnect* alle benötigten Parameter zur Verfügung stellt. Als haptisches Ein- und Ausgabeinstrument wurde ein Force-Feedback-Joystick gewählt. Die Berechnung und Ausgabe des Feedback erfolgte mittels einer eigens programmierten Applikation; BILD 2 zeigt schematisch den Versuchsaufbau.

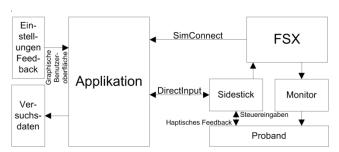


BILD 2. Prinzipskizze der Testumgebung.

Diese Applikation konnte zwei Arten von haptischem Feedback ausgeben, sobald ein Parameter vom Sollwert weiter als einen definierten Toleranzbetrag abwich. Die beiden Modi konnten vom Versuchsleiter separat angewählt werden und wurde jeweils für einen vollständigen Szenariodurchlauf genutzt (s.u.).

Beim Passiven Haptischen Feedback (PHF) wird dem Probanden wie im vorherigen Kapitel beschrieben ein Widerstand präsentiert, wenn er mit einer Auslenkung des Sidestick eine Steuereingabe tätigt, die das Flugzeug noch näher an eine Grenze der Flight Envelope bringt, der es sich bereits angenähert hat. Wenn keine Steuereingabe erfolgt, wird auch kein haptisches Feedback ausgegeben.

Beim Aktiven Haptischen Feedback (AHF) hingegen erfolgt zusätzlich auch eine Auslenkung des Sidestick in Richtung einer Steuereingabe, die das Flugzeug von den Grenzen der Flight Envelope entfernt. Dies bedeutet, dass der Pilot eine Kraft aufwenden muss, um den Sidestick neutral zu halten, sobald sich das Flugzeug einer Grenze annähert. Bei Annäherung an eine Grenze erfolgt also auch dann eine Rückmeldung an den Piloten, wenn dieser

©2018

¹ Idealerweise gibt es mehrere Stufen für die maximale Stärke des Feedbacks, so dass zu Beginn des Fluges die Stärke an die Körperkraft des Piloten angepasst werden kann, ähnlich wie die Pilotensitze vom Piloten justiert werden können.

keine Steuereingabe tätigen möchte. BILD 3 verdeutlicht die Wirkungsweise von passivem und aktivem haptischem Feedback am Sidestick.

Die Fragestellung, ob und inwiefern haptisches Feedback Piloten bei der Flugführung unterstützen kann, gehört in Forschungsbereich der Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) und liegt in der Schnittmenge von ingenieurs-wissenschaftlicher, medizinischer psychologischer Forschung. Die Evaluierung von Konzepten aus dem Bereich der MMS hält besondere Herausforderungen bereit, die mit herkömmlichen Messmethoden aus dem Ingenieursbereich nicht zu meistern sind. [5] Darum wurde bei der Gestaltung, Durchführung und Auswertung der Studie zum Teil auf psychologische Methoden zurückgegriffen.

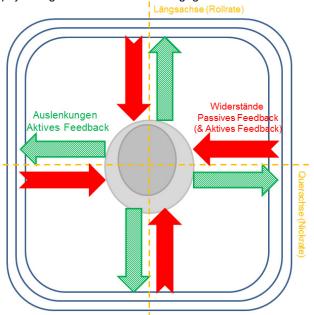


BILD 3. Wirkungsweisen Aktives und Passives Haptisches Feedback (Aufsicht auf Sidestick von oben).

Im Rahmen dieser Studie sollte grundsätzlich untersucht werden, ob ein haptisches Feedback in der entworfenen Form die Situation Awareness von Piloten erhöhen und sie damit bei der Flugführung unterstützen kann. Die konkrete Fragestellung wurde dafür im hier präsentierten ersten Schritt darauf fokussiert, ob sich das haptische Feedback positiv auf die Einhaltung einer Envelope auswirkt.

Bei dieser Untersuchung stellte die Abweichung von der Envelope die zu untersuchende abhängige Variable (AV) dar, während die Form des haptischen Feedback bzw. sein Fehlen die unabhängige Variable (UV) markierte. Daneben gab es zahlreiche Störvariablen (wie beispielsweise Flugerfahrung, Alter, Lern-, Positions- und Ermüdungseffekte, etc.), die auszuschalten oder zu kontrollieren waren, um ihren Einfluss auf das Ergebnis zu minimieren.

Die entsprechenden Überlegungen führten zu folgendem Design der Versuchsdurchführung: Die Probanden wurden gemäß ihrer Flugerfahrung einer von drei Gruppen zugeordnet (Flugunerfahrene, Flugerfahrene, Berufspiloten), jeder Proband erhielt ein Briefing und absolvierte einen Übungsflug, um ein grundsätzliches Verständnis zu entwickeln. Dabei wurde er zunächst mit der Simulation an sich und anschließend mit dem haptischen Feedback vertraut gemacht.

Nachdem der Versuchsleiter sichergestellt hatte, dass der

Proband über das zur Bewältigung des Testszenarios notwendige fliegerische Können verfügte, erfolgte ein weiteres Briefing zur Einweisung in das Testszenario. Dieses unterschied sich bewusst vom Übungsszenario, um zu vermeiden, dass Probanden mit großem Übungsbedarf besser mit dem Testszenario vertraut waren als andere Probanden. Jeder Proband absolvierte drei Szenariodurchläufe des Testszenarios, jeweils einmal ohne haptisches Feedback sowie mit je einmal mit dem Passiven und dem Aktiven Haptischen Feedback. Um Positionseffekte zu kontrollieren, wurde die Reihenfolge von Proband zu Proband dabei mit der Methode der lateinischen Quadrate variiert. [18] Nach iedem Szenariodurchlauf wurden die Probanden gebeten, ihre subjektiven Eindrücke bezüglich des Durchlaufs in einem Fragebogen wiederzugeben; nach dem Szenariodurchlauf wurde ferner um einen übergreifenden Vergleich aller Szenariodurchläufe gebeten.



BILD 4. Simulatorbild zum Zeitpunkt des Durchstartens.

Bei der Wahl des Testszenarios galt es einen Kompromiss zu finden, der einerseits auch für die Berufspiloten anspruchsvoll ist ohne andererseits die fliegerischen Laien zu überfordern. Die Wahl fiel auf die Durchführung eines Durchstartmanövers im Endanflug auf die Piste 26 des Flughafens Innsbruck (BILD 4). Ein zunächst automatisierter Anflug sollte an einer bestimmten Stelle mit einem Durchstartmanöver abgebrochen werden; dieses Manöver beginnt mit dem Ausschalten des Autopiloten und dem Einnehmen der Konfiguration für den Steigflug. Anschließend muss parallel zum Hochlaufen der Triebwerke auf maximalen Schub (engl. Take-Off and Go. Around, TOGA) die Geschwindigkeit durch Pitch-Manöver auf einen Soll-Wert eingeregelt und dort gehalten werden. An einem bestimmten Punkt muss der Steuerkurs in einer Linkskurve mit 30° Rollwinkel von ca. 255° auf 60° werden; in diesem Teil geändert besteht die Herausforderung darin, den Rollwinkel möglichst präzise einzuregeln und gleichzeitig die Geschwindigkeit auf dem Soll-Wert zu belassen.

Dieses Szenario eignet sich aus folgenden Gründen gut für die Untersuchung der Auswirkung von haptischem Feedback auf das Bewusstsein der Piloten um die Grenzen einer *Flight Envelope*:

Es ist praxisnah und nicht konstruiert.

5

- Es bietet die Möglichkeit, für eine Reihe von Parametern in beiden Achsen "alltagsnahe" Oberund Untergrenzen zu definieren und deren Einhaltung zu beobachten.
- Es gibt Phasen mit sich zum Teil stark verändernder Konfiguration des Flugzeuges (stark ansteigender

©2018

Schub und Wegfall des Fahrwerkswiderstandes zu Beginn des Durchstartmanövers, Erhöhung des Rollwinkels zu Beginn des Kurvenflugs) und Phasen mit nahezu unverändertem Verhalten des Flugzeugs (Steigflug nach Anliegen von TOGA bis zum Einleiten der Kurve, weiterer Steig- und Kurvenflug nach Erreichen des Soll-Rollwinkels).

- Es gibt sehr detaillierte Unterlagen zur Einweisung der Probanden in die Aufgabe.
- Der zunächst automatische Anflug bietet den Probanden die Möglichkeit einer kurzen mentalen Einstimmung.
- Die zeitliche Länge des Gesamtmanövers (Anflug und Durchstarten bis zum Erreichen der Sicherheitshöhe) von etwa vier Minuten ist ausreichend lang, um einen Eindruck von der Varianz der Parametereinhaltung zu bekommen, aber hinreichend kurz, um mehrere Durchläufe pro Proband zu ermöglichen, ohne den benötigten Zeitaufwand zu sehr zu erhöhen.

Für die spätere quantitative Auswertung wurden insgesamt 30 verschiedene Messwerte mit einer Datenrate von 5 Hz aufgezeichnet.

5. AUSWERTUNG UND ANALYSE

Für die Analyse wurden Parameterverläufe graphisch dargestellt und verschiedene Kennwerte betrachtet. Relevant waren hier vor allem die durchschnittliche Summe der Abweichungen vom vorgegebenen Soll-Wert, Summe durchschnittliche die der quadrierten durchschnittliche Abweichungen. die Standardabweichung, der durchschnittliche Parameterwert (jeweils Durchschnitte der Einzelwerte aller Szenariodurchläufe einer betrachteten Teilgruppe, s.u.) sowie die Gesamt-Standardabweichung über alle Szenariodurchläufe einer betrachteten Teilgruppe.

Die Analyse erfolgte zunächst getrennt nach den Auswirkungen des haptischen Feedback auf die Einhaltung des Soll-Werts bezüglich der Geschwindigkeit und des Rollwinkels sowie die Einnahme des idealen Anstellwinkels (der Anstellwinkel, der bei unter der gegebenen Konfiguration zur vorgegebenen Fluggeschwindigkeit führt; kein direkter Regelparameter). Ferner wurde in der Analyse zwischen den drei Probandengruppen sowie dem ersten Segment (gerade Steigflug) und dem zweiten Segment (Kurvensteigflug) unterschieden.

5.1. Geschwindigkeit

Das haptische Feedback hat über alle Probanden betrachtet in beiden Varianten zu einer deutlich besseren Einhaltung der Soll-Geschwindigkeit im Vergleich zu den Szenariodurchläufen ohne Feedback geführt (siehe BILD 5). Es trug dazu bei, dass die Probanden im Übergang zum Steigflug schneller den richtigen Nickwinkel einregelten, um die Sollgeschwindigkeit zu erreichen und zu halten. Im Kurvenflugsegment sorgte insbesondere das aktive haptische Feedback dafür, dass die Probanden trotz der hinzukommenden neuen Aufgabe (Einreaeluna Rollwinkel) Abweichungen Geschwindigkeit infolge eines falschen Anstellwinkels schneller bemerkten und effektiver korrigierten. Die getrennte Betrachtung der drei Probandengruppen zeigte, dass vor allem die Probanden ohne Flugerfahrung vom haptischen Feedback profitierten, während Unterstützungseffekt bei den Berufspiloten wesentlich schwächer ausfiel. Dies konnte unter Berücksichtigung der

Antworten auf den Fragebögen unter anderem darauf zurückgeführt werden, dass die Berufspiloten bereits ohne Unterstützung des Feedback die Geschwindigkeit weitgehend innerhalb des Toleranzbereichs geführt haben.

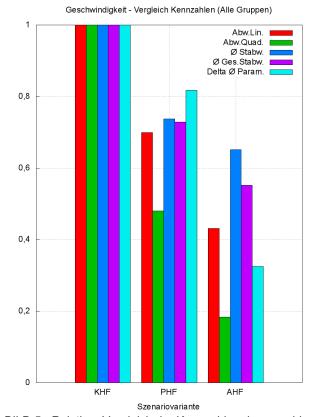


BILD 5. Relativer Vergleich der Kennzahlen der verschiedenen Szenariovarianten über alle Probandengruppen (KHF=Kein hapt. Feedb., PHF=Passives Hapt. Feedb., AHF=Aktives Hapt. Feedb.).

5.2. Rollwinkel

Bei der Einregelung des Rollwinkels hat das haptische Feedback in beiden Varianten über alle Probanden kumuliert die Abweichungen vom Soll-Wert etwas weniger stark verringert, verglichen mit der Unterstützung bezüglich der Geschwindigkeit. Allerdings wirkte sich vor allem das aktive haptische Feedback über alle Probandengruppen ähnlich positiv aus; auch bei den Berufspiloten verringerten sich die Abweichungen vom Soll-Wert deutlich. Das haptische Feedback setze bezogen auf den Rollwinkel bereits bei einer wesentlich geringeren Abweichung vom Soll-Wert ein, der deutlich geringer ist als die typischen Abweichungen Berufspiloten vom Soll-Wert des Rollwinkels Szenariodurchlauf ohne Feedbackunterstützung. Gegensatz zur Situation bei der Geschwindigkeit konnte das haptische Feedback deshalb in Erscheinung treten und den Berufspiloten eine Rückmeldung über ihr Verlassen der Soll-Envelope geben, so dass entsprechend gegensteuern konnten.

5.3. Anstellwinkel

6

Die Einstellung eines bestimmten Anstellwinkels war keine explizite Aufgabe der Probanden. Da aber das haptische Feedback in der Querachse (Nicken) auch bei Über- oder Unterschreiten einer Soll-Envelope aktiv wurde, wurden auch die Auswirkungen des haptischen Feedback auf die

©2018

Einhaltung eines idealen Anstellwinkels, der sich bei TOGA-Schub und Soll-Geschwindigkeit einstellt, untersucht.

Bei den flugunerfahrenen Probanden und den Lizenzinhabern, die keine Berufspiloten waren, wurde der ideale Anstellwinkel bei den Flügen mit Unterstützung des haptischen Feedback deutlich schneller erreicht und präziser eingehalten, die Ausreißer waren geringer und wurden schneller zurückgeführt.

Dabei führte interessanterweise entgegen den vorherigen Betrachtungen das Passive Feedback zu einer stärkeren das Feedback. Verbesserung als Aktive Detailbetrachtung zeigt, dass dies auf eine Vielzahl an Steuereingaben die kleineren um Querachsen zurückzuführen ist, die dazu dienten, die Geschwindigkeit einzuregeln. Das Aktive Feedback führte dazu, dass Probanden Abweichungen in der Geschwindigkeit schneller korrigierten, dabei entstanden aber stärkere Schwankungen im Anstellwinkel. Es gibt also einen Zielkonflikt zwischen einer schnellen Reaktion auf Geschwindigkeitsabweichungen und einer präzisen Einhaltungen des idealen Anstellwinkels. Dieser Zielkonflikt ist aber nicht sehr stark ausgeprägt, denn das aktive Feedback konnte die Abweichungen in beiden Bereichen verringern.

5.4. Gemeinsame Güte-Kennzahl

Im nächsten Schritt wurde eine einheitliche Kennzahl für den Vergleich der Güte der Parametereinhaltung eines Szenariodurchlaufs erstellt. Diese Kennzahl umfasst die Summe der Abweichungen und die Summe der Quadrate der Abweichungen der Regelgrößen (Geschwindigkeit und Rollwinkel). Die Gewichtung der beiden Kennwerte einer Regelgröße untereinander erfolgte dabei so, dass sie über alle Flüge betrachtet denselben Einfluss auf das Ergebnis haben, die Dimensionen untereinander wurden wiederum auf Grundlage fliegerischer Kriterien gewichtet.

Aufbauend auf dieser Kennzahl erhielt der jeweils beste Szenariodurchlauf eines Probanden 3 Punkte, der schlechteste (größte Abweichungen) 1 Punkt und der dazwischenliegend 2 Punkte. Dies ermöglicht unabhängig vom fliegerischen Können des jeweiligen Probanden eine relative Aussage bezüglich der Güte des jeweiligen Szenariodurchlaufs zu treffen.

TAB 1 zeigt die resultierenden durchschnittlichen Punktzahlen der verschiedenen Szenariovarianten; auffällig ist dabei, dass unabhängig von der Gewichtung untereinander die Auswertung jedes Kennwerts für sich zum selben Ergebnis führt: Das aktive haptische Feedback führt über alle Probanden zu den geringsten Abweichungen, während die Szenariovariante ohne Feedback zu den größten Abweichungen führt.

Kennzahl/ Variante	Kein Feedb.	Passives Feedb.	Aktives Feedb.
Geschw. linear	1,6	2,0	2,4
Geschw. quadrat.	1,6	2,1	2,3
Rollwinkel linear	1,7	1,8	2,5
Rollwinkel quadrat.	1,8	1,9	2,3
Gesamtkennzahl mit Gewichtung	1,5	2,0	2,6

TAB 1. Punktezahlen der verschiedenen Szenariovarianten aus den Rankings bezüglich der Kennzahlen.

5.5. Vergleich und Kritik

Die Studie konnte detailliert nachweisen, dass das vorgestellte Konzept die Einhaltung von *Envelope*-Grenzen statistisch signifikant verbessert. Die Probanden

verfügen bei Einsatz des haptischen Feedback über ein besseres Lagebild bezüglich der Position ihres Flugzustandes relativ zu den Grenzen der definierten Flight Envelope. Für eine effektive Unterstützung ist dabei die genaue Auslegung des Feedback hinsichtlich Toleranzschwelle, Stärke und Verlauf entscheidend. Die unterstützende Wirkung des haptischen Feedback wurde von den Aussagen der Probanden in den Fragebögen bestätigt.

Es zeigten sich allerdings großer Unterschiede zwischen den verschiedenen Probandengruppen und Dimensionen des Feedback. Generell haben die flugerfahrenen Probanden vor allem vom Feedback in der Querachse nur gering oder überhaupt nicht profitiert. Im Vergleich mit den positiven Auswirkungen des Feedback bezüglich der Längsachse sowie den subjektiven Rückmeldungen aus den Probandenfragebögen wurde geschlussfolgert, dass dies hauptsächlich auf die genaue Gestaltung der Grenzen, ab denen das Feedback aktiv wird, zurückzuführen ist. Deshalb sollte bei einer weiteren Untersuchung diesem Aspekt deutlich mehr Gewicht gegeben werden.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Bei den Bemühungen um die Weiterentwicklung der Mensch-Maschine-Schnittstelle im Flugzeugcockpit im Sinne einer Steigerung der Situation Awareness des Piloten ergibt sich das Dilemma, dass bereits heute die Überlastung des menschlichen visuellen und akustischen Informationsaufnahmekanals mitverantwortlich ist für mangelnde Situation Awareness. Deshalb erscheint die Einrichtung weiterer visueller und akustischer Anzeigen zur Übertragung von Hinweisen und Warnungen nicht sinnvoll

Als ein möglicher Ansatz zur Lösung dieses Dilemmas wurde in der vorliegenden Arbeit die Idee aufgegriffen, die Situation Awareness über die Nutzung des haptischen Kanals zu steigern. Dieser Kanal wird in modernen Sidestick-gesteuerten Flugzeugen kaum genutzt. Seine Überwachungsfunktion bezüglich der Einhaltung von Belastungsgrenzen wurde teilweise an ein automatisiertes System ausgelagert, der Flight Envelope Protection. Dieses System erfüllt seine Aufgabe sehr gut und trägt maßgeblich zur Flugsicherheit bei, aber es nimmt dem Piloten auch zumindest teilweise das Bewusstsein für das Erreichen von und den Umgang mit Grenzflugzuständen. Aufbauend auf diesen Überlegungen wurde ein haptisches Feedback entwickelt, das Piloten von Sidestickgesteuerten Flugzeugen eine Rückmeldung über ihre Position relativ zu den Grenzen einer Flight Envelope geben soll, um so ihre Situation Awareness zu steigern. Um die grundsätzliche Machbarkeit dieses Konzepts zu

überprüfen, wurde eine Testumgebung geschaffen und eine Studie entworfen. Ziel dieser Studie war die Überprüfung der Hypothese, dass das entwickelte haptische Feedback zu einer besseren Einhaltung der Grenzen einer *Flight Envelope* führt. Bei der anschließenden Studiendurchführung konnten über 114 Szenariodurchläufe Datensätze von 38 Probanden gewonnen werden, darunter 18 Piloten. Diese Datensätze wurde nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet und diskutiert.

Die Studie konnte nachweisen, dass das haptische Feedback die Einhaltung einer Flight Envelope unterstützen kann Dieses Ergebnis stimmt überein mit den Erkenntnissen ähnlicher experimenteller und empirischer Studien sowie den Überlegungen weiterer

©2018 7

wissenschaftlicher Veröffentlichung aus dem Forschungsbereich der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Die subjektiven Aussagen der Probanden bestätigen diesen Eindruck.

Bei der Detailbetrachtung zeigte sich, dass für eine effektive Unterstützung die genaue Auslegung des Feedback hinsichtlich Toleranzschwelle, Stärke und Verlauf entscheidend ist.

Auch darüber hinaus verbleibt noch sehr viel Forschungsbedarf bis zur Entwicklung eines entsprechenden Systems zur Flugerprobungsreife.

Die Ausweitung des Konzepts auf weitere fliegerische Standard- und Ausnahmesituationen unter der Nutzung weiterer Dimensionen der Flight Envelope sowie einer genaueren Einstellung von Wirkungsweise und Stärke des Feedback versprechen viele interessante Erkenntnisse. sinnvoll wäre die Erprobung in kinästhetischen Full Flight Simulator (FSS), um das haptischem Feedback Zusammenspiel von kinästhetischer Wahrnehmung untersuchen zu können. Dabei könnten neben dem haptischen Feedback bezüglich der Grenzen der Flight Envelope auch die Auswirkungen eines Feedback bezüglich anderer Steuereingaben untersucht werden (siehe beispielsweise [19]).

Nur am Rande angeschnitten wurde bisher der gesamte Komplex der technischen Integration in die elektronische Architektur der Flugführung. Die Berechnung des haptischen Feedback basiert auf der Nutzung der Berechnungen der *Flight Envelope Protection*, bei Ausfall dieser Berechnung soll der Sidestick in die Funktionalität eines herkömmlichen "passiven" Sidesticks zurückfallen. Weiterer Forschungsbedarf besteht hier hinsichtlich folgender Fragestellungen:

- Berechnung des haptischen Feedback und Gestaltung von Schnittstellen zu weiteren Systemen. Die Berechnung könnte mit Hilfe der vorhandenen Flugrechner geschehen oder in einem eigenen Modul.
- Umgang mit Wechsel in ein untergeordnetes Flight Law.
- Umgang mit Fehlfunktionen auf Seiten der bestehenden Elektronik und in der Berechnung des haptischen Feedback (Fragekomplex der Ausfallsicherheit, engl. Fail-Safe). Dabei ist wichtig sicherzustellen, dass der Pilot eine Fehlfunktion erkennen kann und Eingriffsmöglichkeiten erhält.

Im Sinne einer Optimierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle im Flugzeugcockpit bieten sowohl die signifikanten Ergebnisse der Studie als auch die Aussagen der Piloten unter den Probanden Anlass, die Idee der Nutzung von haptischem Feedback zur Steigerung der Situation Awareness bezüglich des aktuellen Flugzustandes weiterzuverfolgen.

Literaturverzeichnis

- [1] United States Federal Aviation Administration (FAA), "Operation Use of Flight Path Management Systems," Washington, D.C., 2013.
- [2] F. Reuzeau und R. Nibbelke, "Flight deck design process," in *Human Factors for Civil Flight Deck Design*, D. Harris, Hrsg., Ashgate, Großbritannien, Ashgate Publishing, 2004, S. 33-54.
- [3] M. R. Endsley und D. G. Jones, Designing for Situation Awareness, Boca Raton, Florida: Taylor &

- Francis Group, 2012.
- [4] C. E. Billings, Human-Centred Aviation Automation: Principles and Guidelines., Moffett Fields, Kalifornien: NASA - Ames Research Center, 1996.
- [5] B. D. Kelly, "Flight deck design and intergration for commercial air transports," in *Human Factors for civil Flight Deck Design*, D. Harris, Hrsg., Aldershot, Großbritannien, Ashgate Publishing, 2004, S. 3-31.
- [6] F. J. J. Schmidt-Skipiol, "Die zunehmende Automatisierung im Cockpit – Chancen und Risiken," Institut für Flugführung (IFF) der TU Braunschweig, Braunschweig, 2013.
- [7] M. R. Endsley, "Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems," *Human Factors*, Bd. 37(1), 03 1995.
- [8] B. A. Guy und D. Ferro, "Using cognitive function analysis to prevent controlled flight into terrain," in Human Factors for Civil Flight Deck Design, D. Harris, Hrsg., Ashgate, Großbritannien, Ashgate Publishing, 2004, S. 55-68.
- [9] M. Gerlach und R. Onken, "CASSY The Electronic Part of a Human-Electronic Crew," in *The Human Electronic Crew - Can We Trust the Team.* Proceedings of the 3rd International Workshop on Human-ComputerTeamwork, Cambridge, Großbritannien, 1995.
- [10] H. Courteney, "Assessing the human hazard," in Human Factors for Civil Fight Deck Design, D. Harris, Hrsg., Ashbury, Großbritannien, Ashbury Publishing, 2004, S. 301-318.
- [11] M. R. Endsley und D. B. Kaber, "Team Situation Awareness for Process Control Safety and Performance," *Process Safety Process*, Bd. 17, Nr. 1, S. 43-48, 1998.
- [12] J. M. Noyes, A. F. Starr und M. L. M. Kazem, "Warning system in civil aircraft," in *Human Factors* for Civil Flight Deck Design, D. Harris, Hrsg., Ashgate, Großbritannien, Ashgate Publishing, 2004, S. 141-156.
- [13] J. C. Gibson and R. A. Hess, Stick and Feel System Design, Neuilly-Sur-Seine: Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD), North Atlantic Treaty Organization (NATO), 1997.
- [14] D. Hanke und C. Herbst, "Active sidestick technology – a means for improving situational awareness," Aerospace Science and Technology, Bd. 3, S. 525-532, November 1999.
- [15] "Untersuchungsbericht der schweren Störung am 01.03.2008 in Hamburg 5X003-0/08", Bundesstelle für Flugunfalluntersuchungen (BFU), Braunschweig, 2010.
- [16] D. Hanke und C. Herbst, "Active sidestick technology – a means for improving situational awareness," *Aerospace Science and Technology*, Bd. 3, S. 525-532, November 1999.
- [17] U. Stüben, "Flugmedizin," Braunschweig, 2010.
- [18] O. Huber, Das psychologische Experiment: Eine Einführung., Bern: Huber, 2009.
- [19] J. W. Hegg, M. P. Smith, L. Yount und J. Todd, "Features of Active Sidestick Controllers," *IEEE AES Systems Magazine*, S. 31-34, 07 1995.

©2018

8