

# STEIGERUNG DER SITUATION AWARENESS BEZÜGLICH STEUERRESERVEN IM LANDEANFLUG SIDESTICK-GESTEUERTER FLUGZEUGE – KOMBINATION VERSCHIEDENER SINNESREIZE

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

## Zusammenfassung

Für einen sicheren manuellen Anflug muss der Pilot über eine umfassende Lageeinschätzung (engl. *Situation Awareness*) verfügen. Ein wichtiger Faktor ist dabei das Bewusstsein, inwiefern der Flugpfad noch durch weitere Steuereingaben beeinflussbar ist, bevor eine Steuergrenze erreicht wird und das Flugzeug einer weiteren entsprechenden Steuereingabe nicht mehr nachkommen kann, da der maximale Steuerflächenausschlag erreicht ist, die aerodynamischen Grenzen ausgereizt sind oder Schutzmechanismen (beispielsweise die *Flight Envelope Protection*) einschreiten. Im Rahmen eines neuen Forschungsprojekts möchte das IFF der TU Braunschweig untersuchen, ob über ein geeignetes haptisches Feedback an einem *Active Sidestick* das Bewusstsein von Piloten bezüglich ihrer Steuerreserven im manuellen Landeanflug erhöht werden kann. In der ersten Phase wird mittels einer nutzergesteuerten Betrachtung ein geeignetes Design der Widerstände und Kraftimpulse am Sidestick erstellt. Für ein umfassendes Verständnis wird dabei im Rahmen eines interdisziplinären Ansatzes zunächst der gesamte Weg von Sinnesrezeptoren bis zur Handlung des Piloten hinsichtlich der Intermodalitäten von haptischer und visueller Wahrnehmung untersucht.

## 1. EINLEITUNG

Auch bei modernen hochautomatisierten Verkehrsflugzeugen werden Landeanflüge regelmäßig manuell durchgeführt. Dies ermöglicht eine dichtere Taktung der Landungen als bei Anflügen unter Nutzung von ILS und trainiert die grundlegenden fliegerischen Fähigkeiten der Piloten (engl. *Basic Flying Skills*), die insbesondere bei solchen Anflügen benötigt werden, die wegen ungünstiger Bedingungen (z. B. starker Seitenwinde) oder technischer Probleme nicht automatisiert durchgeführt werden können.

Für einen sicheren manuellen Anflug muss das mentale Modell der Piloten beständig mit Informationen über den aktuellen Flugzustand versorgt werden. Von hoher Bedeutung für die Lageeinschätzung (engl. *Situation Awareness*) als zentralem Faktor der Flugsicherheit ist dabei das Bewusstsein, inwiefern der Flugpfad in eine bestimmte Richtung noch mit weiteren Steuereingaben beeinflusst werden kann, bevor eine Steuergrenze erreicht wird.

Die Steuergrenze bezeichnet hier den Grenzwert in einer bestimmten Steuerdimension (wie Querruder bzw. Rollrate oder Höhenruder bzw. Nickrate), bei der das Flugzeug einer weiteren Steuereingabe nicht mehr nachkommt.

Die Differenz zwischen der aktuellen Steuereingabe und dem Erreichen der Steuergrenzen wird hier als Steuerreserve bezeichnet. Wie Gespräche (u.a. mit Sicherheitspiloten verschiedener Fluggesellschaften) gezeigt haben, treten regelmäßig potentiell gefährliche Situationen auf, in denen sich die Piloten nicht unmittelbar des Erreichens einer Steuergrenze bewusst sind.

An dieser Stelle setzt das vorgestellte Forschungsprojekt an: Es soll ein Konzept erarbeitet werden, wie dem Piloten mit Hilfe eines haptischen Feedback in Form von Kräften und Widerständen an einem *Active Sidestick* Informationen

über seine verbleibenden Steuerreserven bzw. seine Annäherung an Steuergrenzen gegeben werden können, um so die *Situation Awareness* von Piloten bezüglich ihrer Steuerreserven im manuellen Landeanflug zu steigern.

Dabei werden folgende Ziele verfolgt:

- Steigerung der Situation Awareness bezüglich der Annäherung an Steuergrenzen.
- Steigerung der allgemeinen Situation Awareness dank Entlastung der visuellen und auditiven Informationskanäle.
- Geringer Trainingsaufwand dank möglichst intuitiver Ausgestaltung (u. A. ...).
- Beibehaltung des bisher üblichen Steuerkonzepts bei Sidestick-gesteuerten Fly-by-Wire-Flugzeugen (Vorgabe von Rollraten).

Die Nutzung des haptischen Sinns erscheint zum Erreichen dieser Ziele sehr geeignet, da der haptische Sinn die Möglichkeit bietet, den Piloten sehr intuitiv und ohne Überlastung der bereits hoch belasteten visuellen und auditiven Sinneskanäle mit Informationen zu versorgen. Dies konnte sowohl in unserem Institut, [1] als auch von anderer Seite (z.B. [2], [3], [4]), am Simulator demonstriert und/oder empirisch nachgewiesen werden.

Der haptische Sinn ist insofern besonders, als dass er als einziger Sinn nicht nur einen Informationseingangskanal zum Gehirn darstellt, sondern dieselben Organe auch für die Manipulation der Umwelt, also als Ausgabeorgan, wirken. [5] Diese Funktionseinheit von Sinnesaufnahme und Ausgabe des entsprechenden Steuerbefehls ermöglicht wegen der entsprechenden engen Verknüpfung im Gehirn sehr schnelle Reaktionen, die nach kurzem Training weitgehend unabhängig von den übrigen Prozessen der Sinnesreizverarbeitung stattfinden, so dass mehr mentale Reserve für andere Aufgaben zu Verfügung stehen. [6] Da die über den haptischen Kanal aufgenommenen Informationen aber trotzdem zur beständigen Stützung und

Validierung insbesondere des visuellen Sinneskanals in die Lagebilderstellung einfließen (siehe unten), sollte die *Out-of-the-Loop*-Problematik mit ihren negativen Implikationen für das Erlangen von *Situation Awareness* dabei vermieden werden können. [7]

## 2. SITUATION AWARENESS UND DAS MENTALE MODELL

*Situation Awareness* beschreibt im Kontext der Flugsicherheit die „Wahrnehmung von Umgebungselementen innerhalb eines Raum-Zeit-Bereichs, das Erfassen ihrer Bedeutung und die Projektion ihres Zustandes in der nahen Zukunft“ [8], also ein umfassendes mentales Lagebild. Dieses Lagebild ist die Grundlage für das Treffen richtiger Entscheidungen und ein Schlüsselaspekt für die Flugsicherheit, [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).

Dieses Bewusstsein um die aktuelle Situation erfordert zum einen ein umfassendes generelles Verständnis für das jeweilige System an sich sowie zum anderen die Kenntnis des aktuellen Systemzustands. In beiden Aspekten spielt Training eine zentrale Rolle:

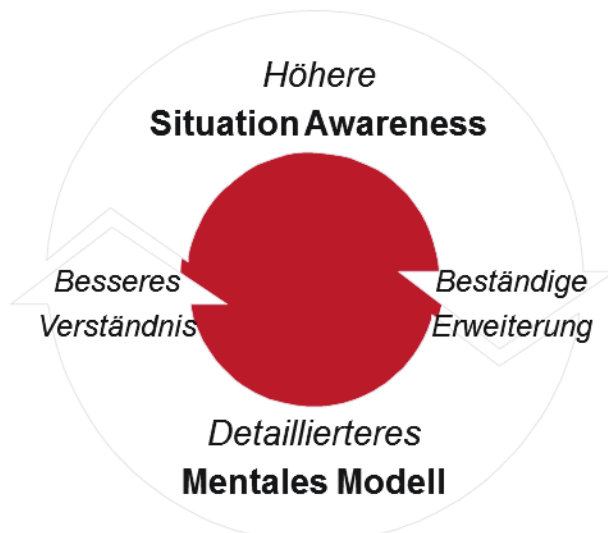


BILD 1. Gegenseitige Verstärkungswirkung höhere *Situation Awareness* und eines detaillierteren mentalen Modell.

Über das Training (beispielsweise in der fliegerischen Ausbildung oder bei späteren Schulungen) werden mentale Modelle im Kopf des Piloten angelegt, die das Verständnis für das jeweilige System (technisch und/oder physikalisch) abbilden. Diese zunächst nur sehr einfachen Modelle werden im weiteren Verlauf beständig mit der über Sinneseindrücke wahrgenommenen „Wirklichkeit“ verglichen und entsprechend angepasst und verfeinert.

Hier kommt der zweite Aspekt ins Spiel: Ein besseres Wissen des Piloten über den aktuellen Systemzustand nutzt über eine erhöhte *Situation Awareness* nicht nur im gegebenen Augenblick; je stärker sich der Pilot seines aktuellen Flugzustands bewusst ist, desto umfangreicher

und präziser kann er die entsprechenden mentalen Modelle ausbauen (siehe auch BILD 1). Diese präziseren mentalen Modelle wiederum ermöglichen nicht nur ein noch besseres Verständnis ähnlicher zukünftiger Situationen, sondern erweitern auch die Bandbreite an Lösungen, die für seltene oder exotische Situationen generell gefunden werden können.

Dieser Vorgang geschieht oft implizit, explizite Hinweise oder Überlegungen bieten aber ein wichtiges Grundverständnis und können die Aufmerksamkeit auf bestimmte Bereiche lenken (Hinweisfunktion). [Quelle]

## 3. NUTZERGESTEUERTER ANSATZ FÜR SYSTEMDESIGN – KOMBINIERTER NUTZUNG VON SINNESKANÄLEN

Die Anwendung eines nutzergesteuerten Ansatzes beim Design der Mensch-Maschine-Schnittstelle verspricht große Vorteile in den Bereichen Flugsicherheit und Effizienz. [9] Insbesondere die Steigerung der *Situation Awareness* ist dabei ein zentrales Thema, denn mangelnde *Situation Awareness* spielt bei 88% aller Unfälle in der Verkehrsflughafen eine wichtige Rolle. [10]

Der Mensch nutzt für die Erstellung seines Lagebilds grundsätzlich eine Vielzahl an Sinneseindrücken aus unterschiedlichen Sinneskanälen. Die Nutzung verschiedener Sinneskanäle führt dabei zu einer höheren Wahrnehmungsgeschwindigkeit, präziserer Erfassung und Einschätzung der Situation und verringert die Gefahr von Sinnestäuschungen. [11] [12]

Verschiedene Sinneseindrücke können sich gegenseitig

- ergänzen,
- bestätigen,
- oder im Widerspruch zueinander stehen.

Im Fall des Fliegens sind folgende Beispiele denkbar: Die Anzeige „Feuer im Triebwerk“ ergänzt den wahrgenommenen Brandgeruch (um die Information, was gerade brennt); die beim nahenden Strömungsabriss (engl. *Stall*) für ein bestimmtes Flugzeugmuster typische Vibration des Flugzeugs bestätigt eine entsprechende visuelle und/oder akustische Warnung.

Bei sich widersprechenden Informationen muss unterschieden werden zwischen Informationen, welche sich nur quantitativ unterscheiden, und solchen, die sich qualitativ grundsätzlich widerstreitende Aussagen machen:

- Im ersten Fall wird beispielsweise dieselbe Dimension eines Umweltzustands beschrieben; beispielsweise ist das Flugzeug gemäß der akustischen Warnung bereits sehr nahe am Stall, aber die typischen Vibrationen sind noch schwach – hier ist die kritische Dimension unstrittig (Anstellwinkel bzw. Differenz bis Erreichen von  $\alpha_{max}$ , engl. *Stall Margin*), nur die Größe der Sicherheitsmarge bis zum tatsächlichen Erreichen des Strömungsabrisse ist unklar.
- Den zweiten Fall beschreibt etwa das Beispiel, dass trotz der Wahrnehmung des Absinkens der Flugzeugnase (Verringerung des Anstellwinkels) plötzlich eine akustische Stall-Warnung ertönt, die suggeriert, das Flugzeug sei erst jetzt im Stall, und der Eindruck entsteht, das (fliegerisch richtige)

Absenken der Flugzeugnase habe das Flugzeug erst in Gefahr gebracht.

### 3.1. QUANTITATIVER KOMPROMISS

Im Fall sich nur quantitativ unterscheidender Informationen ist das menschliche Gehirn in der Lage, die Informationen auf mathematisch nahezu ideale Art zur Bestimmung des wahrscheinlichsten tatsächlichen Werts zu interpretieren. [13]

Dabei wird in einem ersten Schritt ermittelt, inwiefern die verschiedenen Sinneskanäle relativ zueinander gewichtet werden sollten. Die geschieht in Abhängigkeit davon, als wie vertrauenswürdig ihr jeweiliger Sinneseindruck vom Gehirn bewertet wird. Dieser Grad der Vertrauenswürdigkeit hängt beim visuellen Sinn beispielsweise von den Lichtverhältnissen und weiteren Umgebungsbedingungen (beispielsweise Sicht) ab. Mit Hilfe dieser Gewichtung werden die normalverteilten Einschätzungen des Wertebereichs der gesuchten Größen beider Sinne zu einem gemeinsamen normalverteilten Wertebereich kombiniert.

Im Experiment sollten Probanden unter Nutzung des visuellen und des haptischen Kanals die Größe eines Gegenstands abschätzen. Im ersten Durchlauf stimmten die über beide Kanäle präsentierten Werte überein, wie es bei der Betrachtung eines Gegenstands gewöhnlicher Weise zu erwarten ist. Übereinstimmend mit den Erkenntnissen anderer Quellen (siehe oben) konnten Probanden bei Nutzung beider Sinneskanäle eine schnellere und präzisere Aussage zur Größe des Objekts machen.

In einem zweiten Durchlauf wurde den Probanden ohne ihr Wissen mit Hilfe einer Halbspiegelkonstruktion ein visueller Größeneindruck vermittelt, der nicht mit der von den Probanden zu ertastenden Größe übereinstimmte, sondern leicht (Größenordnung 10 %) davon abwich. Wenn die Probanden die Größe des Objekts angeben sollten, wählten sie einen Wert zwischen der visuell und der haptisch dargestellten Größe; bei guten visuellen Bedingungen war dieser Wert näher an der visuell präsentierten Größe. Je stärker allerdings die Sicht herabgesetzt wurde, desto weiter bewegte sich der Schätzwert in Richtung der haptisch präsentierten Information. Die Probanden verließen sich also zunehmend auf ihren Tastsinn. Das Gehirn schätzt offensichtlich ab, inwiefern es die über einen bestimmten Sinneskanal aufgenommenen Informationen als zuverlässig einstuft im Vergleich zu entsprechenden Informationen, die über einen anderen Sinneskanal bezüglich desselben Umweltzustands verfügbar. Auf Grundlage dieser Einschätzung erfolgt wiederum die Gewichtung von visueller und haptischer Wahrnehmung im Gesamtbild. [13]

### 3.2. QUALITATIVE ÜBERPRÜFUNG

Das haptische Empfinden kann als eine Art „Eichwert“ wirken, mit dessen Hilfe widersprüchliche Informationen anderer Sinne zu einem sinnvollen Gesamtbild kombiniert werden. [14]

Beispielsweise lässt sich mit Hilfe eines Necker-Würfels untersuchen, inwiefern ein haptisches Empfinden die Interpretation eines mehrdeutigen visuellen Eindrucks beeinflusst. Das Gittermuster eines Necker-Würfels erlaubt

verschiedene Interpretationen des zweidimensionalen Netzhautabbaus als dreidimensionales Objekt. Das Gehirn bevorzugt bestimmte Interpretationen, kann aber auch zwischen verschiedenen Interpretationen hin- und herwechseln. Dieses Problem der Mehrdeutigkeit eines visuellen Sinneseindrucks tritt nicht nur bei einfachen Strichzeichnungen auf (die in der Tat nur zweidimensional sind und verschiedene Interpretationen mit derselben Berechtigung zulassen), sondern auch, wenn ein tatsächlich dreidimensionaler Gitterwürfel betrachtet wird, insbesondere bei eingeschränkten Sichtbedingungen.

In einer Studie von Bruno et al. beobachteten Probanden mit nur einem Auge (Ausschluss stereoskopischen Sehens) einen tatsächlich als dreidimensionale Struktur vorliegenden Necker-Würfel vor einem bewusst kontrastlos gewählten Hintergrund und in einer möglichst schattenlosen Beleuchtungssituation. Die Probanden kannten die tatsächliche Beschaffenheit der Struktur als Würfel. Trotzdem nahmen sie diese im Durchschnitt ca. alle 7 Sekunden als „Pyramidenstumpf“ wahr. Diese Rate an unwillkürlichen Fehlinterpretationen reduzierte sich etwas, wenn die Probanden den Würfel mit einer Hand anfassen konnten.

Ein sehr viel stärkerer Rückgang war aber zu verzeichnen, wenn die Probanden ihre Hand entlang des Würfels bewegen durften, so dass sie einen detaillierten und sich beständigen erneuernden haptischen Eindruck erhielten. Offensichtlich existiert eine Rückkopplung zwischen dem haptischen Sinn und dem visuellen Sinn, so dass haptische Eindrücke die Interpretation visueller Sinnesreize beeinflussen. Darüber hinaus scheint diese Rückkopplung umso stärker zu sein, je detaillierter und damit valider der haptische Eindruck erscheint. Allerdings verblasst der den visuellen Sinneseindruck stabilisierende Effekt schnell nach dem Ausbleiben des haptischen Reizes - nur ein beständiger starker haptischer Reiz (in diesem Fall der aus der Bewegung der Finger entlang des Objekts generiert) hält einen ausgeprägten Effekt aufrecht. [15]

### 3.3. ÜBERTRAGUNG AUF ACTIVE SIDESTICK

Der haptische Sinn scheint also als eine Art Verifikation der Sinneswahrnehmung zu wirken: Wenn der Proband die Möglichkeit erhält, den Würfel an einer beliebigen Stelle anzufassen und damit einen weiteren Sinneseindruck bezüglich eines bereits visuell beobachteten Umweltzustands erhält, dann fließt dieser Eindruck – gewichtet nach der ihm beigemessenen Glaubwürdigkeit – in die Interpretation des visuellen Eindrucks und damit auch in die Lagebildgenerierung ein. Interessanterweise funktioniert diese Beobachtung auch, wenn den Probanden die tatsächliche Natur des Umweltzustands (beispielsweise die dreidimensionale Würfelform) bekannt und bewusst ist. Daher liegt die Vermutung nahe, dass die Zusammenführung der beiden Sinneseindrücke bereits auf einer sehr frühen Ebene der Reizverarbeitung im Gehirn stattfindet, bevor die Wahrnehmung auf den höheren Ebenen bewusst verarbeitet und interpretiert wird.

Diese Aussage bedarf noch weiterer Überprüfung, eröffnet aber gegebenenfalls umfangreiche Möglichkeiten, die Lagebildgenerierung des Piloten mittels haptischem Feedback zu beeinflussen. Allerdings geht mit der Nutzung dieser tief liegenden Verknüpfung auch eine große Verantwortung einher, eine Irreführung des Piloten durch das haptische Feedback in jedem Fall zu vermeiden. Wenn



der haptische Sinneseindruck auf so tiefer Ebene die Interpretation anderer Sinnesreize beeinflusst – und dies sogar dann, wenn deren Zustand auf der bewussten Ebene bekannt ist – können irreführende haptische Reize das Bewältigen einer kritischen Situation wesentlich erschweren oder überhaupt erst eine solche provozieren.

Eine weitere Implikation ergibt sich aus der in der Studie von Bruno et al. festgestellten nur kurzen Nachwirkzeit des haptischen Sinneseindrucks. Dies spricht für die Nutzung eines kontinuierlichen Feedbacks anstatt eines eher kurzen Impulses (beispielsweise in Form eines *Stickshaker*).

Die bisher in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse unterstützen teilweise das bereits vorgestellte Konzept eines haptischen Feedbacks zur Steigerung der *Situation Awareness* hinsichtlich der Annäherung an kritische Flugzustände. [1] Sie zeigen aber auch auf, dass für ein umfassendes Konzept in der gewünschten Anwendung (Steuerreserven im Landeanflug) noch sehr viel mehr Aspekte nicht nur auf der fliegerisch-technischen, sondern vor allem auch auf der menschlichen Ebene – psychologisch und physiologisch – betrachtet werden müssen.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG / WEITERES VORGEHEN

Die Nutzung des haptischen Kanals als zusätzlichem Sinneskanal, um gezielt Informationen vom Flugzeug zum Piloten weiterzugeben, kann auf mehrfache Weise zur Steigerung der *Situation Awareness* und damit der Flugsicherheit allgemein genutzt werden. Dabei können nicht nur insgesamt mehr Informationen auf sehr intuitive Weise an den Piloten weitergegeben, sondern zusätzlich bisher stark belastete Informationskanäle (der visuelle und der auditive Kanal) entlastet werden (siehe auch [2], [3] [4]).

Die simultane Nutzung mehrere Sinneskanäle gleicht allerdings keiner einfachen Addition - das Lagebild des Piloten wird nicht einfach nur erweitert; vielmehr beeinflussen die über die verschiedenen Sinneskanäle aufgenommenen Reize sich je nach Situation auf ganz unterschiedliche Art und Weise. Die Berücksichtigung dieser Interaktionen eröffnet neue Möglichkeiten beim Design der Mensch-Maschine-Schnittstelle, offenbart aber auch spezielle Risiken.

Das vorliegende Projekt betrachtet daher zunächst interdisziplinär die Bedeutung aktueller psychologischer und sinnesphysiologischer Erkenntnisse zur Sinnesinteraktion bei der Lagebilderstellung und versucht, dieses Grundlagenwissen auf die Anwendung eines *Active Sidestick* zur Steigerung der *Situation Awareness* bezüglich der Steuerreserven im Landeanflug zu übertragen.

Auf der ingenieurstechnischen und fliegerischen Ebene wird dafür auf Grundlage einer *Goal Directed Task Analysis* (GDTA) [8] und in Zusammenarbeit mit Sicherheitspiloten definiert, welche Herausforderungen für das Erlangen umfassender *Situation Awareness* im Landeanflug existieren. Dabei werden sowohl Erfahrungen und Vorfälle aus der jüngeren Vergangenheit ausgewertet, als auch die aus neuen, komplexeren Anflugverfahren (z. B. *Continuous Descent Approaches*, *4D-Approaches*) erwachsenden Anforderungen betrachtet.

Anschließend wird das bereits in einem groben Entwurf [1] vorgestellte haptische Feedback entsprechend ausgearbeitet, um Piloten Sidestick-gesteuerter Fly-by-Wire-Flugzeuge optimal zu unterstützen und die Leistung des Gesamtsystems Pilot/Flugzeug hinsichtlich Flugsicherheit und Effizienz zu verbessern.

#### Literaturverzeichnis

- [1] F. J. J. Schmidt-Skipiol, „Ein Active-Sidestick-Konzept für Flugzeuge mit Fly-by-Wire-Technologie,“ Institut für Flugführung (IFF) der Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig, 2014.
- [2] S. de Stigter, M. Mulder und M. M. van Paassen, „Design and Evaluation of a haptic Flight Director,“ *Journal of guidance, control, and dynamics*, Bd. 30, Nr. 1, pp. 35-46, 2007.
- [3] E. Fields und D. Harris, „A comparative survey of the utility of cross-cockpit linkages and autoflight systems' backfeed to the control inceptors of commercial aircraft,“ in *Ergonomics*, 41:10, London, Taylor & Francis, 1998, pp. 1462-1477.
- [4] R. J. A. W. Hosman, B. Benard und H. Fourquet, „Active and Passive Side-Stick Controllers in Manual Aircraft Control,“ in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Los Angeles, CA, Vereinigte Staaten, 1990.
- [5] G. Faconti, M. Massink, M. Bordegoni, F. De Angelis und S. Booth, „Haptic Cues for Image Disambiguation,“ *Computer Graphics Forum*, Bd. 19, Nr. 3, 2000.
- [6] C. von Campenhausen, *Die Sinne des Menschen*, Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1993.
- [7] M. R. Endsley, „Human Capabilities and Limitations in Situation Awareness,“ in *Combat Automation for Airborne Weapon Systems: Man/Machine Interface Trends and Technologies*, Neuilly-Sur-Seine, Frankreich, Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD), North Atlantic Treaty Organization (NATO), 1993, pp. 19.1 - 19.10.
- [8] M. R. Endsley, „Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems,“ *Human Factors*, Bd. 37(1), 03 1995.
- [9] 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, pp. 33-54.
- [10] M. R. Endsley und D. B. Kaber, „Team Situation Awareness for Process Control Safety and Performance,“ *Process Safety Process*, Bd. 17, Nr. 1, pp. 43-48, 1998.
- [11] S. C. A. M. Gielen, R. A. Schmidt und P. J. M. Van Den Heuvel, „On the nature of intersensory facilitation of reaction time,“ *Perception & Psychophysics*, Bd. 34, Nr. 2, pp. 161-168, 3 1983.
- [12] L. K. Morrell, „Temporal Characteristics of Sensory Interaction in Choice Reaction Times,“ *Journal of Experimental Psychology*, Bd. 77, Nr. 1, pp. 14-18, 5 1968.
- [13] M. O. Ernst und M. S. Banks, „Humans intergrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion,“ *Nature*, Bd. 415, Nr. 24, pp. 429-433, 1 2002.

- [14] H. B. Helbig und M. O. Ernst, „Haptic perception in interaction with other senses,“ in *Human Haptic Perception - Basics and Application*, Basel, Birkhäuser Verlag, 2008, pp. 235-249.
- [15] N. Bruno, A. Jacomuzzi, M. Bertamini und G. Meyer, „A visual–haptic Necker cube reveals temporal constraints on intersensory merging during perceptual exploration,“ *Neuropsychologia*, Bd. 45, pp. 469-475, 2007.