

Vibrotaktiler Feedback zur Aufmerksamkeitslenkung bei komplexen Lotsentätigkeiten

B. Weber, B. Deml, M. Friedrich, S. Schätzle, H. Oberheid & C. Preusche

Zusammenfassung

Komplexe Arbeitsbereiche zeichnen sich oftmals durch eine hohe visuelle und akustische Informationsdichte aus. Mithilfe von Assistenzsystemen kann die Informationskomplexität reduziert und beispielsweise die Aufmerksamkeit auf relevante Ereignisse gelenkt werden. Konventionellerweise wird dabei vorwiegend der visuelle oder akustische Informationskanal gewählt, um den Operateur bei seiner Tätigkeit zu unterstützen. Ein alternativer Ansatz zur Optimierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle ist die Nutzung des taktilen Kanals.

In einer Mikroweltstudie sollte ein vibrotaktiler Assistenzsystem mit einem visuellen bzw. einem akustischen Assistenzsystem bei einer komplexen Lotsenaufgabe im Anflugbereich verglichen werden. Die Aufgabe der 36 Versuchspersonen war es, zwei unterschiedliche Verkehrsströme kurz vor der Landebahn zusammenzuführen (*Late-Merging-Operation*). Dabei mussten die Probanden einen Teil des Anflugverkehrs aktiv führen und zugleich die Positionen autonom anfliegender Flugzeuge mitverfolgen. Um das Situationsbewusstsein für Flugzeuge, die nicht aktiv geführt werden, aufrechtzuerhalten, wurde beim Erreichen kritischer Wegpunkte in der Routenstruktur vibrotaktiler vs. visueller vs. akustischer Feedback gegeben. Vibrotaktiler Feedback wurde dabei mit dem vom DLR entwickelten Feedbacksystem VibroTac gegeben.

Die Ergebnisse der Studie weisen darauf hin, dass zusätzliches Feedback beim Erreichen wichtiger Wegpunkte einen positiven Effekt auf die visuelle Aufmerksamkeitsverteilung und das Situationsbewusstsein hat. Differentielle Effekte der drei Feedbackmodi und praktische Implikationen werden diskutiert.

1 Vibrotaktiler Feedback zur Aufmerksamkeitslenkung

Moderne Arbeitsumgebungen zeichnen sich oftmals dadurch aus, dass eine Vielzahl visueller und akustischer Informationen verarbeitet werden muss. Gerade in Bereichen, in denen mehrere Aufgaben koordiniert werden müssen und eine schnelle Reaktion auf situative Veränderungen erforderlich ist, sind deshalb Assistenzsysteme unabdingbar. So gibt es zum Beispiel in der Luftfahrt zahlreiche Ansätze, um die Aufmerksamkeit von Piloten oder Lotsen auf relevante Ereignisse zu lenken und somit das Situationsbewusstsein auch bei komplexen

Verkehrssituationen und hoher Arbeitsbelastung aufrechtzuerhalten (vgl. Billings, 1997).

In komplexen, informationsdichten Arbeitskontexten kann eine zusätzliche visuelle oder akustische Assistenzinformation jedoch zu einer unangemessen hohen Belastung der jeweiligen Aufmerksamkeitsressourcen führen. Vielversprechend erscheint hier die Nutzung alternativer Informationskanäle wie beispielsweise der taktilen Modalität. Ausgehend von der Theorie der multiplen Ressourcen (*Multiple resource theory*; Wickens, 2002, 2008) existiert nicht eine undifferenzierte Verarbeitungsressource (vgl. Kahneman, 1973), sondern mehrere modalitätsspezifische Einzelressourcen, die parallel genutzt werden können. So kann vor allem beim Multitasking eine optimale Ressourcenauslastung durch Nutzung unterschiedlicher Informationskanäle erreicht werden. Basierend auf diesen Überlegungen sollte taktile Assistenz zu einer besseren Aufgabenperformanz führen, wenn visuelle und akustische Aufgaben parallel bearbeitet werden müssen.

Metaanalytische Studien (Burke et al., 2006; Elliott et al., 2009; Prewett et al. 2006) weisen tatsächlich darauf hin, dass taktile Informationen zum Beispiel in Ergänzung zu visueller Assistenz zu einer besseren Aufgabenperformanz und verkürzten Reaktionszeiten führen. Im Einklang mit Wickens Modell der multiplen Ressourcen war dieser positive Effekt besonders ausgeprägt, wenn die Arbeitsbelastung hoch war und mehrere Aufgaben parallel bearbeitet werden mussten. Zudem erwies sich taktiles Feedback verglichen mit rein visuellem Feedback vor allem dann als besonders effektiv, wenn dieses zur Aufmerksamkeitslenkung (Alarm, Warnung oder Nebenaufgabe) genutzt wurde.

Entsprechend liegen auch im Bereich der Luftfahrt empirische Befunde vor, die darauf hinweisen, dass taktiles Feedback besonders geeignet ist, um zum Beispiel die Aufmerksamkeit des Piloten oder Lotsen auf kritische Ereignisse zu lenken. So konnten Sklar und Sarter (1999) den Nachweis erbringen, dass taktiles Feedback (Armband mit zwei Aktuatoren) bei Änderungen des Flugmodus („Roll mode“ vs. „Autothrottle“) in einer komplexen Cockpitsimulation zu höheren Detektionsraten und schnelleren Reaktionszeiten führt. Dabei berichten die Autoren keinerlei Beeinträchtigungen der sonstigen visuellen Aufgaben durch taktiles Feedback zum Flugmodus.

In einer Studie von Hopp et al. (2005) wurde taktiles Feedback (zwei Schulter-Aktuatoren in einer Weste) gegeben, um die Aufmerksamkeit der Probanden auf eine Zweitaufgabe zu lenken, während als Primäraufgabe der Status und die Positionen von Flugzeugen zu überwachen waren. Dabei zeigte sich, dass das direktionale, taktile Feedback zu einer Leistungssteigerung bei der Zweitaufgabe führt, ohne Leistungseinbußen bei der Primäraufgabe zu verursachen.

Ähnliche Ergebnisse zu direktionalem taktilen Feedback konnten Hameed et al. (2007) mit einer Weste mit 9 bzw. 16 Aktuatoren in einer Lotsensimulation vorlegen. Dabei sollten 40 Flugzeuge auf einem Radarbildschirm überwacht

werden und auf verschiedene kritische Ereignisse reagiert werden. Die Detektionsraten und Reaktionszeiten waren auch in dieser Studie deutlich besser, wenn direktionales taktiler Feedback verfügbar war.

Während in den zitierten Studien fast ausschließlich Performanzdaten berichtet werden, bleibt der Einfluss taktiler Feedbacks zum Beispiel auf die visuelle Aufmerksamkeitsverteilung, das Situationsbewusstsein oder die Arbeitsbelastung unklar. Zudem wurde in den wenigen für die Luftfahrt einschlägigen Untersuchungen kein intermodaler Vergleich angestellt. Somit lässt sich der spezifische Nutzen taktiler gegenüber visueller oder akustischer Assistenz nicht abschätzen.

In der vorliegenden Studie sollte in einer realitätsnahen, komplexen Lotsensimulation der Einfluss direktonaler Feedbacks in taktiler vs. visueller vs. akustischer Modalität untersucht werden. Dabei sollten nicht nur die subjektiv empfundene Arbeitsbelastung, sondern auch Maße der visuellen Aufmerksamkeitsverteilung und des Situationsbewusstseins erhoben werden, um potentielle differentielle Effekte der Modalitäten auf die Informationsakquise und -verarbeitung erfassen zu können.

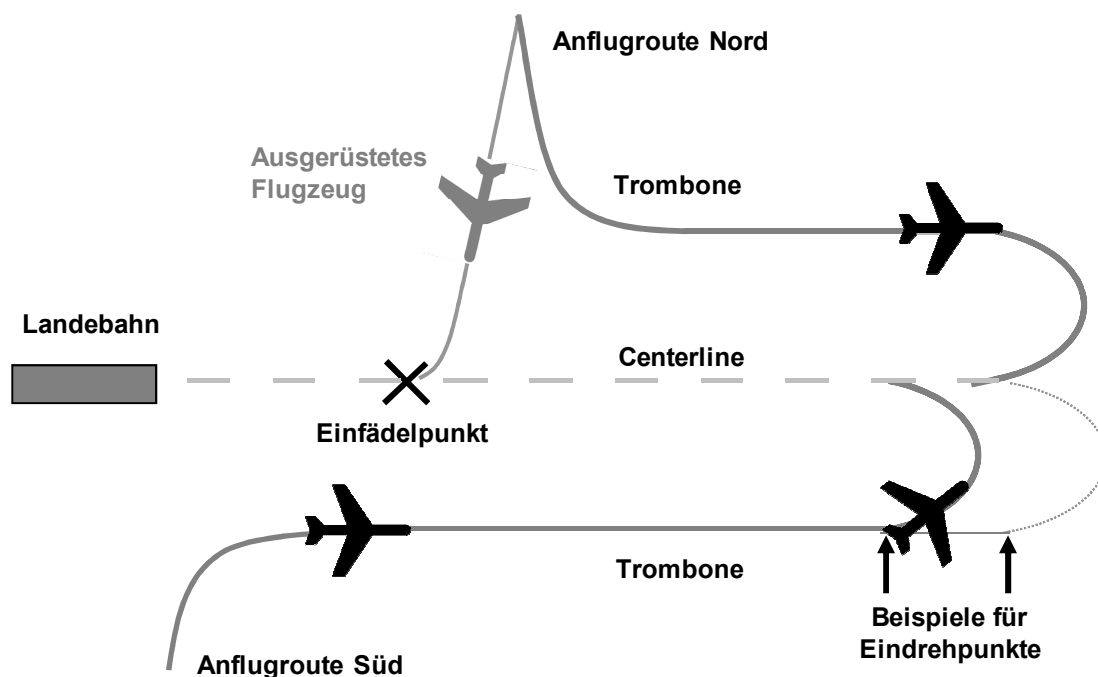


Bild 1: Anflugrouten der ausgerüsteten und nicht-ausgerüsteten Flugzeuge

Als Experimentalparadigma wurde eine Lotsenaufgabe im Anflugbereich gewählt, bei der zwei Verkehrsströme kurz vor der Landebahn zusammengeführt werden sollten (siehe z.B. Kuenz et al., 2007). Hintergrund für solche Late-Merging-Operationen ist es, das Potential von modernen Flight-Management-Systemen (FMS) stärker zu nutzen, die eine optimale 4D-Planung von Anflügen ermöglichen. Diese modern ausgerüsteten Flugzeuge könnten mit geringem Kerosinverbrauch und vergleichsweise niedriger Lärmemission den Flughafen autonom über eigene Anflugrouten ansteuern. Problematisch könnte jedoch die Integration dieser Anflüge in den konventionellen Anflugverkehr, der aktiv vom

Lotsen geführt wird, sein. Flugzeuge ohne FMS werden üblicherweise vom Lotsen über eine sogenannte Trombone auf die Centerline, als gedachte Verlängerung der Landebahn, eingedreht und zur Landebahn geführt (Bild 1). Dies hat zur Folge, dass beide Verkehrsströme an einem sog. Einfädelpunkt zusammengeführt werden müssen, ohne dass kritische Unterschreitungen der Flugzeugseparation auftreten.

Für den Lotsen ergeben sich in dieser „mixed traffic“-Situation neuartige koordinative Aufgaben, da nicht nur der konventionelle Anflugverkehr gelotst, sondern zugleich eine Integration der beiden Verkehrsströme frühzeitig geplant werden muss. Hierzu bedarf es einer genauen Beobachtung des automatisch anfliegenden Verkehrs mit FMS-Ausrüstung, um das Zusammenführen der Flugzeugtypen am Einfädelpunkt antizipieren zu können und sich frühzeitig eine Anflugsequenz zurechtzulegen.

Um ein solche mentale Sequenz der ausgerüsteten und nicht ausgerüsteten Flugzeuge generieren zu können, können beispielsweise visuelle Projektionen wie sogenannte Ghosts genutzt werden (z.B. MacWilliams & Porter, 2007; Mundra et al., 2003). Im Falle des Late-Mergings wird durch einen Ghost auf der Centerline angezeigt, welche Positionen der Anflugsequenz bereits durch ausgerüstete Flugzeuge blockiert sind (Bild 2). Sobald ein ausgerüstetes Flugzeug in den Zuständigkeitsbereich des Anfluglotsen fliegt, wird ein Ghost auf die Centerline projiziert, der sich – abweichend vom realen Flugzeug – mit einer konstanten Geschwindigkeit von 230 Knoten auf den Einfädelpunkt zubewegt und dort mit dem jeweiligen ausgerüsteten Flugzeug verschmilzt.

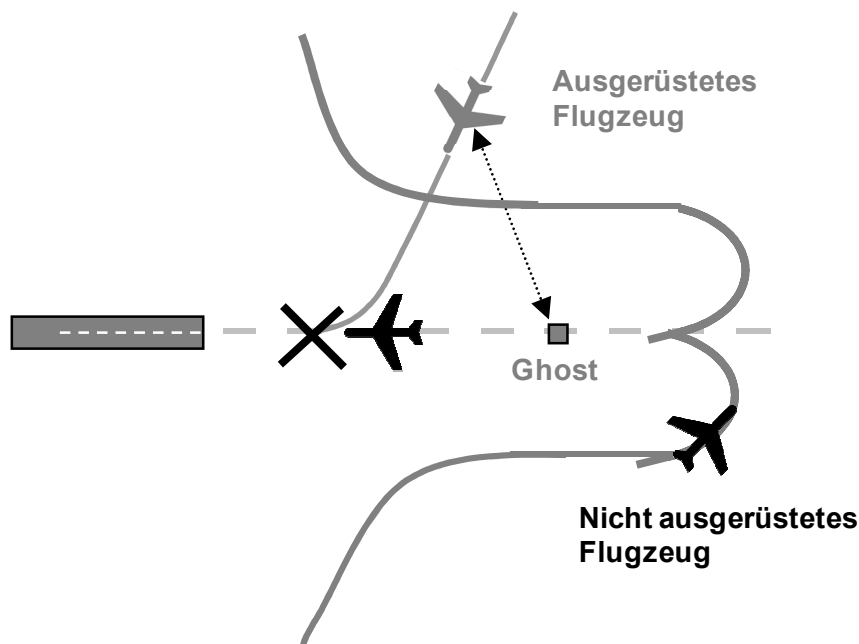


Bild 2: Ghosting als Platzhalter für ausgerüstete Flugzeuge

In vorangegangenen Laborstudien konnte der empirische Nachweis erbracht werden, dass mithilfe des Ghostings das Zusammenführen wesentlich sicherer

und effizienter durchgeführt werden kann als ohne jegliche Assistenz (Oberheid et al., 2009; Weber et al., 2009). Allerdings legen neuere Studien (Oberheid et al., 2010; Weber & Oberheid, 2010) auch nahe, dass sich durch Darstellung von Ghosts die visuelle Aufmerksamkeit und das Situationsbewusstsein für die ausgerüsteten Flugzeuge vermindert.

Ein denkbarer Lösungsansatz, um Aufmerksamkeitseinbußen zu vermeiden, ist die aktive Aufmerksamkeitslenkung auf reale Flugzeuge zum Beispiel beim Erreichen wichtiger Wegpunkte in der Routenstruktur. Allerdings sollten dabei die benötigten Ressourcen für die aktive Steuerung des konventionellen Verkehrs so gering wie möglich belastet werden.

Ausgehend von den eingangs zitierten Studien, sollte bei der Komplexität der Aufgabe und der für den Lotsenarbeitsplatz üblichen hohen visuellen und akustischen Informationsdichte, vibrotaktiler Feedback zur Aufmerksamkeitslenkung besonders geeignet sein.



Bild 3: Das vibrotaktile Feedbacksystem VibroTac

Für die Studie wurde das vom DLR entwickelte vibrotaktile Feedbacksystem VibroTac (vgl. Schätzle et al., 2010; Bild 3) genutzt, um das Erreichen relevanter Wegpunkte rückzumelden. Im Gegensatz zu den aufwändigeren Rückmeldesystemen, die z.B. in Westen eingearbeitet sind und bei denen die Reizapplikation am Torso oder am Rücken erfolgt, besteht das VibroTac aus einem elastischen Armband mit sechs zylindrischen Vibrationsmotoren. Damit macht man sich unter anderem zunutze, dass die taktile Sensitivität des Arms deutlich höher ist als zum Beispiel die des Rückens (Jones & Sarter, 2008). Das VibroTac kann durch das elastische Armband an verschiedenen Positionen des Armes getragen werden und passt sich unterschiedlichen Armumfängen an. Zudem erlaubt die kabellose Ansteuerung des Gerätes maximale Bewegungsfreiheit, so dass die Ausführung anderer Tätigkeiten nicht beeinträchtigt wird.

2 Methoden

2.1 Vorstudie

In einer psychophysikalischen Vorstudie mit $N=10$ Probanden (DLR-Mitarbeiter) sollte ein intermodaler Reizvergleich (*Cross Modality Matching*;

Stevens, 1959) durchgeführt werden. Ziel des intermodalen Reizvergleichs war es, die objektiven Reizintensitäten in den drei Modalitäten (auditiv, visuell und vibrotaktile) so zu wählen, dass subjektiv gleiche Empfindungsstärken resultieren.

Dazu wurden jeweils fünf bzw. sieben Standardreize einer Modalität in randomisierter Reihenfolge vorgegeben und der Proband gebeten, die Reizintensitäten in den anderen Modalitäten so einzustellen, dass die wahrgenommene Reizintensität gleich ist.

Nach Durchführung der Reizvergleiche, sollten die Versuchspersonen für jede Modalität einzeln angeben, welche Reizintensität ausreichend intensiv sei, um Aufmerksamkeit auf sich zu ziehen und zugleich nicht zu intensiv, um bei dauerhafter Reizgabe störend oder aversiv zu wirken. Dabei ergab sich für den visuellen Stimulus (weißes Aufblinker des Flugzeuglabels) ein Mittelwert von 2,4 Hz ($SD = 1,07$), für den akustischen Stimulus eine Lautstärke von 64 dB ($SD = 3,6$) und für den vibrotaktile Stimulus eine Reizintensität von 0,67 Volt ($SD = 0,2$; bei einer Frequenz von 74 Hz).

Der intermodale Reizvergleich ergab, dass visuelles Feedback mit einer Frequenz von 3 Hz einem akustischen Feedback mit einer Lautstärke von 64 dB und einem vibrotaktile Feedback mit einer Spannung von 0,64 V (73 Hz) entspricht. Da sich alle drei Werte im ausreichend salienten und akzeptablen Bereich bewegten, wurde die obige Stimulus-Konstellation für das Hauptexperiment gewählt.

2.2 Hauptstudie

2.2.1 Teilnehmer und Versuchsdesign

Insgesamt 36 Studenten (10 Frauen, 26 Männer) der Universität Braunschweig im Alter von 18 bis 34 Jahren ($M = 24,17$; $SD = 3,34$) nahmen an der Studie teil. Jeder Teilnehmer erhielt eine Aufwandsvergütung in Höhe von 25 €.

In einem einfaktoriellen Versuchsdesign wurden die Teilnehmer jeweils einer der vier Experimentalbedingungen zugewiesen, in denen entweder visuelles Feedback (V), akustisches Feedback (A), vibrotaktile Feedback (VT) oder kein Feedback (Kontrollgruppe; KG) beim Erreichen der Wegpunkte gegeben wurde. Die Zuordnung der Versuchsperson zu den vier Gruppen erfolgte dabei in Abhängigkeit von den Ergebnissen zweier Vortests zur Messung der Aufmerksamkeitsleistung (d_2 ; Brickenkamp, 1994) und des Arbeitsgedächtnisses (KAI-N; Lehl & Blaha, 2004), um eine Gleichverteilung hinsichtlich der Merkmale zu erzielen.

2.2.2 Experimentalaufgabe

In einer Mikroweltumgebung (vgl. Oberheid et al., 2009) sollten die Versuchspersonen den simulierten Anflugverkehr auf einem vereinfachten Radarbildschirm führen und Late-Merging-Operationen durchführen. Die Wahl eines Mikrowelt-Paradigmas ermöglicht es, potentielle Effekte der Feedbackmodalität auch mit Laien unter experimentell kontrollierten Bedingungen zu untersuchen. Die Anflugroutenstruktur auf dem Radarbildschirm bestand aus jeweils drei Anflugrouten aus dem Norden und Süden, einer sogenannten Nord- und

Südtrombone, sowie einer Centerline (Bild 4). Während die ausgerüsteten Flugzeuge den Einfädelpunkt direkt und autonom ansteuerten, mussten die nicht-ausgerüsteten Flugzeuge nach dem Erreichen der Kontrollzone auf eine der beiden Trombones geführt werden.

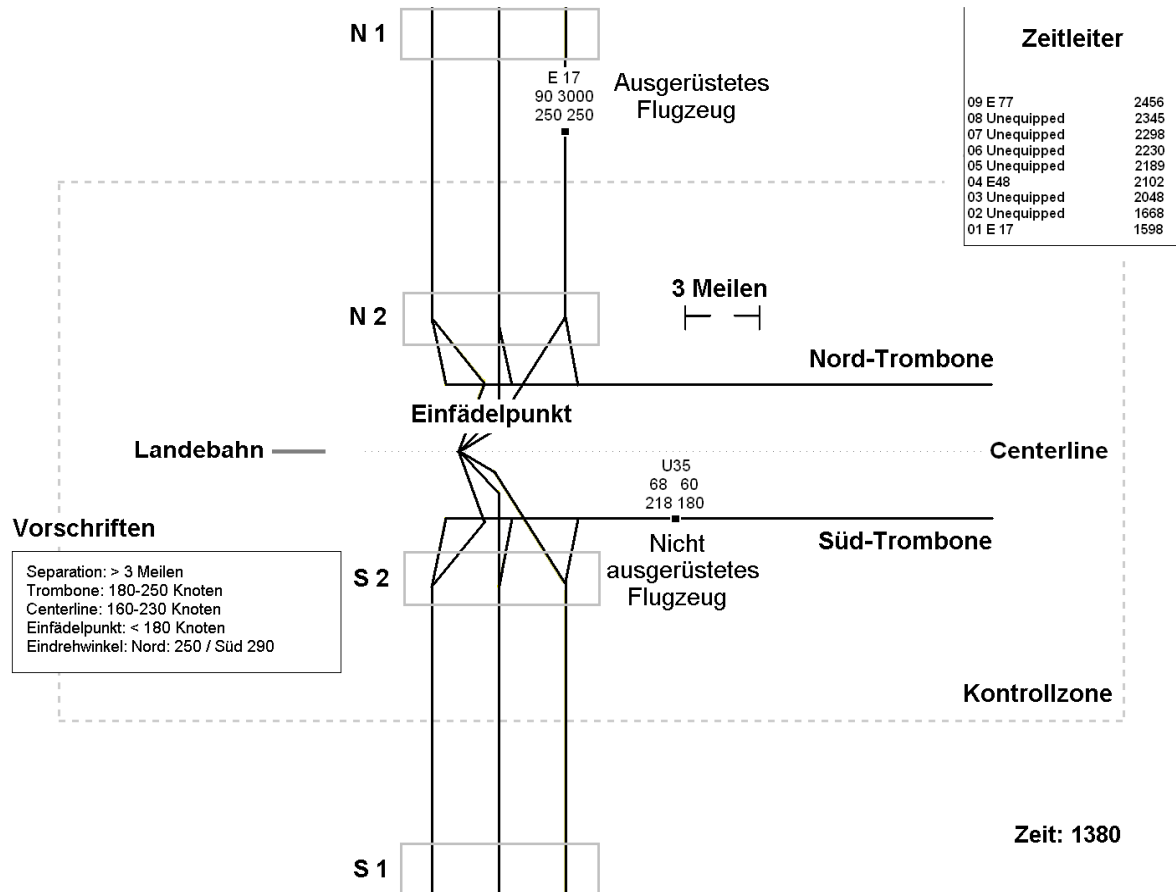


Bild 4: Grafische Darstellung der Mikrowelt

Die Steuerung der Flugzeuge erfolgte über einen simulierten Funkkontakt mit den Piloten. Dabei gaben die Versuchspersonen (Vpn) verbale Anweisungen zur Änderung der Flugrichtung oder -geschwindigkeit. Diese Kommandos wurden vom Versuchsleiter an einem separaten Versuchsrechner eingegeben und automatisiert durch eine synthetisch erzeugte Stimme zurückgelesen. In gleicher Weise wurde die Vp bei unverständlichen Anweisungen aufgefordert, diese zu wiederholen bzw. zu korrigieren.

Zur Vereinfachung der Aufgabe wurde eine optimale Sequenzierung der Flugzeuge und die entsprechenden Ankunftszeiten am Einfädelpunkt in Form einer Zeitleiter rechts oben auf dem Radarbildschirm eingeblendet. Die bislang verstrichene Zeit (in sec) wurde unten rechts wiedergegeben. Alle relevanten Vorschriften (Separationen, Geschwindigkeitsvorschriften) wurden mittig links in einer Liste zusammengefasst.

Insgesamt wurde das Verkehrsszenario so gewählt, dass die Verkehrsdichte während des gesamten Versuchs vergleichbar war.

2.2.3 Prozedere, Experimentelle Variation und Abhängige Variablen

Die Vpn nahmen mit einem Abstand von 80 cm zu der Projektion des Radarbildschirms (80 x 60 cm) Platz und wurden gebeten, die Instruktionen mit der Beschreibung des Radarbildschirms und der Experimentalaufgabe zu lesen. In allen Bedingungen wurden die Vpn instruiert, die nicht-ausgerüsteten Flugzeuge mittels Sprechfunk zu steuern. Dabei sollte jeweils erst die Flugzeugkennung (Callsign) dann die Änderungen der Flugrichtung (in Grad) und/oder der Geschwindigkeit (in Knoten) durchgegeben werden. Es wurde zudem verdeutlicht, dass die minimale Separation von drei nautischen Meilen zwischen zwei Flugzeugen nicht unterschritten werden sollte und zugleich die Geschwindigkeitsvorschriften für die Trombone (180-250 Knoten), Centerline (160-230 Knoten) und Einfädelpunkt (≤ 180 Knoten) eingehalten werden sollten. In den Bedingungen mit zusätzlichem Feedback zum Erreichen der Wegpunkte N1, N2, S2 und S1 wurde ergänzend erläutert, dass der Stimulus in den jeweiligen Modalitäten gegeben würde.

In der Bedingung mit visuellem Feedback wurden die Vpn informiert, dass die Symbole der Flugzeuge, die einen der vier Wegpunkte passierten, zwei Sekunden lang aufblinken würden.

In der Bedingung mit akustischem Feedback wurde instruiert, dass das Erreichen der vier Wegpunkte automatisch rückgemeldet würde (z.B. „Flugzeug bei Nord 1“).

Schließlich wurde den Vpn in der Bedingung mit vibrotaktilen Feedback mitgeteilt, dass jedem der vier Wegpunkte ein Vibrationsmotor des Vibrotacs zugeordnet sei und bei Erreichen des jeweiligen Wegpunktes der entsprechende Motor aktiviert würde. Die Zuordnung der Motoren entsprach dabei der räumlichen Anordnung der Wegpunkte (N1 = Motor oben; N2 = Motor links oben; S2 = Motor links unten; S1 = Motor unten).

Anschließend wurde den Vpn ein Helm zur Messung der Blickbewegung (iViewX, 200Hz Samplingrate) aufgesetzt und das System kalibriert. Kopfbewegungen wurden mit dem optischen Trackingsystem von A.R.T. erfasst. Als Maße für die visuelle Aktivität wurde die Fixationshäufigkeit gemessen. Dabei wurde eine Fixation ab einer Verweildauer von 100 ms gezählt (vgl. Salvucci & Goldberg, 2000).

Nach der Kalibrierung der Blickbewegungsmessung wurde der 20-minütige Probedurchgang gestartet. Die wichtigsten Manöver wurden erst unter standardisierter Anleitung des Versuchsleiters geübt und anschließend selbstständig durchgeführt.

Nach zehn Minuten und am Ende des Probedurchgangs wurden das Situationsbewusstsein mit der SAGAT-Methode (Endsley, 1995) und die Arbeitsbelastung (NASA-TLX, Hart & Staveland, 1988) online erhoben. Dazu wurde der Arbeitsdurchgang unterbrochen, der SAGAT-Fragebogen eingeblendet und die Vpn

geben, die aktuellen Positionen der ausgerüsteten Flugzeuge zu spezifizieren (Situationsbewusstsein Level 1; vgl. Endsley, 1995).

Im Anschluss wurde der 40-minütige Hauptdurchgang gestartet. Zu vier zufällig gewählten Zeitpunkten wurden das SAGAT-Verfahren und die Bewertung der Arbeitsbelastung durchgeführt. Nach jeder Unterbrechung wurde die Güte der Blickbewegungsmessung validiert und ggf. rekaliert. Nach dem Hauptdurchgang wurde ein Fragebogen zum Situationsbewusstsein bearbeitet.

3 Ergebnisse

3.1 Voranalysen

Die angestrebte Gleichverteilung bezüglich der Aufmerksamkeitsleistung (Konzentrationsleistung im d2-Testverfahren) und des Arbeitsgedächtnisses (Arbeitsgedächtnistest im KAI-N-Testverfahren) wurde erreicht. Einfaktorielle Varianzanalysen ergaben bei beiden Tests keine signifikanten Abweichungen vom Gesamtmittel (d2: $M = 58,63$; $SD = 22,05$; $F(3, 32) < .10$; ns; KAI-N: $M = 115,56$; $SD = 28,31$; $F(3,32) < 0.67$, ns).

Tab. 1: Deskriptive Daten

Abhängige Variable	Kontrollgruppe	Akustisches Feedback	Visuelles Feedback	Vibrotaktiler Feedback
	n=9	n=10	n=9	n=8
Fixationshäufigkeit (Ausgerüstete Flugzeuge)				
<i>Probedurchgang</i>	16,30 (6,05)	18,26 (6,30)	20,01 (9,67)	20,50 (4,87)
<i>Hauptdurchgang</i>	16,80 (6,27)	22,64 (6,69)	25,30 (12,25)	17,40 (7,82)
Situationsbewusstsein (Anteil richtig erinnerter ausg. Flugzeuge im SAGAT)				
<i>Entry-Sektor</i>	0,15 (0,22)	0,24 (0,19)	0,14 (0,10)	0,13 (0,12)
<i>Merging-Sektor</i>	0,50 (0,43)	0,50 (0,24)	0,67 (0,35)	0,69 (0,37)
Situationsbewusstsein (Subjektive Ratings; Skala von 1-7)				
	4,15 (1,20)	4,20 (0,98)	4,44 (0,71)	4,75 (0,94)
Arbeitsbelastung (NASA-TLX-Skala von 0-20)				
	10,3 (1,94)	10,53 (2,45)	9,59 (2,03)	9,08 (2,27)

3.2 Fixationshäufigkeiten

Weder im Probe- noch im Hauptdurchgang ergaben Varianzanalysen signifikante Effekte der Feedback-Bedingungen auf die Häufigkeit von Fixationen auf ausgerüstete Flugzeuge (beide $F_s(3,31) < 1.9$; ns). Dennoch liefert die Effektstärkenanalyse (Cohens d ; vgl. Cohen, 1988) zumindest kleine Effekte für den Vergleich von Kontrollgruppe und den restlichen Gruppen mit Feedback (alle

$ds > 0.31$), d.h. die visuelle Aufmerksamkeit wird durch das Feedback auf diese Flugzeuge gelenkt. Dieser Effekt verstärkt sich im Hauptdurchgang und resultiert in großen Effekten für die visuelle und akustische Feedbackbedingung ($d_{KG\text{ vs. }A} = 0,86$; $d_{KG\text{ vs. }V} = 0,87$). Im Gegensatz dazu bewegen sich die Fixationshäufigkeiten in der Bedingung mit vibrotaktilen Feedback auf dem Niveau der Kontrollgruppe ($d_{KG\text{ vs. }VT} = 0,08$). Die Daten liefern demnach erste Hinweise auf einen Lerneffekt, d.h. die Probanden die vibrotaktilen Feedback erhielten, richteten ihre visuelle Aufmerksamkeit seltener auf die ausgerüsteten Flugzeuge als im Probedurchgang (trotz der doppelt so langen Durchgangsdauer von 40 min).

3.3 Situationsbewusstsein

Bei der Auswertung des SAGAT-Fragebogens zu den aktuellen Positionen der ausgerüsteten Flugzeuge wurde die Anflugroute in einen Entry-Sektor (bis ca. 2 Meilen vor dem Einfädelpunkt) und einen Merging-Sektor (bis ca. 2 Meilen vor der Landebahn) aufgeteilt, um differenzierte Aussagen über das Situationsbewusstsein (Level 1) in beiden Anflugphasen treffen zu können. Tatsächlich ergaben sich divergente Befundmuster für die beiden Sektoren. In beiden Sektoren wurden keine signifikanten Haupteffekte für den Anteil richtig wiedergegebener Flugzeuge in einer ANOVA gefunden (beide $F_s(3, 31) < 0,90$; ns). Im Entry-Sektor, in dem auch die Rückmeldepunkte lagen, wurde jedoch zumindest für das akustische Feedback ($P = 24\%$) ein kleiner bis moderater Effekt ($d_{KG\text{ vs. }A} = 0,44$) für den Vergleich mit der Kontrollgruppe ($P = 15\%$) ermittelt. Die Prozentsätze der anderen beiden Bedingungen bewegten sich auf dem Kontrollgruppenniveau ($P_V = 14\%$; $d_{KG-V} = 0,06$; $P_{VT} = 13\%$; $d_{KG-VT} = 0,11$, vgl. Tab. 1).

Ein anderes Bild ergibt sich für die späte Anflugphase, in der die beiden Flugzeugtypen zusammengeführt werden. Hier lag der Anteil erinnerter ausgerüsteter Flugzeuge in der Kontrollgruppe und der Bedingung mit akustischem Feedback bei $P = 50\%$. Diese Werte wurden in den Bedingungen mit visuellem ($P_V = 67\%$; $d_{KG-V} = 0,43$) und vibrotaktilen Feedback ($P_{VT} = 69\%$; $d_{KG-V} = 0,47$) übertroffen.

Im Abschlussfragebogen sollten die Vpn auf siebenstufigen, verbal verankerten Likertskalen (Wertebereich 1-7) einschätzen, inwieweit sie einen Überblick über die gesamte Verkehrssituation und alle relevanten Ereignisse hatten (SA Level 1), wie sehr sie in der Lage waren, die Verkehrssituation und alle Ereignisse zu verstehen (SA Level 2) und die Verkehrssituation in der nahen Zukunft vorwegzunehmen (SA Level 3; vgl. Endsley, 1995). Da die Ergebnisse für alle drei Items ähnlich waren, wurden sie zu einer SA-Gesamtskala aggregiert ($CR-\alpha = 0,79$).

Ogleich eine Varianzanalyse für die SA-Skala das Signifikanzlevel von $\alpha = .05$ nicht erreichte ($F_s < 1,05$; ns), ergab der Vergleich von Kontrollgruppe und der Bedingung mit visuellem Feedback einen kleinen, positiven Effekt ($d_{KG\text{ vs. }V} = 0,29$). Zudem wurde ein moderater Effekt für den Vergleich von

Kontrollgruppe und der Bedingung mit vibrotaktiler Feedback ermittelt ($d_{KG \text{ vs. } VT} = 0,56$).

3.4 Arbeitsbelastung

Der varianzanalytische Vergleich der Experimentalbedingungen ergab keine signifikanten Unterschiede für den über alle Messzeitpunkte gemittelten NASA-TLX Score ($F(3, 32) = 0,81$; ns). Die Effektstärkenanalyse hingegen deutet auf einen kleinen positiven Effekt bei visueller ($d = 0,36$) und einen moderaten Effekt bei vibrotaktilem Feedback hin ($d = 0,58$).

3.5 Tragekomfort des VibroTacs

Vpn, die Feedback durch das VibroTac erhielten, beurteilen den Tragekomfort („Das Armband war jederzeit angenehm zu tragen“) auf einer siebenstufigen Likertskala (1-7). Ein Mittelwert von $M = 5,13$ ($SD = 2,36$) deutet auf eine insgesamt gute ergonomische Gestaltung hin.

4 Diskussion

In der vorliegenden Arbeit sollte der Einfluss vibrotaktilem, visuellem und akustischem Feedback auf die visuelle Aufmerksamkeit, Situationsbewusstsein und Arbeitsbelastung bei einer Lotsenaufgabe untersucht werden.

Die Blickbewegungsanalyse liefert erste Indizien dafür, dass zusätzliches Feedback über das Erreichen spezifischer Wegpunkte auf der Anflugroute zu einer größeren visuellen Aufmerksamkeit für die rückgemeldeten Flugzeuge führt. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt, wenn visuelles oder akustisches Feedback gegeben wird, wohingegen bei vibrotaktiler Feedback nur ein Initial-effekt auf die Aufmerksamkeitszuwendung zu beobachten ist. Dies kann als Indiz für einen Lernprozess gewertet werden, der dazu führt, dass man bei vibrotaktiler Feedback das entsprechende Flugzeug nicht visuell fokussiert, sondern den entsprechenden Ghost, der offensichtlich relevantere Informationen enthält als das reale Flugzeug selbst. Beim ersten Feedback zum Erreichen des Kontrollsektors (N1 bzw. S1) zum Beispiel, muss der Operateur das Einfädeln der nicht ausgerüsteten Flugzeuge entsprechend vorbereiten und vor respektive hinter den dann auftauchenden Ghost auf der Centerline mit entsprechender Separation eindrehen. Demnach ist es nicht zielführend, das reale Flugzeug zu fokussieren, sondern die Position des Ghosts zu identifizieren. Ähnliches gilt für den zweiten Rückmeldezeitpunkt. Hier gilt es vor allem, die Separationen für das Zusammenführen der realen Flugzeuge am Einfädelpunkt zu optimieren. Der Ghost ist wiederum die beste Informationsquelle für diese Separationsaufgabe.

Die Ergebnisse für das Situationsbewusstsein in der frühen Anflugphase (Entry-Sektor) scheinen diese Interpretation zu stützen. Trotz der geringen visuellen Aufmerksamkeit für die ausgerüsteten Flugzeuge, scheint das vibrotaktile Feedback dazu zu führen, dass man im Late-Merging-Bereich ein deutlich besseres Situationsbewusstsein für die realen ausgerüsteten Flugzeuge entwickelt als ohne Feedback. Auch die subjektiven Daten untermauern, dass das Situations-

bewusstsein (Level 1-3) besonders vom vibrotaktilen Feedback profitiert, wobei die Arbeitsbelastung im Vergleich am geringsten ist.

Demnach scheint das vibrotaktile Feedback die Late-Merging-Aufgabe am effektivsten zu unterstützen.

Im Einklang mit dieser Überlegung steht das Befundmuster für das visuelle Feedback, bei dem die stärkere visuelle Aufmerksamkeitsfokussierung auf die rückgemeldeten Flugzeuge mit einer leicht höheren Arbeitsbelastung und einem etwas schlechteren Situationsbewusstsein einhergeht.

Das akustische Feedback führt wie auch das visuelle Feedback zu einer stärkeren visuellen Reaktion in der frühen Anflugphase. Im Gegensatz zum visuellen Feedback ist jedoch bei akustischem Feedback das Situationsbewusstsein für die Flugzeuge in dieser Phase deutlich besser. Dieser Effekt könnte auf eine duale Kodierung von Informationen zurückzuführen sein, d.h. der Operateur verarbeitet die Information über das Erreichen der Wegpunkte einerseits auditiv und überprüft scheinbar die Positionen auch visuell. Allerdings sind mit dem akustischen Feedback offensichtlich auch zusätzliche Kosten verbunden: Die Arbeitsbelastung ist im Vergleich am höchsten und das Situationsbewusstsein in der kritischen Merging-Phase vergleichsweise niedrig. Dieser Effekt kann einerseits mit der intensiveren Informationsverarbeitung zum Zeitpunkt der Rückmeldung und somit einer Ablenkung von der eigentlichen Aufgabe, aber auch durch die entstehenden Verzögerungen des sonstigen Sprechfunks zur Flugzeugführung erklärt werden.

Insgesamt liefert diese Studie erste Hinweise, die dafür sprechen, dass vibrotaktile Hinweisreize im Kontext einer komplexen Lotsenaufgabe den Operateur sinnvoll unterstützen. Das vibrotaktile Feedback führt zwar zu keiner expliziten, visuellen Reaktion, aber gerade dadurch wird die visuelle Aufmerksamkeitsressource geschont und somit das Situationsbewusstsein für sicherheitskritische Verkehrssituationen (z.B. im Merging-Bereich) positiv beeinflusst. Der in früheren Studien berichteten Beeinträchtigung des Situationsbewusstseins durch eine automatisierte Ghosting-Assistenz (Oberheid et al., 2009; Weber & Oberheid, 2010) kann scheinbar am effektivsten durch vibrotaktilen Feedback entgegengewirkt werden.

Für eine abschließende Beurteilung differentieller Effekte der verglichenen Feedbackmodalitäten sollten künftig auch Performanzdaten hinzugezogen werden, um eruieren zu können, ob die subjektiv berichteten positiven Effekte auf das Situationsbewusstsein und die Arbeitsbelastung auch mit Performanzsteigerungen (z.B. im Hinblick auf Durchsatz, Separationsverletzungen) assoziiert sind.

Zudem sollten die Befunde mit einer größeren Stichprobe und auch mit erfahrenen Lotsen validiert werden, um die Repräsentativität der Ergebnisse zu steigern.

Sollte sich jedoch der insgesamt positive Effekt vibrotaktilen Feedbacks durch das VibroTac-Armband bestätigen, könnte das Feedbacksystem eine ergonomisch optimierte und sparsame Alternative zu den üblichen Torsosystemen wie dem Tactile Situation Awareness System der US Navy (McGrath et al., 2004) darstellen. Der Anwendungsbereich des vorgestellten VibroTacs erstreckt sich dabei nicht nur auf die Aufmerksamkeitslenkung. Denkbar wäre auch die Nutzung zur Navigation oder zur räumlichen Führung bzw. sensorischen Substitution im virtuellen Arbeitsraum.

Danksagung

Die Autoren möchten sich vielmals bei Gloria Pöhler für die Unterstützung bei der Datenerhebung bedanken. Des Weiteren danken wir Andreas Hasselberg, Michael Rudolph, Tristan Schindler und Anne Papenfuß für den technischen Support.

Literatur

- Billings, C.E. (1997). *Aviation Automation – The Search for a Human Centered Approach*. Erlbaum, Mahwah, NJ.
- Brickenkamp, R. (1994). *Test d2, Aufmerksamkeits-Belastungs-Test* (8. Auflage). Göttingen: Hogrefe.
- Burke, J.L., Prewett, M.S., Gray, A.A., Yang, L., Stilson, F.R.B., Covert, M.D., et al. (2006). Comparing the effects of visual-auditory and visual-tactile feedback on user performance: A meta-analysis. In *Proceedings of the 8th International Conference on Multimodal Interfaces* (pp. 108-117).
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. New York: LEA.
- Elliott, L.R., Covert, M.D. & Redden, E.S. (2009). Overview of Meta-analyses Investigating Vibrotactile versus Visual Display Options. In: J.A. Jacko (ed.), *Human-Computer Interaction, Part II* (pp. 435-443). Heidelberg: Springer.
- Endsley, M.R. (1995). Measurement of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37(1), 65-84.
- Hameed, S., Jayaraman, S., Ballard, M. & Sarter, N.B. (2007). Guiding visual attention by exploiting crossmodal spatial links: An application in air traffic control. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 51st Annual Meeting* (pp. 220–224). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Hart, S.G. & Staveland, L.E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P.A. Hancock & N. Meshkati (eds.), *Human Mental Workload* (pp. 139–183). Amsterdam: North-Holland.
- Hopp, P. J., Smith, C.A.P., Clegg, B.A. & Heggstad, E.D. (2005). Interruption Management: The Use of Attention-Directing Tactile Cues. *Human Factors*, 47, 1-11.
- Jones, L.A. & Sarter, N.B. (2008). Tactile displays: guidance for their design and application. *Human Factors* 50 (1), 90–111.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Kuenz, A., Mollwitz, V. & Korn, B. (2007). Green Trajectories in High Traffic TMAs. In *Proceedings of the 26th Digital Avionics Systems Conference*. Dallas, TX: DASC.
- Lehrl, S. & Blaha, L. (2004). *Messung des Arbeitsgedächtnisses, KAI-N*. Ebersberg: VLESS.

- MacWilliams, P. & Porter, D. (2007). *An assessment of a controller aid for merging and sequencing traffic on performance-based arrival routes*. Retrieved from http://www.mitre.org/work/tech_papers/tech_papers_07/07_0158/07_0158.pdf
- McGrath, B.J., Estrada, A., Braithwaite, M.G., Raj, A.K. & Rupert, A.H. (2004). *Tactile Situation Awareness System Flight Demonstration Final Report* (No. 2004-10). Ft Rucker: US Army Aeromedical Research Laboratory.
- Mundra, A.D., Bodoh, C.L.P., Domino, D.A., Sahragty, A.E., Helleberg, J.R., & Smith, A.P. (2003). Capacity enhancements in IMC for airports with converging configurations with knowledge of aircraft's expected final approach speeds: A case study. In *Proceedings of USA-Europe ATM Seminar*, Budapest, Hungary.
- Oberheid, H., Weber, B. & Möhlenbrink, C. (2010). Eye movement analysis to evaluate ghosting and targeting aids for controller assistance. In D. de Waard, A. Axelsson, M. Berglund, B. Peters & C. Weikert (eds.), *Human Factors: A system view of human, technology and organisation* (pp. 1-21). Maastricht: Shaker Publishing.
- Oberheid, H., Weber, B. & Rudolph, M. (2009). Visual controller aids to support late merging operations for fuel efficient and noise reduced approach procedures. In *Proceedings of 53rd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, San Antonio, TX: Human Factors and Ergonomics Society.
- Prewett, M.S., Yang, L., Stilson, F.R.B., Gray, A.A., Coovert, M.D., Burke, J., Redden, E., Elliot, L.R. (2006). The benefits of multimodal information: a meta-analysis comparing visual and visual-tactile feedback. In: *Proceedings of the 8th international conference on Multimodal interfaces (ICMI 2006)*, pp. 333–338. ACM, New York.
- Salvucci, D.D., & Goldberg, J.H. (2000). Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. In *Proceedings of the Eye Tracking Research and Applications Symposium* (pp. 71-78). Palm Gardens, FL: ACM.
- Schätzle, S., Ende, T., Wuesthoff, T. & Preusche, C. (2010). VibroTac: An ergonomic and versatile usable vibrotactile feedback device. In *19th IEEE International Symposium in Robot and Human Interactive Communication (Ro-Man 2010)*, Sep. 12-15, 2010, Viareggio, Italy.
- Sklar, A.E. & Sarter, N.B. (1999). Good vibrations: Tactile feedback in support of attention allocation and human automation coordination in event-driven domains. *Human Factors*, 41(4), 543–552.
- Stevens, S.S. (1959). Cross-modality validation of subjective scales for loudness, vibration, and electric shock. *Journal of Experimental Psychology*, 57(4), 201–209.
- Weber, B., Oberheid, H. & Rudolph, M. (2009). *Visuelle Unterstützung von Lotsen bei neuartigen Anflugprozeduren*. Vortrag auf der 6. Tagung der Fachgruppe Arbeits- und Organisationspsychologie der Deutschen Gesellschaft für Psychologie, Wien.
- Weber, B. & Oberheid, H. (im Druck). Visual assistance for merging mixed arrival traffic: Effects on controllers' performance, situation awareness, and mental workload. *International Journal of Aviation Psychology*. (submitted)
- Wickens, C. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2002, 3 (2), 159–177.
- Wickens, C. (2008). Multiple resources and mental workload. *Human Factors*, 50 (3), 449–454.

Autoren

Dr. B. Weber

Prof. Dr. B. Deml

Universität Magdeburg

Institut für Arbeitswissenschaft, Fabrik-
automatisierung und Fabrikbetrieb (IAF)

M. Friedrich, M. Sc.

Dipl.-Ing. H. Oberheid

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Institut für Flugführung

Braunschweig

Dipl.-Ing. S. Schätzle

Dipl.-Ing. C. Preusche

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Institut für Robotik und Mechatronik

Oberpfaffenhofen

Kontakt:

bernhard.weber@ovgu.de