

MULTIMODALITÄT IM COCKPIT - INFORMATIONSKANÄLE ÜBERLAGERN UND ERSETZEN

C. A. Niermann, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Flugführung,
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Moderne Glas-Cockpits stellen den Piloten eine Vielzahl von Informationen zur sicheren, effektiven und ressourcenschonenden Flugführung zur Verfügung. Gleichzeitig ist aber der Mensch in der Menge seiner Informationsverarbeitung beschränkt. Multimodale Ansätze im Cockpit werden untersucht und mit bestehenden Systemen verglichen. Ergebnisse mehrerer Studien haben gezeigt, dass überlagerte und ersetzte Informationen von den Probanden schneller, präziser und mehr head-up verarbeitet werden können. Mehrere Ansätze zum Einsatz in der aktuellen Luftfahrt werden vorgestellt. Eine Vorausschau auf zukünftige Untersuchungen im Bereich Multimodalität im Cockpit wird gegeben.

1. EINLEITUNG

Moderne Luftfahrzeuge bieten mit head-down Glas-Cockpits ihren Piloten eine stetig wachsende Fülle von Informationen und Hinweisen. Sie informieren über die verschiedenen Zustände des Gesamtsystems sowie über Detailzustände einzelner Untersysteme und Komponenten. Neben der Flugzeugtechnik werden auch die An- und Abflugverfahren sowie die Missionsziele immer vielschichtiger. Verschiedene Assistenz- und Automationssysteme ermöglichen der Besatzung ihren Flug bei steigender Komplexität sicher, effektiv und ressourcenschonend durchzuführen. Neben dem eigentlichen Fliegen muss die Besatzung navigieren, ihren Flug mit der Flugverkehrskontrolle und Luftaufsicht abstimmen und die flugzeugspezifischen Systeme bedienen und überwachen. Zudem müssen sie sich stets ihrer aktuellen Situation und Umgebung bewusst sein und auf den weiteren Flugverlauf sowie etwaige zukünftige Ereignisse und Situationen vorbereitet sein. Hierbei werden sie durch verschiedene Assistenz- und Automationssysteme unterstützt. Die Handlungswahrnehmung der Mensch-Maschine-Interaktion im Cockpit basiert primär auf dem visuellen Kanal des Menschen. Für einen störungsfreien und sicheren Betrieb ist eine robuste und belastbare Informationsvermittlung zwischen den einzelnen Parteien im Gesamtkonzept Luftfahrzeug zu berücksichtigen. Piloten werden Informationen im Cockpit primär unimodal visuell über farbige LCD-Displays oder auditiv über das Pilotenheadset und Cockpitlautsprecher vermittelt.

Aktuelle Designs zeigen eine steigende Anzahl von Displays im Cockpit. Im Airbus A350 Cockpit sind sechs LCD-head-down-Displays zur Darstellung des On-board Information System (OIS), Primary Flight Display (PFD), Navigation Display (ND), Systems Display, Engine Display, Warning Display und Multifunction Display (MFD) verbaut.

Zukünftige Konzepte wie das in BILD 1 gezeigte EU Forschungsprojektes ODICIS (One Display for Cockpit Interactive Solution) präsentieren ein Cockpit Design mit einer nahtlosen Anzeige und integrierter berührungssensitiver Eingabe. Neue Displaytechnologien ermöglichen den Einsatz immer größerer und vielfältiger Anzeigen in der Luftfahrt.



BILD 1. EU Forschungsprojektes ODICIS
(Thales, 2012)

Zusätzlich zur visuellen Informationsdarbietung findet die auditive Übermittlung Einsatz in Cockpits. Audio wird als Warn- und Informationssystem genutzt und primär eingesetzt, um Piloten auf einen Hinweis oder eine Warnung aufmerksam zu machen. Der Hinweis „Autopilot disconnect“ oder die

Warnung „Windshear“ enthalten neben der reinen Information keine weiteren informativen Komponenten. Mögliche Handlungen und Reaktionen müssen durch die Piloten selbstständig kognitiv aus der Ausbildung, den Check-Listen und der Erfahrung entschieden werden. Dies unterscheidet sich zu direkten verbalen Handlungsanweisungen, wie sie beispielsweise durch das akustische Bodenannäherungs-Warnsystem GPWS (Ground Proximity Warning System) oder das Kollisionswarnsystem TCAS (Traffic Alert and Collision Avoidance System) gegeben werden. Diese Audio-Warnungen enthalten sowohl direkte sprachliche Anweisungen „traffic climb“ oder „retard“ als auch reine zeitkritische Informationen, wie beispielsweise die Angabe der Höhe kurz vor der Landung („30“...“20“...“10“).

Der haptische Kanal wird momentan bei Flugzeugen nur begrenzt eingesetzt. Neben dem Stick-Shaker, der die Piloten auf einen drohenden Strömungsabriss aufmerksam machen soll, erfolgt lediglich ein sensomotorisches Feedback, z. B. bei den Hebeln für die Triebwerke, Fahrwerk, Klappen und Spoiler. Ein direktes Feedback an die Piloten durch eine aktive Veränderung der Hebelposition ist nicht integriert. Bei Hubschraubern erfolgt kein haptisches Feedback in den Steuerorganen über mögliche Grenzwerte des Hubschraubers. Ähnlich wie bei Flugzeugen, gibt es hier lediglich Feedback über Schalterstellungen.

2. UNIMODAL VERSUS MULTIMODAL

Neue Anzeigetechnologien ermöglichen größere, schärfere, farbige Anzeigen. Detailreichere synthetische Ansichten mit erweiterter Realität erhöhen trotz der umfangreichen Anzeigen das Situationsbewusstsein der Piloten. Die neuen Anzeigetechnologien bieten enormes Potenzial zur Verbesserung des Situationsbewusstseins und der Ergonomie im Cockpit. Sie sind Informationsträger für eine Vielzahl von neuen und facettenreichen Assistenzsystemen und werden sowohl in der Forschung wie auch in der Industrie entsprechend stark genutzt [1]. Isoliert betrachtet haben diese Systeme das Potenzial positiv auf die Aspekte Sicherheit, Effektivität und Ressourcenschonung einzuwirken. Betrachtet man aber das Gesamtsystem Cockpit, können reine unimodale Konzepte, die parallel und zusätzlich zum eigentlichen Steuern des Luftfahrzeugs durchgeführt werden müssen, den jeweiligen Sinneskanal, bei optischen Anzeigen den visuellen Kanal, stark belasten und im Extremfall zu einer Überlastung führen. Weitere Beschränkungen sind systemimmanente Probleme, wie beispielsweise visual clutter [2] [3] oder visual tunneling [4] [5].

Multimodale Ansätze nehmen sich dieser Problematik an. Sie versuchen die Belastung der Piloten gleichmäßig auf mehrere Sinne zu verteilen, um die Grundbelastung zu reduzieren. Darüber hinaus zeigen verschiedene Untersuchungen Leistungssteigerungen in vielfältigen flugrelevanten Aufgaben. Der multimodale Ansatz wird im weiteren Verlauf des Beitrags detaillierter betrachtet.

Die multimodale Informationsübertragung wird zum einen im psychologischen-physiologischen Sinn auf die Wahrnehmung über die Sinne des Menschen verstanden. Zum anderen werden unter Multimodalität im medialen Sinn unterschiedliche Anzeigearten beschrieben. In diesem Beitrag beziehen sich die vorgestellten Aspekte auf die Sinneswahrnehmung. Daraus resultierend, in der Luftfahrt genutzt, die spezifischen Empfindungskomplexe Sehen und Hören; mit Einschränkungen auch Fühlen. Visuelle, auditive und haptische Reize werden zur Informationsübertragung und Aufmerksamkeitslenkung in der Mensch-Maschine-Interaktion überdies für die Schnittstelle zwischen Mensch und Cockpit genutzt. Dem stehen unimodale Konzepte gegenüber, die lediglich mit einer einzelnen Sinneswahrnehmung im Austausch mit den Piloten stehen.



BILD 2 Fire Warning und Master Caution im Boeing 737 Cockpit (<http://b737home.blogspot.de/>)

Während in aktuellen Cockpits eine Vielzahl von Assistenzsysteme rein optisch auf einem Display darstellen, dadurch wird die visuelle Sinnesmodalität des Menschen angesprochen, benutzen multimodale Systeme auch eine akustische und/oder haptische Darstellung und beziehen auf diese Weise ebenfalls die auditive, die taktile und kinästhetische Sinnesmodalität in die Mensch-Maschine Interaktion ein. Die „Master Caution“-Warnung im Cockpit, wie sie in BILD 2 zu sehen ist, ist dafür ein Beispiel. Hierbei wird die Wahrnehmung visuell, durch einen blinkenden Taster, sowie auditiv durch einen akustischen Warnton gelenkt.

Zusätzlich erfolgt durch die Betätigung des Tasters ein bewusster haptisch-taktiler Reiz für die Bestätigung der Kenntnisnahme und des Zurücksetzens der Warnung.

3. STAND DER FORSCHUNG

Grundlegende Theorien erstellten Kahneman und Wickens. Kahneman ging in seiner „Theorie der begrenzten Ressourcen“ zunächst davon aus, dass die Aufmerksamkeit des Menschen begrenzt ist und als ein „single pool“-Modell zu verstehen ist. Ist dieser erschöpft, stehen keine weiteren Ressourcen mehr zur Verfügung [6]. Hingegen verfolgt Wickens die Theorie der „multiplen Ressourcen“. Der Theorie folgend ist es möglich, beispielsweise im auditiven Kanal noch Informationen aufzunehmen, wenn der visuelle Kanal bereits vollständig ausgelastet ist [7]. Die Untersuchungen von Phillips et. al. kommen zu einem vergleichbaren Ergebnis. Diese zeigen, dass simultan aber auf unterschiedliche Modalitäten präsentierte Informationen weniger negativen Einfluss aufeinander haben, als wenn sie auf dem gleichen Kanal präsentiert werden [8].

Für die Luftfahrt lassen sich darauf aufbauend vielfältige positive Effekte durch eine multimodale Darstellungsform finden. Sowohl die Bandbreite zwischen Menschen und Maschine kann erweitert werden als auch eine Steigerung der Qualität in der Interaktion [9]. Albery sieht Potenzial, den Workload der Piloten zu reduzieren und gleichzeitig die Leistung zu steigern [10]. Konkrete Ergebnisse wurden in der Steigerung der Entdeckungsraten von Warnsystemen erkannt und in unterschiedlichen Versuchsreihen nachgewiesen [11] [12]. Die Ergebnisse von Haas zeigen, dass Piloten „verbale-Informationen“ einer reinen „Einzeltone-Information“ vorziehen. Dabei war die multimodale Kombination aus visueller und auditiver Informationsdarbietung am besten [12].

Es lässt sich feststellen, dass multi-modale Informationsdarbietung zu einer Steigerung der Entdeckungsraten von Warnsystemen führt [13] [14]. Der Workload im Cockpit sinkt [11] [14] und die Präzision der Blickführung steigt [15]. Piloten sind mehr head-up, teilen ihre Aufmerksamkeit effizienter zwischen einzelnen Informationsquellen auf und brauchen weniger Zeit um die richtigen Informationen zu finden [16].

Im weiteren Verlauf dieses Beitrags wird auf die Fragestellung eingegangen, inwiefern Informationen positiv überlagert und ersetzt werden können. Der aktuell noch stark singular genutzte visuelle Kanal der Piloten entlastet wird und mit Fokus auf die Anforderungen in der Luftfahrt aktuelle Informationen multimodal vermittelt werden können, damit sie nicht nur isoliert betrachtet zu einer Verbesserung im Cockpit führen, sondern sich in der Gesamtbetrachtung positiv auf die Mensch-

Maschine-Interaktion auswirken.

4. FORSCHUNGSANSATZ

Informationen können sowohl überlagert wie auch ersetzt werden. Eine Überlagerung führt zur Priorisierung, ein Ersetzen verlagert die Belastung der Sinneskanäle. Diese beiden Methoden werden nun genauer ausgeführt und ihre Vorteile für den Einsatz in der Luftfahrt dargestellt.

4.1. Überlagern von Informationen

Superposition beschreibt allgemein die Überlagerung verschiedener Wahrnehmungskanäle, zur Priorisierung und Fokussierung. Eine Wahrnehmungslenkung und Wahrnehmungsbeschleunigung entsteht durch Audio und/oder Haptik als Ergänzung zur rein visuellen Information. Eine Priorisierung von Informationen entsteht, sobald mehrere Kanäle gleichzeitig genutzt werden, um eine Information zu übermitteln. Der Mensch reagiert unweigerlich mit einem erhöhten Maß an Aufmerksamkeit auf multimodale Reize, die simultan mehrere Wahrnehmungskanäle ansprechen [1].

Barfield et al. stellten fest, dass durch die Nutzung mehrere Wahrnehmungskanäle eine Erhöhung der Präzision in der Ausführung einer Tracking Aufgabe erreicht wird [13]. Es zeigte sich, dass undeutliche oder verrauschte Informationen auf einem Kanal, mit der Unterstützung durch einen weiteren Kanal, kompensiert werden. Verbesserungen in der Kombination aus Audio- und Visueller-Warnung sind denkbar. Besonders in den kritischen Phasen eines Fluges, Start/Landung/Schweben, müssen Piloten die ihnen dargebotenen Informationen und Daten bewerten und schnell optimale Entscheidungen treffen. Wie bereits zuvor ausgeführt zeigen mehrere Studien, dass multimodal dargestellte Warnungen und Informationen von Piloten signifikant schneller erkannt und beachtet werden [17]. Insbesondere die Kombination aus visuellem und auditivem Reiz zeigten eine Verbesserung der Entdeckungsraten bei Tracking-Aufgaben und kürzere Reaktionszeiten bei Multiparallelaufgaben wie sie in den kritischen Flugphasen verstärkt auftreten. Positiv zu bewerten sind auch die Ergebnisse, die zeigen, dass die Verknüpfung von visueller Darstellung mit einem 3D-Audio Signal im Cockpit zu einer Erhöhung des Situationsbewusstseins in der aktuellen Flugphase bei den Piloten führt [13].

In einem komplexen, hochtechnischen System, wie in einem Flugzeug oder Hubschrauber kann es zu Störungen und daraus resultierend zu weiteren Systemfehlern kommen. Hieraus ergeben sich multiple Warnungen, im Extremfall auch zeitgleich präsentiert, die vom Piloten beachtet und bearbeitet werden müssen. Eine Priorisierung der von Piloten auszuführenden Handlungen ist ein wichtiger Punkt,

um den weiteren Verlauf des Fluges sicher und effizient durchzuführen. Die Untersuchungen zum Absturz der Air France AF447 im Jahre 2009 zeigen, dass die Piloten auf das Signal, das den Verlust der Geschwindigkeitsanzeige markiert, zu spät und nicht mit der dafür vorgesehenen Prozedur reagierten. Dieses Verhalten wurde begünstigt durch das Abschaltsignal des Autopiloten da dieses offenbar salienter war und die gesamte Aufmerksamkeit beider Piloten auf den Autopiloten gerichtet wurde [18].

Multimodalität kann eine Priorisierung durch Superposition unterstützen. Ohne das die Piloten aktiv und mit kognitivem Aufwand selber die aktuelle Situation bewerten müssen, kann durch priorisierte Warnungen auf ihre richtige Handlungsreihenfolge unterstützend eingewirkt und ihre Aufmerksamkeit entsprechend situationsangepasst beeinflusst werden.

4.2. Ersetzen von Informationen

Substitution beschreibt allgemein das Ersetzen eines Informationskanals und so die alternative Vermittlung von Informationen. Die Verlagerung von einem Sinneskanal auf einen anderen zur Entlastung und damit einhergehend eine bessere Lastenverteilung auf allen Sinneskanälen. Durch Senkung der Belastung eines stark genutzten Kanals und gleichzeitige Nutzung und Verteilung des Informationsflusses auf verschiedene Kanäle kann die gefühlte Gesamtbelastung für die Piloten gesenkt werden [1] [10].

Untersuchungen zeigten, dass eine multimodale Information auch dann noch beachtet wird, wenn einzelne Kanäle bereits ausgelastet sind. Durch eine Balancierung aller Informationskanäle und damit einhergehen eine schlüssige Verteilung der Reize werden die Piloten messbar entlastet. Johnson et al. zeigten, dass insbesondere in Situationen mit hohem Workload eine Darstellung von Positionsinformationen via Audio zu einer zielgerichteten Orientierung der Piloten führt, ohne visuelle Ressourcen zur Lokalisierung zu belasten.

Substitution führt neben der reinen Reduktion der Belastung auch zu einer Verbesserung der Performance von Piloten. In Untersuchungen wurde festgestellt, dass Objekte und Hinweise durch die getesteten Piloten zuverlässig erkannt werden, wenn sie nicht wie gewohnt visuell dargestellt werden, sondern den Piloten rein auditive Informationen vermittelt wurden [17]. Weiter wurde nachgewiesen, dass Objekte die zum Zeitpunkt außerhalb des Sichtbereichs der Piloten lagen, dargestellt durch Audio und nicht wie gewohnt visuell, sicher erkannt werden [13].

5. EINSATZ IM COCKPIT

Multimodale Konzepte, Informationen Überlagern und Ersetzen, können bei verschiedenen Assistenzsystemen im Cockpit angedacht werden, die auf einer Informationsvermittlung zwischen Mensch und Maschine beruhen und zum jetzigen Zeitpunkt lediglich unimodal präsentiert werden.

Ein System, das den visuellen Kanal stark nutzt, ist das Nachtsichtgerät, überwiegend eingesetzt beim Nachtflug mit Hubschraubern. Die sichtbar gemachte Außenwelt wird den Piloten auf Displays unmittelbar vor dem Auge (meist befestigt am Helm der Piloten) dargestellt. Ein schneller Blick auf die head-down Anzeige ist erschwert und bedarf je nach Ausführung des verwendeten Systems eine Anpassung in Darstellung und Helligkeit. Zusätzlich ist durch das Nachtsichtgerät die periphere Wahrnehmung aufgrund des geringen Sichtfeldes eingeschränkt. Auf Objekte, die sich außerhalb des aktuellen Sichtbereichs befinden, könnten zusätzlich zur Darstellung im Cockpit auch auditiv hingewiesen werden. Es ist zu überlegen, Informationen, die für die zielgerichtete Ausführung der aktuellen Flugmission bisher ausschließlich auf einem visuellen Display im Cockpit dargestellt werden, zusätzlich auch über den auditiven Kanal zu übertragen. Die Piloten hätten so die Wahl, ob sie eine höher detaillierte Information aus dem Display erhalten wollen oder ihnen eine reduzierte auditive Information für die aktuelle Flugsituation ausreichend ist. Ein gelegentlicher Abgleich der erfassten auditiven Information mit dem visuellen head-down Display, zur Synchronisierung der beiden Informationsflüsse, ist den Piloten möglich.

Eine vergleichbare Überlegung beschrieben Parker et al. die untersuchten, inwieweit Piloten durch Audio bei der Suche nach anderen Flugzeugen im Umfeld ihrer eigenen Route unterstützt werden können. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass Piloten in der Lage sind, per Audio dargestellte Flugzeuge schneller zu erkennen und gleichzeitig mehr Zeit head-up im Cockpit zu verbringen. Die Piloten konnte dadurch ihre visuelle Kapazität von der head-down Anzeigen auf die Suchaufgabe im Außensichtbereich verlagern [19]. Vergleichbare Ergebnisse ergaben auch die Untersuchungen von Bergault et al., die ein TCAS-Alarm sowohl visuell wie auch auditiv darstellten und so mehrere Kanäle der Piloten nutzten. Ihre Ergebnisse zeigen, dass die Piloten schneller und präziser in der multimodalen Konstellation das andere Flugzeug entdeckten als in der unimodalen Darstellung [17].

Präzision und kurze Reaktionszeiten sind in der Luftfahrt ein oft gestelltes Ziel. Bei Fehlfunktionen am Luftfahrzeug müssen die Piloten sicher, präzise und schnell die richtigen Handlungen in der exakten Reihenfolge ausführen.

Der Unfall der TransAsia Airways GE235 im Februar 2015 zeigt, wie wichtig es ist, dass die Piloten bestmöglich über eine Störung informiert werden. Aus dem aktuellen Bericht der Luftfahrtversicherungsbehörde (ASC) ist zu entnehmen, dass der Pilot fälschlicherweise statt des defekten rechten Triebwerks das einzige noch funktionierende linke Triebwerk abstellte [20]. Bei Störungen, die nur eine Seite des Flugzeugs betreffen (z. B. Fahrwerk, Triebwerk, Klappen, Tanksystem), ist es denkbar, dass eine Informationsdarstellung mit unterstützender räumlicher Audioinformation zu einer Präzisierung der erforderlichen Aufmerksamkeit und Handlungsdurchführungen führt.

Mit dem Problem fehlgeleiteter Aufmerksamkeit beschäftigt sich auch das European Helicopter Safety Team (EHST). Diese untersuchte Hubschrauberunfälle im Zeitraum 2000 bis 2005. In ihrer Analyse stellten sie fest, dass annähernd 70% der Unfälle durch Pilotenfehler entstanden. Dies beinhaltet auch Fehler, die durch fehlgeleitete Aufmerksamkeit oder fehlerhaftes Urteilsvermögen entstanden [21]. Wie bereits beschrieben, zeigten mehrere Untersuchungen positive Effekte auf diese Probleme durch den Einsatz von multimodalen Darstellungen.

6. AUSBLICK UND ZUSAMMENFASSUNG

Es wird erwartet, dass multimodale Unterstützung einen positiven Einfluss auf Suchaufgaben im head-up Bereich hat und gleichzeitig die visuelle Ressource für Parallelaufgaben genutzt werden kann.

Aktuell werden in diesem Themenfeld Untersuchungen vorbereitet, die vorhandene visuelle Assistenzsysteme für Piloten von der rein visuellen Darbietung lösen und sie über alternative, zusätzliche auditive oder haptische Kanäle vermitteln. Zu diesem Zweck wurde eine Software entwickelt, die im Cockpit einen räumlich positionierten Ton in Echtzeit auf einem Stereo-Kopfhörer erzeugen kann. Damit sind wir in der Lage, Piloten via Audio nicht nur eine reine auditive-Information zu vermitteln, sondern zusätzliche eine räumliche Codierung zu übertragen. Es wird erwartet, dass so positive Effekte im Bereich der Orientierung, Reaktionsgeschwindigkeit und Akzeptanz bei den Piloten feststellbar sein werden.

Darauf aufbauend ist unsere Überlegung, auditive und haptische Reize nicht nur als reine Informations- bzw. Warnquellen zu nutzen, sondern den Piloten direkte Handlungsanweisungen, sog. Commanded Elements, zu geben. Diese sollen anstelle von visuellen Flugführungshinweisen und -informationen eingesetzt werden und eine direkte Verbindung und Verknüpfung von Wahrnehmung und Handlung ermöglichen.

Literatur

- [1] Ebrecht, L. u. Niermann, C. A.: Automation = Teamwork von Mensch und Maschine - Schlüsselfaktor Mensch-Maschine-Interaktion. In: Der Mensch zwischen Automatisierung, Kompetenz und Verantwortung. 56. Fachausschusssitzung Anthropotechnik der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V., 14. und 15. Oktober 2014, Ottobrunn. DGLR-Bericht, 2014-01. Bonn: Dt. Ges. f. Luft- u. Raumfahrt 2014, S. 231–250
- [2] Baldassi, S., Megna, N. u. Burr, D. C.: Visual clutter causes high-magnitude errors. *PLoS biology* 4 (2006) 3
- [3] Kaber, D. B., Alexander, A. L., Stelzer, E. M., Kim, S.-H., Kaufmann, K. u. Hsiang, S.: Perceived Clutter in Advanced Cockpit Displays: Measurement and Modeling with Experienced Pilots. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 79 (2008) 11, S. 1007–1018
- [4] Williams, L. J.: Visual field tunneling in aviators induced by memory demands. *The Journal of general psychology* 122 (1995) 2, S. 225–235
- [5] Reimer, B.: Impact of Cognitive Task Complexity on Drivers' Visual Tunneling. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2138 (2009), S. 13–19
- [6] Kahneman, D.: Attention and effort. Prentice Hall series in experimental psychology. Englewood Cliffs: Prentice Hall 1973
- [7] Wickens, C. D.: Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 3 (2002) 2, S. 159–177
- [8] Phillips, R. R. u. Madhavan, P.: The effect of distractor modality and processing code on human-automation interaction. *Cognition, Technology & Work* 13 (2011) 4, S. 233–244
- [9] Jovanovic, M.: Designing Aircraft Cockpit Displays: Borrowing from Multimodal User Interfaces. In: Gavrilova, M. L. u. Tan, K. C. J. (Hrsg.): *Transactions on Computational Science III. Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2009, S. 55–65
- [10] Albery, W. B.: Multisensory Cueing for Enhancing Orientation Information During Flight (2007)
- [11] Tajadura-Jiménez, A., Väljamäe, A., Kitagawa, N. u. Ho, H.-N.: Whole-body vibration influences on sound localization in the median plane. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 224 (2010) 10, S. 1311–1320
- [12] Haas, E. C.: Can 3-D Auditory Warnings Enhance Helicopter Cockpit Safety? *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 42 (1998) 15, S. 1117–1121
- [13] Barfield, W., Cohen, M. u. Craig, R.: Visual and Auditory Localization as a Function of Azimuth and Elevation (1997)
- [14] Johnson, C. W. u. Dell, W.: Limitations of 3D Audio to

Improve Auditory Cues in Aircraft Cockpits. 2003

- [15] Oving, A. B., Veltman, J. A. u. Bronkhorst, A. W.: Effectiveness of 3-D Audio for Warnings in the Cockpit. *The International Journal of Aviation Psychology* (2004)
- [16] Veltman, J. A., Oving, A. B. u. Bronkhorst, A. W.: 3-D Audio in the Fighter Cockpit Improves Task Performance. *The International Journal of Aviation Psychology* (2004) 14(3), S. 239–256
- [17] Begault, D. R.: Head-Up Auditory Displays for Traffic Collision Avoidance System Advisories: A Preliminary Investigation. *The Human Factors and Ergonomics Society* (1993)
- [18] Final Report, Air France flight AF 447 Rio de Janeiro - Paris, BEA, 2012
- [19] Parker, S. P. A., Smith, S. E., Stephan, K. L., Martin, R. L. u. McAnally, K. I.: Effects of Supplementing Head-Down Displays with 3-D Audio During visual Target Acquisition. *The International Journal of Aviation Psychology* (2004), S. 277–295
- [20] Aviation Safety Council: TransAsia Airways GE235 Flight Occurrence (2015)
- [21] EHEST: Analysis of 2000-2005 European Helicopter Accidents (2010)