

---

Zürich

---

# EYE-TRACKING-STUDIE ZUM EINSATZ VON VIBROTAKTILER RÜCKMELDUNG IM BEREICH DER LUFTFAHRT

Emanuel David Meier

---

**Zusammenfassung:** Trotz zunehmender Automatisierung und technologischem Fortschritt sind Piloten in Cockpits ständigen Herausforderungen ausgesetzt. Das Lenken des Flugzeugs in sich änderndem Wetter, die Kommunikation mit dem Crew- und Bodenpersonal sowie das Reagieren auf Alarme und das Interpretieren der Bordinstrumente sind mögliche Faktoren, die zu einer kognitiven Überlastung führen können. Eine mögliche Folge ist der Verlust des räumlichen Bewusstseins bezogen auf die Umgebung außerhalb des Flugzeugs. Da die meisten Informationen über die audiovisuellen Sinne aufgenommen werden, sind diese bereits stark ausgelastet. Daher bietet sich der Tastsinn als Alternative an. Um dessen Potenzial bei der Übertragung räumlicher Informationen zu bewerten, wurde eine Flugsimulatorstudie durchgeführt. Die Teilnehmer mussten dabei Objekte in der Umgebung orten, wobei sie durch Signale eines vibrotaktilen Gürtels unterstützt wurden. Die Resultate der Studie deuten bei dessen Verwendung auf eine signifikant geringere kognitive Belastung und Fehlerquote hin.

**Schlüsselwörter:** Luftfahrt, taktiles Feedback, Eye-Tracking

---

## EYE TRACKING STUDY FOR IMPROVING TACTILE FEEDBACK IN AN AVIATION TASK

**Abstract:** Pilots are facing constant challenges despite the increasing automation and technological advances. Such challenges include the maneuvering of the aircraft in changing weather, communication with the ground personnel and crew as well as reacting to alarms and interpreting the instruments in the cockpit. These factors can contribute to a cognitive overload of the pilots. In such a state, spatial awareness of the environment outside the aircraft may be lost. Since most information is provided via audiovisual channels, they are already heavily occupied. An alternative to convey additional information is the usage of the tactile sense. A flight simulator study was conducted to evaluate the potential of providing spatial information using the tactile modality. Participants were tasked with identifying objects in their environment while receiving signals from a vibrotactile belt. Results from the study indicate a significantly lower cognitive workload and error rate when the belt was used.

**Keywords:** Aviation, tactile feedback, eye tracking

### Autor

Emanuel David Meier  
Regensbergstrasse 318  
CH-8050 Zürich  
E: [emanuel.d.meier@gmail.com](mailto:emanuel.d.meier@gmail.com)

## 1 EINLEITUNG

Während Flügen werden Piloten mit einer Vielzahl von Herausforderungen konfrontiert. Der technologische Fortschritt sowie die zunehmende Automatisierung helfen zwar bei der Bewältigung der Arbeit, doch machen sie diese nicht trivial (Wickens 2002). Flüge finden selten unter idealen Wetter- und Windbedingungen statt, sodass Piloten auf plötzliche Wetterumschwünge und Turbulenzen gefasst sein und entsprechend reagieren müssen. Zeitgleich müssen die Bordinstrumente und Apparaturen überwacht und interpretiert werden. Das Vermeiden von Kollisionen mit anderen Flugzeugen und Hindernissen hat oberste Priorität. Alarmer und Signale lenken die Aufmerksamkeit der Piloten auf besonders wichtige Informationen oder können gar auf Ausfälle oder Defekte hinweisen, die analysiert und behoben werden müssen. Besonders zu Beginn und gegen Ende eines Flugs müssen zudem Checklisten und Abläufe streng befolgt werden.

Insbesondere angehende und unerfahrene Piloten können Schwierigkeiten damit haben, die Aufgaben im Cockpit in effizienter Weise und korrekter Reihenfolge zu bewältigen. Da sie aufgrund fehlender Erfahrung ungewohnte Situationen nicht immer korrekt einschätzen können, benötigen sie häufig zusätzliche Unterstützung (Wickens 2002). Szenarien, welche besonders hohen Stress verursachen können, sind zum Beispiel das Fliegen bei Nacht, insbesondere in der Nähe von bergigem Terrain, sowie das Interpretieren von Sichtflugkarten während des Flugs. Wenn Piloten aufgrund dieser oder anderer Ereignisse überfordert sind, können sie die Orientierung und das räumliche Bewusstsein verlieren, was unter Umständen zu tödlichen Unfällen führen kann (Endsley 1995).

Räumliches Bewusstsein ist als das Wahrnehmen, Verstehen und Vorhersehen der eigenen Position sowie der Position anderer relevanter Objekte im umgebenden Raum definiert (Bolton & Bass 2009). Während die einleitend genannten Ereignisse und Faktoren zu einem Verlust des räumlichen Bewusstseins führen können, haben Forschungsergebnisse jedoch auch belegt, dass es zum Beispiel durch die Studie von gewonnenen Daten aus Eye-Tracking-Software oder Flugtrainingsaufnahmen verbessert werden kann (Rudi 2019).

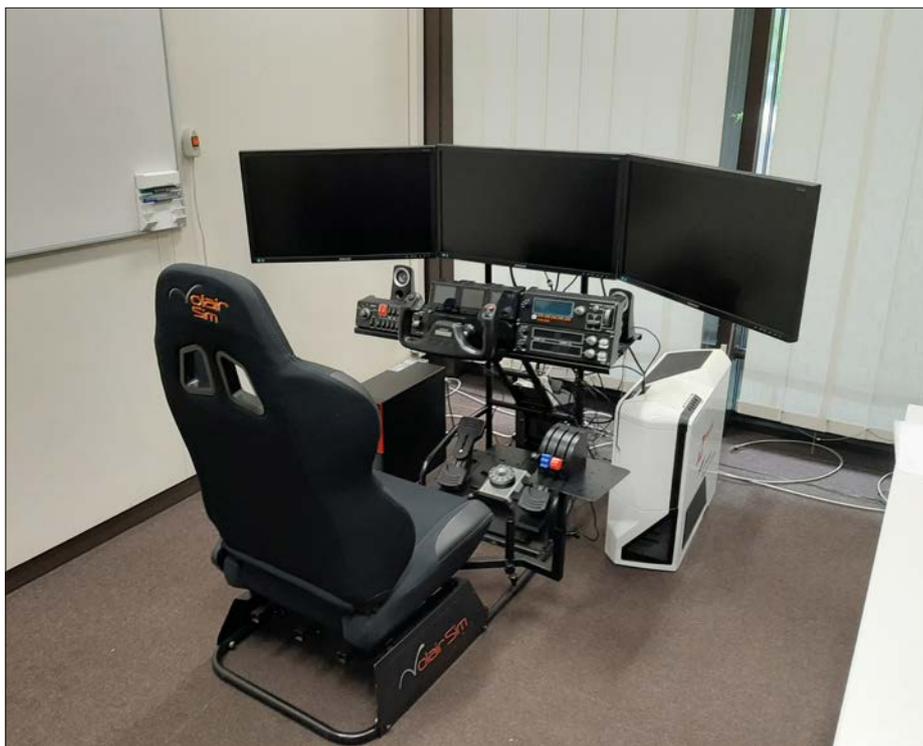


Abbildung 1: Eingesetzter Flugsimulator von LAT

Die überwiegende Mehrheit der Informationen im Cockpit wird entweder über den Seh- oder den Hörsinn von den Piloten aufgenommen: Sie lesen Instrumente und Displays ab, orientieren sich anhand von Karten und der Umgebung, reagieren auf Tonsignale oder kommunizieren verbal mit der Crew oder dem Tower. Da die beiden genannten Sinne daher bereits stark ausgelastet sind, kann jede weitere Information, welche über dieselben Kanäle verarbeitet werden muss, zu einer kognitiven Überlastung führen (Basil 2012). Diese kann wiederum die Leistungsfähigkeit vermindern. Wenn Informationen hingegen über einen anderen Sinn aufgenommen werden, können sie in manchen Fällen besser verarbeitet werden. Dieses Zusammenspiel verschiedener Sinne, das sowohl positive als auch negative Effekte haben kann, ist ein aktives Forschungsfeld (Quak et al. 2015).

Eine mögliche Alternative zur audiovisuellen Übertragung von Informationen ist die Benutzung des Tastsinns. Während dieser im Alltag zum Beispiel in Form von Vibrationssignalen bei Mobiltelefonen häufig eingesetzt wird, kommen solche Signale im Cockpit seltener vor. Eine Ausnahme bilden die sogenannten Stickshaker, welche bei einem bevorstehenden Strömungsabriss zu einem Vibrieren des Steuerknüppels oder -horns führen. Die Implementierung von tak-

tilen Signalen in der Luftfahrt wurde in mehreren Forschungsarbeiten bereits untersucht, jedoch in anderen Anwendungsbereichen als in dieser Arbeit.

So zeigte ein Experiment, welches die Arbeit der Flugverkehrskontrolle simulierte, dass zusätzliche Aufgaben, auf welche durch Vibrationen oder Audiosignale hingewiesen wurden, zu weniger Ablenkungen führten und besser abgearbeitet werden konnten als solche Aufgaben, die über den visuellen Sinn wahrgenommen wurden (Ho et al. 2001). Ein Steuerknüppel, der bei einem Landeanflug eine Kraft in die entgegengesetzte Richtung ausübte, wenn der Pilot zu weit von der Landepiste abwich, zeigte gute Ergebnisse für Korrekturen in vertikaler Richtung (Ziat et al. 2016).

Studien außerhalb der Luftfahrt konnten ebenfalls bereits das große Potenzial von vibrotaktilen Signalen in anderen Anwendungen der Navigation aufzeigen. Zum Beispiel hatten Autofahrer bei der Verwendung eines Sitzes, der Vibrationssignale senden konnte, bessere Reaktionszeiten als bei Fahrten auf herkömmlichen Sitzen. Dies konnte insbesondere bei solchen Ereignissen beobachtet werden, auf welche die Studienteilnehmer nicht vorbereitet waren (De Vries et al. 2009). Eine weitere Studie zeigte, dass sehbeeinträchtigen Personen mithilfe eines taktilen Gürtels wichti-

ge Richtungs- und Entfernungsinformationen übertragen werden können (Erp, v. et al. 2017). Ein vibrotaktile Gürtel kam auch in einer Studie über Fußgängernavigation zum Einsatz, wo diese Signalart vor allem bei schlechten Wetter- und Sichtbedingungen sowie in unvertrauter Umgebung eine effektive Navigation ermöglichte (Tsukada & Yasamura 2004).

Um das Potenzial der Verwendung von taktilen Signalen bei der Unterstützung von insbesondere weniger erfahrener Piloten zu untersuchen, wurde am Institut für Kartographie und Geoinformation der ETH Zürich eine Flugsimulatorstudie durchgeführt. Die Teilnehmer mussten in dieser nach bestimmten Objekten in der simulierten Umgebung suchen und das Flugzeug auf einer vorgegebenen Route halten. Dabei trugen sie einen Eyetracker, der ihren Blick aufzeichnete und sichtbar machte. Zudem trugen sie in einem ihrer jeweils zwei Experimentversuche einen Gürtel, der mittels Vibrationen die Richtung zu ihrem nächsten Zielobjekt anzeigte. Die besondere, bisher selten angewandte Kombination von vibrotaktilen Signalen mit Eye-Tracking-Technologie erlaubte es, das Verhalten, das räumliche Bewusstsein und Denken sowie die Leistung der Teilnehmer besser studieren zu können.

## 2 EXPERIMENTAUFBAU

### 2.1 HARDWARE

Der verwendete Flugsimulator wurde von Lufthansa Aviation Training (LAT) für die Studie zur Verfügung gestellt. Er bestand, wie in Abbildung 1 gezeigt, aus drei Monitoren, den Fluginstrumenten sowie einem Sitz. Um das Experiment auch für Laien zugänglich zu machen, wurden die meisten Funktionen und Instrumente des Simulators nicht verwendet. Die Teilnehmer mussten so nur das Steuerhorn benutzen und konnten die Simulation nicht anderweitig beeinflussen.

Während des Experiments kam der taktile Gürtel einer vorigen Studie (Gkonos et al. 2017) zum Einsatz. Dieser ist in Abbildung 2 zu sehen und verfügt über acht Vibrationsmotoren, die in regelmäßigen Abständen auf der Innenseite angebracht sind. Da die Motoren mithilfe eines Mikrocontrollers einzeln angesteuert werden konnten, standen den Teilnehmern während des Experiments Vibrationssignale aus ebenso vielen Richtungen zur Verfügung.



Abbildung 2: Vibrotaktile Gürtel mit acht Vibrationsmotoren



Abbildung 3: Teilnehmer mit Gürtel und Eyetracker während eines Flugs

Gesteuert wurden die Vibrationen durch eine Verbindung zu einem Laptop, der vom Experimentator bedient wurde. Dieser konnte den gewünschten Vibrationsmotor per Tastendruck ansteuern und vibrieren lassen. Die Signale wurden daher nicht automatisch aufgrund der Lage des Flugzeugs zu den zu findenden Objekten generiert, sondern durch den Experimentator bestimmt. Dies erlaubte eine Durchführung des Experiments im gegebenen Zeitfenster im Rahmen einer Masterarbeit.

Für die Dauer jedes Flugs trugen die Teilnehmer einen Eyetracker, der ihren Blick auf dem Laptop sichtbar machte. Dies erlaubte Rückschlüsse auf das Suchverhalten der Piloten während ihres Flugs. Zudem er-

leichterte der Eyetracker den Kontrollfluss des Experiments: Die Teilnehmer konnten durch das Fokussieren auf ein Objekt und Aussprechen eines Signals ein Objekt leicht identifizieren, ohne die Hände vom Steuerhorn nehmen und es auf den Monitoren anzeigen zu müssen. Der Experimentator konnte so auf dem Laptop ihren Blick in Echtzeit verfolgen und feststellen, ob das korrekte Objekt identifiziert wurde. Die gesamte Ausrüstung, die während des Experiments verwendet wurde, ist in Abbildung 3 zu sehen.

### 2.2 SOFTWARE

Für das Experiment wurden die Flugsimulator-Software Prepar3D benutzt. Als Flugort

wurde eine Gegend mit ebenem Gelände gewählt, die keine zusätzlichen Herausforderungen an die Teilnehmer stellte. Zusätzlich erleichterte die regelmäßige, schachbrettartige Anordnung des lokalen Straßennetzes die Orientierung und das Abschätzen von Winkeln für die Kurven, welche die Piloten fliegen mussten. Die Flüge wurden mit klarer Sicht und gutem Wetter, ohne Winde und Turbulenzen oder andere Einflüsse durchgeführt, sodass auch die Flugläiener unter den Teilnehmern sich ganz auf die gestellte Aufgabe konzentrieren konnten.

Die zu findenden Objekte wurden zusätzlich zur bestehenden virtuellen Welt hinzugefügt. Dadurch konnten sie während der Testphase des Experiments leicht umplatziert, skaliert oder ersetzt werden. Es wurden zwei verschiedene Konfigurationen mit je fünf Objekten entworfen. Diese waren dabei jeweils unterschiedlich, sodass zehn verschiedene Objekte verwendet wurden. Allerdings wurde darauf geachtet, dass zwischen beiden Objektgruppen jeweils Paare von ähnlichen Objekten eingesetzt wurden. So mussten die Piloten bei einem Flug zum Beispiel eine Radioantenne suchen, während sie im Verlauf des anderen Flugs eine moderne Windmühle finden mussten. Beide Objekte waren offensichtlich verschieden, doch beide hatten ein dünnes, vertikales Erscheinungsbild und wurden daher als zueinander ähnlich eingestuft.

Bei der Platzierung der Objekte wurde darauf geachtet, dass für die Piloten während jedem Flug jeweils zwei Links- und zwei Rechtskurven zu fliegen waren. Zusätzlich waren in jeder dieser Kurvengruppen eine 45°- und eine 90°-Kurve. Das fünfte Objekt wurde so platziert, dass die Piloten keine Kurve fliegen mussten, um es zu finden. Die beiden geplanten Routen mit den Standorten der Zielobjekte sind in Abbildung 4 zu sehen.

Durch die Zusammensetzung der Routen wurde so für jeden Flug einer der fünf frontalen oder seitlich angebrachten Vibrationsmotoren als erster aktiviert, wenn ein neues Objekt gefunden werden musste. Die hinteren drei Vibrationsmotoren des taktile Gürtels wurden daher nur dann eingesetzt, wenn ein Teilnehmer an einem Objekt vorbeigeflogen war und umgeleitet werden musste. Dies war jedoch sinnvoll, da Kurven mit überstumpfen Winkeln, wie sie die Aktivierung dieser drei Motoren an-

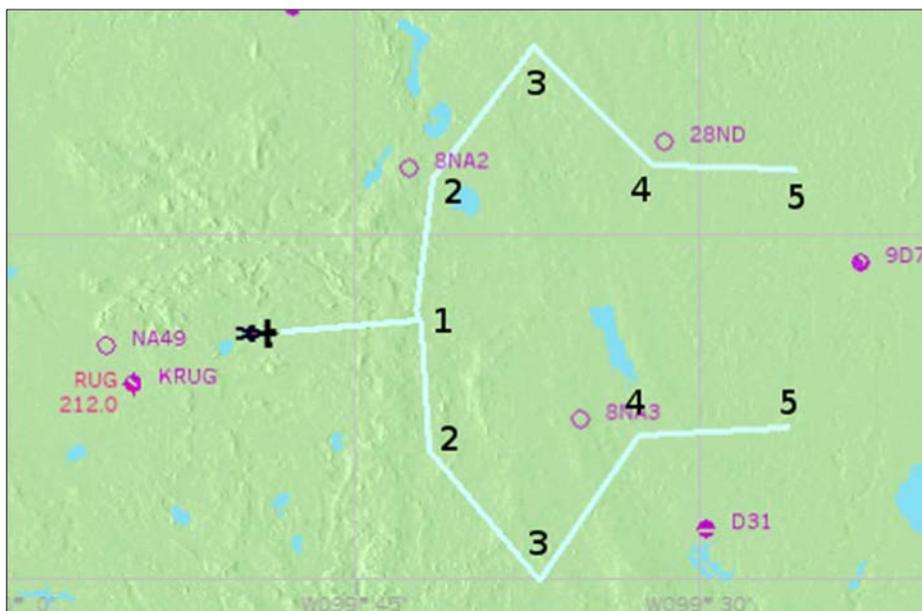


Abbildung 4: Geplante Flugrouten, Ziffern symbolisieren Objektstandorte

zeigen würde, bei Anflugmanövern wenig Sinn machen.

Für die Vergleichbarkeit der Resultate und zur Vermeidung von systematischen Effekten aufgrund einer unterschiedlicher Routenwahl waren die beiden Routen achsensymmetrisch zueinander. Um Lerneffekte zu vermindern, wurde die Reihenfolge der geflogenen Routen für die Teilnehmer zufällig bestimmt. Ebenso wurde zufällig festgelegt, ob die Piloten während des ersten oder zweiten Flugs den taktile Gürtel tragen mussten.

### 3 METHODOLOGIE

Da der Experimentaufbau und -inhalt bewusst vereinfacht wurde, konnten auch Laien für die Studie rekrutiert werden. Es meldeten sich 22 Teilnehmer (7 weiblich, 15 männlich), was aufgrund der Einschränkungen infolge der Covid-19-Pandemie und des limitierten zeitlichen Rahmens als ausreichend betrachtet wurde. Die Teilnehmer waren in einem Alter zwischen 21 und 66 Jahren (SV = 11.62). Die Mehrheit waren Laien ohne Erfahrung in der Luftfahrt. Allerdings gaben 11 Teilnehmer an, dass sie zuvor bereits Erfahrung mit Flugsimulator-Software gesammelt hatten. Zudem hatten fünf Teilnehmer reale Flugerfahrung, wobei das Maximum 190 Flugstunden betrug. Zwei Teilnehmer waren vollständig ausgebildete Piloten.

Bevor die Teilnehmer das eigentliche Experiment durchführten, wurde ihnen der Flugsimulator sowie dessen Bedienung

durch den Experimentator vorgestellt. Vor jedem Experimentflug absolvierten die Teilnehmer zudem einen kurzen Testflug, während dem sie mit der Prozedur während der Flüge und den zu erfüllenden Aufgaben vertraut gemacht wurden. Falls sie für den bevorstehenden Flug den taktile Gürtel tragen mussten, wurde dieser zuerst ohne Benutzung des Flugsimulators getestet, wodurch sich die Teilnehmer an die Art und Stärke sowie an die verschiedenen Richtungen der Signale gewöhnen konnten. Im anschließenden Testflug konnten sie sich entsprechend mit der Implementierung der Signale während den Experimentaufgaben vertraut machen. Der Gürtel vibrierte in einsekündigen Abständen in jener Richtung, in welcher das zu identifizierende Objekt zu finden war. Mit sich ändernder Position des Flugzeugs relativ zum Zielobjekt änderte sich entsprechend der vibrierende Motor am Gürtel. Unabhängig vom Tragen des Gürtels wurden den Teilnehmern vor jedem Flug der Eyetracker aufgesetzt und dieser kalibriert.

Während des Experiments bestand die Aufgabe der Teilnehmer darin, Objekte in der simulierten Umgebung zu finden, indem sie den Anweisungen des Experimentators folgten. Diese bestanden einerseits aus einer Gradanzahl sowie einer Richtungsangabe von links oder rechts. Nachdem sie das entsprechende Flugmanöver ausgeführt hatten, mussten die Piloten nach einem spezifischen Zielobjekt in der Umgebung Ausschau halten. Ein Beispiel für eine

Anweisung wäre „Bitte fliegen Sie eine 45°-Linkskurve und suchen Sie den Hangar“. Alle zu identifizierenden Objekte wurden den Teilnehmern zur Verdeutlichung vor dem Flug bereits anhand von Bildern gezeigt.

Wurde das korrekte Objekt gefunden, erhielten die Teilnehmer die nächste Fluganweisung. Falls der Gürtel getragen wurde, stoppten die Vibrationen, bis die neuen Anweisungen ausgesprochen wurden. Hatte sich die Teilnehmer geirrt, konnten sie nach weiteren Objekten Ausschau halten und diese zur Identifikation vorschlagen. Wenn nach Ermessen des Experimentators keine Möglichkeit mehr bestand, dass die Piloten das gewünschte Objekt ohne das Fliegen weiterer Kurven erkennen konnten, wurden sie umgeleitet und wieder auf einen Kurs gebracht, auf dem sie das Objekt finden konnten.

Nach den Flügen am Simulator mussten die Teilnehmer ihre geflogenen Routen auf Papier nachskizzieren, wobei sie die Standorte der Zielobjekte und die abgeflogene Reihenfolge festhalten mussten. Zusätzlich wurden nach jedem Flug drei standardisierte Fragebögen ausgefüllt: Der NASA Task Load Index (NASA-TLX), mit dem die kognitive Arbeitsbelastung ermittelt werden konnte, die System Usability Scale (SUS), womit die Gebrauchstauglichkeit des Systems mit und ohne Gürtel bewertet werden konnte, sowie der User Experience Questionnaire (UEQ), mit welchem die Teilnehmer Rückmeldungen zu ihrer User Experience während den Flügen geben konnten.

Den Abschluss des Experiments bildete ein kurzes Interview. In diesem konnten die Teilnehmer ihre Präferenz zwischen dem Fliegen mit und ohne Gürtel angeben und die Vorteile der Vibrationssignale aus ihrer Sicht aufzählen. Ebenso wurde ihnen die Möglichkeit für weitere, offene Kommentare gegeben. Dies konnten zum Beispiel Verbesserungsvorschläge oder mögliche Anwendungen eines solchen taktilen Gürtels im realen Flugbetrieb sein. Die Gesamtdauer des Experiments belief sich auf etwas mehr als eine Stunde pro Teilnehmer.

#### 4 RESULTATE

Die in der Studie gewonnenen Resultate wurden bezüglich der unabhängigen Variable, namentlich dem Fliegen mit oder ohne Gürtel, ausgewertet. Eine weitere Un-

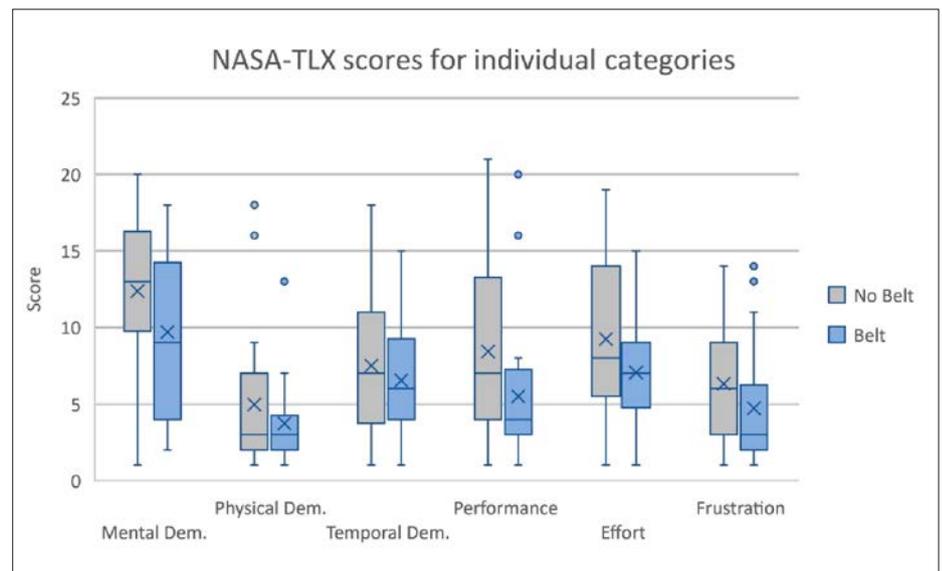


Abbildung 5: NASA-TLX-Resultate, aufgeteilt in die sechs Unterkategorien (x = Mittelwert, — = Median)

terscheidung der Resultate, wie die Reihenfolge der geflogenen Routen, musste aufgrund deren Symmetrie nicht durchgeführt werden. Da alle Teilnehmer beide Optionen der unabhängigen Variablen mit ihren jeweils zwei Flügen abdeckten, wurden die Resultate als verbundene Stichproben analysiert. Um zu ermitteln, ob die Resultate normalverteilt waren, wurde ein Shapiro-Wilk-Test eingesetzt. Zur Bestimmung signifikanter Unterschiede erfolgte anschließend für normalverteilte Datensätze ein abhängiger t-Test, während für nicht normalverteilte Datensätze ein Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test angewandt wurde. Das Signifikanzniveau war auf jeweils 95% bestimmt.

Durchschnittlich verbrachten die Teilnehmer 4,54 Minuten mit dem Finden von Objekten, wenn sie den Gürtel trugen. Ohne dessen Assistenz benötigten sie für dieselbe Aufgabe 5,84 Minuten, was einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Konditionen ergab. Zusätzlich wurde die Leistung anhand der Anzahl korrekter sowie irrümlichen Objektidentifikationen gemessen. Über alle durchgeführten Flüge aufsummiert identifizierten die Teilnehmer ohne den taktilen Gürtel insgesamt sieben falsche Objekte, mit dem Gürtel hingegen zwei. Dieser Unterschied stellte sich als nicht signifikant heraus ( $Z = -1,414$ ;  $p = 0,157$ ). Weiterhin kam es bei Flügen ohne den Gürtel zu gesamthaft zehn Umleitungen der Teilnehmer durch den Experimentator, da sie ein Zielobjekt verpasst hatten. Wenn sie den Gürtel trugen, verpassten sie nie ein Zielobjekt. Dies war ein

signifikanter Unterschied ( $Z = -2,271$ ;  $p = 0,023$ ).

Die Auswertung des räumlichen Bewusstseins, basierend auf den angefertigten Routenskizzen, erfolgte mithilfe der Software GMDA (Gardony et al. 2016). Diese ermöglicht es, Punkte auf Karten zu digitalisieren. Deren Komposition wird mit jener der Punkte einer Referenzkarte verglichen. Aus diesem Vergleich werden diverse Qualitätsparameter berechnet, welche die Skizzen bezüglich Rotation, Skalierung und Platzierung gegenüber der Referenz bewerten. All diese Vergleiche ergaben jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den angefertigten Skizzen nach Flügen mit oder ohne den taktilen Gürtel ( $-0,853 \leq Z \leq -0,713$ ;  $0,394 \leq p \leq 0,476$ ). Mehrere Teilnehmer gaben in ihrem Interview an, dass sie die Skizzenaufgabe aufgrund des Lerneffekts nach ihrem zweiten Flug besser lösen konnten. Daher wurden die Skizzen auch bezüglich des Zeitpunkts ihrer Anfertigung erneut analysiert. Diese Analyse ergab jedoch ebenfalls keine signifikanten Unterschiede ( $-1,860 \leq Z \leq -1,234$ ;  $0,063 \leq p \leq 0,217$ ).

Zur Ermittlung der kognitiven Arbeitsbelastung während der Flüge wurden die sogenannten „rohen“ NASA-TLX-Daten verwendet. Für diese bewerteten die Teilnehmer die Kategorien geistige, körperliche und zeitliche Anforderung sowie Leistung, Anstrengung und Frustration auf einer 21-stufigen Skala. Die Resultate der einzelnen Kategorien sind in Abbildung 5 zu se-

hen. Während bei allen einzelnen Kategorien der Mittelwert für die Flüge mit dem Gürtel niedriger und damit besser ausfiel, waren diese Unterschiede nur für die geistige Anforderung, Leistung sowie die Anstrengung signifikant ( $-2,467 \leq Z \leq -2,011$ ;  $0,008 \leq p \leq 0,044$ ). Für die Kategorien körperliche und zeitliche Anforderung sowie Frustration konnten hingegen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden ( $-1,866 \leq Z \leq -1,440$ ;  $0,062 \leq p \leq 0,150$ ). Um einen Wert für die allgemeine kognitive Arbeitsbelastung während der Flüge zu erhalten, werden die individuellen Resultate der einzelnen Kategorien aufsummiert. Die allgemeinen Resultate sind in Abbildung 6 im rechten Diagramm zu sehen. Verglichen mit dem Fliegen ohne Assistenz zeigten die Ergebnisse des NASA-TLX-Fragebogens nach Flügen mit dem taktilen Gürtel dabei eine signifikant niedrigere kognitive Arbeitsbelastung ( $t = 3,317$ ;  $p = 0,005$ ).

Um die Gebrauchstauglichkeit des Systems mit und ohne Gürtel zu vergleichen, beantworteten die Teilnehmer den SUS-Fragebogen. In diesem werden zehn Fragen auf einer fünfstufigen Skala von starker Ablehnung bis zu starker Zustimmung beantwortet. Als Ergebnis resultiert ein Wert zwischen 0 und 100, wobei Letzteres perfekte Gebrauchstauglichkeit bedeutet. Ein Wert von 68 wird allgemein als gute Gebrauchstauglichkeit angesehen. Sowohl die Resultate ohne als auch mit dem taktilen Gürtel überschritten diesen Wert, wobei die Teilnehmer die Gebrauchstauglichkeit des Fliegens mit dem Gürtel zudem signifikant besser einstufen ( $t = -3,753$ ;  $p = 0,001$ ). Diese Resultate sind in Abbildung 6 im linken Diagramm zu sehen.

Die Resultate des UEQ-Fragebogens gaben Auskunft über die User Experience der Teilnehmer während ihrer Flüge. Dieser Fragebogen besteht aus 26 Attributpaaren, die jeweils auf einer siebenstufigen Skala bewertet werden. Jedes Attributpaar ist dabei einer der folgenden Kategorien zugeordnet und beeinflusst deren Resultat: Attraktivität, Durchschaubarkeit, Effizienz, Steuerbarkeit, Stimulation und Originalität. Die Teilnehmer empfanden dabei alle sechs Kategorien bei den Flügen mit dem Gürtel als signifikant besser ( $-4,118 \leq Z \leq -2,465$ ;  $0,001 \leq p \leq 0,014$ ). Die Resultate dieses Fragebogens sind in Abbildung 7 zu sehen.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die UEQ-Resultate mit einer Testbank von über 450 anderen Produkten zu vergleichen, die ebenfalls mit dem UEQ bewertet wurden. Diese Vergleiche sind in Abbildung 8 zu sehen. Dabei schnitt das System mit dem Gürtel in allen sechs Kategorien mindestens mit der Bewertung „gut“ ab. Dies bedeutet, dass das System besser als 75% der Produkte in der Testbank bewertet wurde. Im Gegensatz dazu schnitt das System ohne die Unterstützung des taktilen Gürtels in den Kategorien Attraktivität, Effizienz

und Stimulation als „unterdurchschnittlich“ ab; diese waren daher nur besser als 25% der verglichenen Produkte. Die Kategorie Originalität wurde für das System ohne Gürtel als „schlecht“ eingestuft und befand sich damit unter den 25% am schlechtesten bewerteten Produkten.

Im abschließenden Interview gaben 19 der 22 Teilnehmer an, dass sie das Fliegen mit dem Gürtel gegenüber jenem ohne Gürtel bevorzugten. Ein Teilnehmer bevorzugte das Fliegen ohne den Gürtel und zwei Teilnehmer hatten keine eindeutige

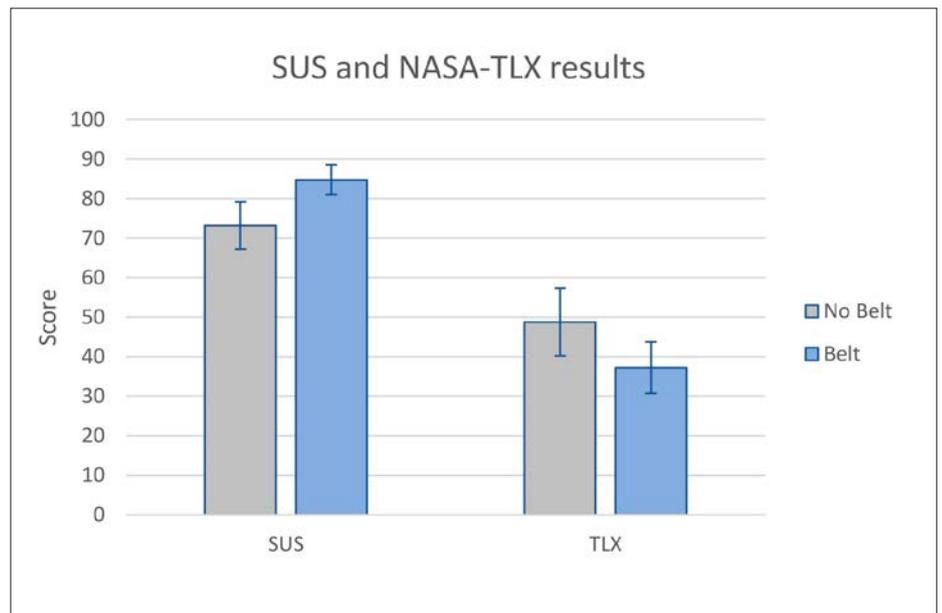


Abbildung 6: SUS- (höherer Wert bedeutet bessere Gebrauchstauglichkeit) und NASA-TLX- (tieferer Wert bedeutet tiefere kognitive Arbeitsbelastung) Resultate

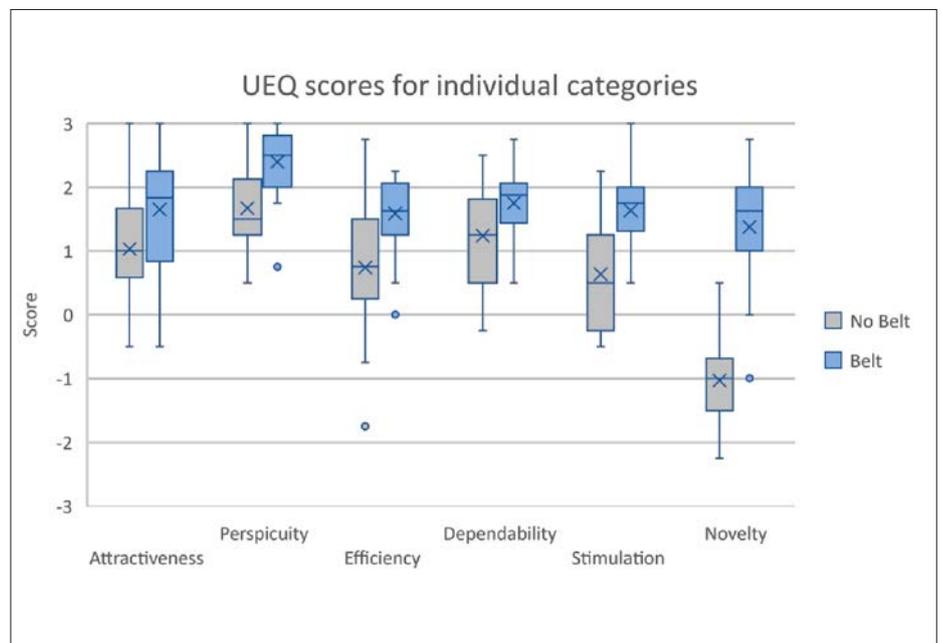


Abbildung 7: UEQ-Resultate, aufgeteilt in die sechs Unterkategorien (x = Mittelwert, — = Median)

Präferenz. Der am meisten genannte Vorteil des taktilen Gürtels war dessen Hilfe beim Fliegen der Kurven, da das Abschätzen der Winkel ohne den Gürtel als schwierig eingestuft wurde. Ebenfalls häufig genannt wurde die Hilfe der Vibrationssignale beim Suchen nach den Zielobjekten. Eine Mehrheit der Teilnehmer gab an, dass sich ihr Suchverhalten zwischen den beiden Flügen aufgrund der Assistenz durch den Gürtel unterschieden hatte. Ohne die Unterstützung durch die Vibrationssignale mussten diese Teilnehmer ihren Blick deutlich weiter horizontal schweifen lassen und die Umgebung breiter absuchen. Wenn sie den Gürtel trugen, halfen dessen Signale dabei, die grobe Richtung zum nächsten Objekt sofort zu identifizieren. Der am häufigsten genannte Nachteil war die mit acht verschiedenen Richtungen als niedrig empfundene Auflösung des taktilen Gürtels.

## 5 DISKUSSION

Die Resultate der Fehlidentifikationen und Umleitungen zeigen, dass der taktile Gürtel das Vertrauen der Teilnehmer in ihre Entscheidungsfindung deutlich verbesserte. Dies wurde auch in den Interviews am Ende des Experiments in vielen Fällen erwähnt. Bei Flügen mit dem Gürtel musste kein Teilnehmer umgeleitet werden, während es ohne Gürtel zu zehn solcher Umleitungen kam. Dies deutet auch auf eine Zunahme der Flugsicherheit hin, da irrtümlicherweise identifizierte Objekte beim Sichtflug zu verpassten Anflügen, Komplikationen mit dem restlichen Flugverkehr oder zu Überflügen von Lärmschutzbereichen führen können. All diese Fälle würden zudem zu erhöhten Kosten oder Geldbußen führen.

Während die Teilnehmer mit dem taktilen Gürtel auch signifikant weniger Zeit benötigten, um ihre Flüge erfolgreich zu beenden, sollte dieses Resultat vorsichtiger evaluiert werden. Die zuvor diskutierten Umleitungen, die bei Flügen ohne Gürtel vorkamen, führten direkt zu einer beachtlichen Zunahme der Flugzeit. Trotzdem konnte der Gürtel sicherlich die Aufmerksamkeit der Teilnehmer auf die korrekten Objekte und damit die richtige Route lenken und daher die Gefahr einer solchen Zeitzunahme stark vermindern.

Bezüglich des räumlichen Bewusstseins konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen Flügen mit und ohne den taktilen

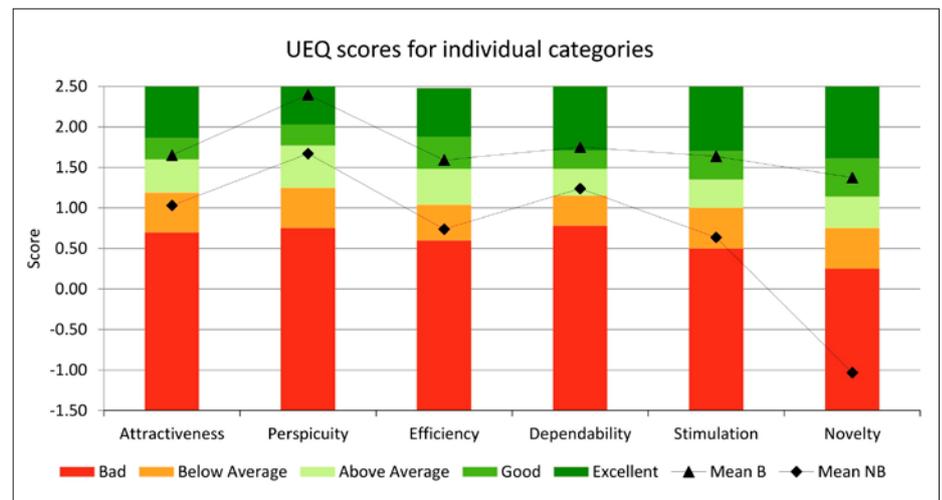


Abbildung 8: Vergleiche der UEQ-Resultate mit der offiziellen UEQ-Testbank (Dreiecke = mit Gürtel, Quadrate = ohne Gürtel)

Gürtel festgestellt werden. Ein möglicher Lerneffekt konnte nicht nachgewiesen werden. Wahrscheinlicher hingegen scheint die Folgerung, dass der Gürtel die Teilnehmer zwar beim Finden der Objekte erfolgreich unterstützte, sie aber durch diesen Fokus auch weniger auf die Umgebung achteten.

Die Resultate des NASA-TLX-Fragebogens deuteten auf eine signifikant geringere kognitive Belastung der Teilnehmer während Flügen mit dem Gürtel hin. Eine häufig genannte Quelle kognitiver Belastung war das Durchführen der Flugmanöver. Ohne Vibrationssignale hatten einige Teilnehmer große Mühe, die zu fliegenden Kurven richtig abzuschätzen. Da der Gürtel die Teilnehmer direkt zu ihrem nächsten Zielobjekt leitete, entfiel diese Belastung nahezu gänzlich, wodurch sich die Piloten wiederum auf das Finden der Objekte konzentrieren konnten. Zusätzlich hatten viele Teilnehmer durch die Unterstützung der taktilen Signale ein gesteigertes Vertrauen beim Identifizieren der Objekte, da sie sich der Richtung, in welcher sie diese finden konnten, stets bewusst waren.

Die Gebrauchstauglichkeit der verglichenen Systeme erreichte in beiden Fällen einen Wert von über 68 Punkten, was allgemein als ein guter Wert angesehen wird. Die Teilnehmer schienen die Aufgaben sicher, effektiv und effizient erledigen zu können, was auch dem vereinfachten Studienaufbau zu verdanken war. Zusätzlich resultierten für die Flüge mit dem Gürtel eine signifikant bessere Gebrauchstauglichkeit als für jene ohne den Gürtel. Dieses

Resultat stimmt mit der Mehrheit der Rückmeldungen aus den Interviews überein. Die Vibrationssignale schienen daher keine zusätzlichen Schwierigkeiten bei der Erledigung der Aufgaben zu verursachen und unterstützten die Teilnehmer, indem sie ihre Blickrichtung mit der Richtung der Signale abgleichen konnten. Dies wurde auch durch die Analyse der Eye-Tracking-Daten bestätigt, die zeigte, dass der Blick der Piloten bei der Verwendung des Gürtels wesentlich fokussierter war. Ein Beispiel dieser Analyse ist in Abbildung 9 zu sehen.

Alle Kategorien, die bezüglich der User Experience gemessen wurden, erhielten signifikant bessere Bewertungen für die Benutzung des Gürtels gegenüber den Flügen ohne dessen Assistenz. Der größte Unterschied besteht bei der Kategorie Originalität. Ohne die Benutzung des Gürtels bestand das System lediglich aus den verbalen Instruktionen des Experimentators, was als un kreativ wahrgenommen wurde. Der taktile Gürtel hingegen schien für die Teilnehmer eine interessante und innovative Ergänzung zu sein. Die besseren Resultate in den Kategorien Durchschaubarkeit und Stimulation deuten auf eine intuitive Handhabung und Interpretation der Vibrationssignale hin. Ohne diese erhielten die Teilnehmer lediglich die verbalen Anweisungen, welche nicht dieselbe Auflösung und Präzision wie die Signale des Gürtels hatten. Zusätzlich bestand die Möglichkeit, dass die Zielobjekte zum Beispiel durch den Bordkompass oder das Chassis verdeckt wurden und daher nicht sichtbar waren. Ohne die Assistenz des Gürtels konnten



Abbildung 9: Visualisierungen der Blicke eines Teilnehmers während Flügen ohne (links) und mit (rechts) dem taktilen Gürtel

sich die Teilnehmer daher nicht sicher sein, ob sie in die korrekte Richtung flogen.

Der vereinfachte Experimentaufbau führte zu Limitierungen. Einige Teilnehmer stellten fest, dass sich die Zielobjekte relativ deutlich von der restlichen Umgebung abhoben. Dies war vor allem bei Teilnehmern mit Erfahrung im Bereich Informatik und Computerhandhabung der Fall. Der beschriebene Effekt war ein Ergebnis der verwendeten Software, die manuell platzierte Objekte stets früher renderte als die übrigen Objekte. Zudem kam es insbesondere bei dünneren Objekten zu Aliasing-Effekten bei der Darstellung, was sie ebenfalls einfacher erkennbar machten.

Da die Vibrationen durch den Experimentator gesteuert wurden, muss davon ausgegangen werden, dass von ihm ebenfalls Effekte eingeführt wurden. Allerdings wurden diese durch bestimmte Vorkehrungen reduziert. Die durch die verhältnismäßig geringe Anzahl Vibrationsmotoren größere Auflösung führte zu vereinfachten Entscheidungen bei der Wahl des korrekten Motors. Ebenso waren die Flugrouten und -manöver einfach gehalten. Da sich viele Teilnehmer überrascht darüber zeigten, dass die Vibrationen manuell und nicht automatisch gesteuert wurden, schienen die Entscheidungen des Experimentators nahe an einer automatisierten Lösung zu liegen. Diese wäre, mit gegebenem Aufwand und zeitlichen Möglichkeiten, trotzdem vorzuziehen, um Effekte durch den Experimentator vollständig zu vermeiden. So müsste die Position des Flugzeugs dem Gürtel übermittelt werden, wodurch dieser die Richtung zu den vordefinierten Zielobjekten selbst

bestimmen und den entsprechenden Motor vibrieren lassen könnte. Die Positionsbestimmung des Flugzeugs könnte in einer realen Anwendung beispielsweise durch den Einsatz eines GNSS-Systems wie GPS gelöst werden. In einer Simulatorstudie müsste die Flugzeugposition aus der Simulatorsoftware ausgelesen werden.

## 6 FAZIT

In dieser Arbeit wurde ein vibrotaktiles Gürtel verwendet, um Piloten räumliche Informationen zu liefern. Absicht dahinter war es, die bereits stark beanspruchten Seh- und Hörsinne zu entlasten und das Potenzial des selten benutzten Tastsinns in der Luftfahrt zu untersuchen. Dazu wurde eine Flugsimulatorstudie durchgeführt, an der sowohl Laien als auch Piloten teilnahmen. Neben dem Gürtel trugen die Teilnehmer auch einen Eyetracker, wodurch ihr Fortschritt und Verhalten während des Experiments überprüft werden konnte. Die Aufgabe während der Flüge bestand darin, das Flugzeug auf einem vorgegebenen Kurs zu halten und dabei nach bestimmten Objekten in der Umgebung zu suchen, wobei die Vibrationssignale des Gürtels die Richtung zum nächsten Objekt angaben.

Die Resultate zeigen signifikante Verbesserungen einiger Leistungsindikatoren, wenn die Teilnehmer durch den Gürtel unterstützt wurden. So fanden sie die Objekte signifikant schneller und machten auch deutlich weniger Fehler bei der Objektsuche. Zudem erachteten sie ihre kognitive Belastung während der Flüge mit dem Gürtel als signifikant geringer. Die Auswertungen von Fragebögen ergaben zusätzlich

sehr gute Ergebnisse in den Bereichen Gebrauchstauglichkeit und User Experience, wenn der Gürtel verwendet wurde. Die überwiegende Mehrheit der Teilnehmer bevorzugte das Fliegen mit der Unterstützung des Gürtels, da dieser sowohl das Fliegen von Manövern als auch den Suchvorgang erleichterte. Das räumliche Bewusstsein der Teilnehmer mit und ohne Gürtel wurde durch die Anfertigung von Skizzen ihrer Flugroute gemessen. Dabei konnten keine signifikanten Verbesserungen oder Unterschiede festgestellt werden.

Das Experiment zeigte, dass die Verwendung eines vibrotaktiles Gürtels im Cockpit eine vielversprechende Möglichkeit der Informationsübermittlung darstellt. Für den gewählten Anwendungsbereich konnte aus den Resultaten aufgrund der gesteigerten Effizienz und geringeren Fehleranfälligkeit der Piloten eine potenzielle Zunahme der Flugsicherheit gezeigt werden. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Resultaten von Forschung mit taktilen Signalen in anderen Anwendungsbereichen. Die Nutzung des Tastsinns und taktiler Signale in komplexen Aufgaben wie der Fliegerei wurde in der Literatur als unzureichend bemängelt (Burke et al. 2006, McGuirl & Sarter 2001). Daher trägt diese Arbeit dazu bei, diese Wissenslücke weiter zu schließen.

## 7 AUSBLICK

Die Resultate der Studie deuten auf ungenutztes Potenzial bei der Verwendung taktiler Signale in der Luftfahrt hin. Dabei wurde der Experimentaufbau und -inhalt jedoch bewusst vereinfacht, um ein breiteres Teil-

nehmerfeld innerhalb des gegebenen Zeitrahmens und bei gegebenen Einschränkungen zu ermöglichen. Es besteht daher eine Vielzahl von Möglichkeiten, die gewonnenen Erkenntnisse zu überprüfen und insbesondere weiterzuverwenden sowie auf komplexere Niveaus auszubauen.

Um repräsentativere Resultate für die Flugindustrie zu erhalten, wäre eine fortführende Studie mit ausgebildeten oder auszubildenden Piloten ein logischer nächster Schritt. Dabei sollte insbesondere der Anwendungsbereich der taktilen Signale angepasst werden. So könnten die Vibrations-signale zum Beispiel verwendet werden, um Piloten auf eine nahe liegende Luftraumgrenze hinzuweisen oder sie vor deren Überquerung zu warnen. Dies wäre aufgrund des unsichtbaren, rein virtuellen Daseins von Lufträumen besonders hilfreich und wurde als potenzieller Anwendungsbe-reich des vibrotaktilen Gürtels von Studien-teilnehmern mit Pilotenlizenz erwähnt.

Weiterhin könnte die stark vereinfachte Handhabung des Flugsimulators komplexer gestaltet werden. Dies würde es erlauben, die wesentlich facettenreicheren Aufgaben der Piloten im Cockpit besser zu simulieren und das benötigte Multitasking sowie Ver-walten von Prioritäten in die Studie einflie-ßen zu lassen. In dieser Arbeit mussten die Teilnehmer lediglich zwei Aufgaben gleich-zeitig erledigen – das Suchen nach Objek-ten sowie das Fliegen des Flugzeugs. Flü-ge in der Nacht oder bei schlechtem Wet-ter sowie in der Nähe von bergigem Terrain würden beide Aufgaben schnell deutlich schwieriger machen. Mit weiteren möglichen Ablenkungen wie das Reagie-ren auf Alarmer, Störungen oder benötigter Kommunikation könnten die kognitive Be-lastung der Teilnehmer zusätzlich erhöht und die Auswirkung des vibrotaktilen Gür-tels unter realistischeren Umständen unter-sucht werden. Ebenso könnten die Auswir-kungen auf den Hörsinn in den Fokus rü-

cken, da diese in der vorgestellten Studie kaum getestet wurden. Lediglich die ge-sprochenen Anweisungen des Experimen-tators mussten über diesen Sinn verarbeitet werden.

Die vorgestellte Ausrüstung könnte wei-ter verbessert oder mit anderem Zubehör verglichen werden, was den Fokus ver-mehrt auf die User Experience und Ge-brauchstauglichkeit legen würde. Vibrati-onssignale von einem Gürtel haben den Vorteil, dass sie die gesamten 360° in der horizontalen Ebene abdecken können. Die vertikale Komponente ist damit jedoch kaum zu berücksichtigen. Dafür könnten eingenähte Vibrationsmotoren in Westen oder in Flugzeugsitzen dienen, deren Kom-bination mit dem Gürtel untersucht werden müsste.

## Literatur

- Basil, M. D. (2012): Multiple Resource Theory. In: Seel, N. M. (Ed.): *Encyclopedia of the Sciences of Learning*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6\\_25](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6_25).
- Bolton, M. L.; Bass, E. J. (2007): Comparing perceptual judgment and subjective measures of spatial awareness. In: *Applied Ergonomics*, 40, S. 597-607.
- Burke, J. L.; Prewett, M. S.; Gray, A. A.; Yang, L.; Stilson, F. R. B.; Covert, M. D.; Elliot, L. R.; Redden, E. (2006): Comparing the Effects of Visual-Auditory and Visual-Tactile Feedback on User Performance: A Meta-analysis. In: *ICMI '06: Proceedings of the 8th International Conference on Multimodal Interfaces 2006*. Association for Computing Machinery, New York, S. 108-117.
- De Vries, S. J.; Erp, J. B. F. van; Kiefer, R. J. (2007): Direction coding using a tactile chair. In: *Applied Ergonomics*, 40, 477-484.
- Endsley, M. R. (1995): Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. In: *Human Factors Journal*, 37, S. 32-64.
- Erp, J. B. F. van; Kroon, L. C. M.; Mioch, T.; Paul, K. I. (2017): Obstacle Detection Display for Visually Impaired: Coding of Direction, Distance, and Height on a Vibrotactile Waist Band. In: *Frontiers in ICT*, 4/2017.
- Gardony, A. L.; Taylor, H. A.; Brunyé, T. T. (2016): Gardony Map Drawing Analyzer: Software for quantitative analysis of sketch maps. In: *Behavior Research Methods*, 48, S. 151-177.
- Gkonos, C.; Giannopoulos, I.; Raubal, M. (2017): Maps, vibration or gaze? Comparison of novel navigation assistance in indoor and outdoor environments. In: *Journal of Location Based Services*, 11/2017, S. 29-49.
- Ho, C.; Nikolic, M. I.; Sarter, N. B. (2001): Multimodal information presentation in support of timesharing and effective interruption management. In: *20th Digital Avionics Systems Conference 2001*, S. 5D2/1-5D2/8.
- McGuirl, J. M.; Sarter, N. B. (2001): Presenting in-flight icing information: A comparison of visual and tactile cues. In: *20th Digital Avionics Systems Conference, 2001*, S. 2A2/1-2A2/8.
- Quak, M.; London, R. E.; Talsma, D. (2015): A multisensory perspective of working memory. In: *Frontiers in Human Neuroscience*, 9/2015.
- Rudi, D. (2019): Enhancing Spatial Awareness of Pilots in Commercial Aviation. Dissertation, ETH Zurich, 2019.
- Tsukada, K.; Yasumura, M. (2004): ActiveBelt: Belt-Type Wearable Tactile Display for Directional Navigation. In: Davies, N.; Mynatt, E. D.; Siio, I. (Eds): *UbiComp 2004: Ubiquitous Computing*. UbiComp 2004. Lecture Notes in Computer Science, 3205. Springer, Berlin/Heidelberg, S. 384-399.
- Wickens, C. D. (2002): Situation Awareness and Workload in Aviation. In: *Current Directions in Psychological Science*, 11/2002, S. 128-133.
- Ziat, M.; Wagner, S.; Frissen, I. (2016): Haptic Feedback to Compensate for the Absence of Horizon Cues During Landing. In: Bello, F.; Kajimoto, H.; Visell Y. (Eds): *Haptics: Perception, Devices, Control, and Applications*. EuroHaptics 2016. Lecture Notes in Computer Science, 9775. Springer, Cham, S. 47-54.