

- Test von Drohnerdetektionssystemen in der DFS: Testkampagne 2020 in Frankfurt und München
- Clustering Climb Profiles for Vertical Trajectory Analysis
- Monitor-Evaluation – Große Monitore für einen zukünftigen Lotsenarbeitsplatz
- Integration von Remotely Piloted Aircraft Systems – Entwicklung von Standards bei der ICAO





---

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Übersicht der Artikel in diesem Heft .....                                                      | 4  |
| Test von Drohrendetektionssystemen in der DFS: Testkampagne 2020 in Frankfurt und München ..... | 5  |
| Ralf Heidger, Vincent Lambercy & Douwe Lambers                                                  |    |
| Clustering Climb Profiles for Vertical Trajectory Analysis .....                                | 17 |
| Dr. Matthias Poppe & Jörg Buxbaum                                                               |    |
| Monitor-Evaluation – Große Monitore für einen zukünftigen Lotsenarbeitsplatz .....              | 25 |
| Stefan Tenoort & Volker Weinriefer-Hack                                                         |    |
| Integration von Remotely Piloted Aircraft Systems - Entwicklung von Standards bei der ICAO -    | 41 |
| Andreas Udovic                                                                                  |    |
| Impressum .....                                                                                 | 47 |

Die Autoren sind, soweit nicht anders gekennzeichnet, Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der DFS. Die Rechte an den Artikeln liegen bei den jeweiligen Autoren.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichwohl für beiderlei Geschlecht.

---

## Übersicht der Artikel in diesem Heft

### **Ralf Heidger, Vincent Lambercy & Douwe Lambers: Test von Drohnendetektionssystemen in der DFS - Testkampagne 2020 in Frankfurt und München**

URL: <https://d-nb.info/1230491236/34>, Persistent Identifier URN: urn:nbn:de:101:1-2021033111142213553522

Der Artikel beschreibt die Ergebnisse einer vom BMVI 2019 beauftragten Untersuchung verschiedener technischer Lösungen zur Drohnendetektion an großen Flughäfen. Basierend auf einer Marktanalyse und einer technischen Vorab-Evaluation zusammen mit dem Fraunhofer FKIE in Wachtberg wurde von der DFS eine umfassende Machbarkeitsstudie mit Tests in realen Flughafenumgebungen durchgeführt. Der Artikel beschreibt das Vorgehen und die Ergebnisse in Tiefe und gibt einen Ausblick auf weiteren Entwicklungsbedarf.

### **Dr. Matthias Poppe & Jörg Buxbaum: Clustering Climb Profiles for Vertical Trajectory Analysis**

URL: <https://d-nb.info/1230490868/34>, Persistent Identifier URN: urn:nbn:de:101:1-2021033111071983982908

Die Steigprofile von Luftfahrzeugen weisen ein weites Leistungsspektrum in Bezug auf die Steigraten und die Zeit bis zum "Top of Climb" auf und sind schwer zu interpretieren. Diese Studie stellt einen systematischen Ansatz vor, der die im Jahr 2019 gesammelten Steigprofile aller Luftfahrzeugtypen für zwei große deutsche Flughäfen in Cluster mit ähnlichen Leistungsmerkmalen einteilt. Dabei wurde zur Generierung und Analyse der bis zu 16 Cluster der K-Means Algorithmus verwendet. Die Repräsentanten der Cluster können zur Vorhersage von Trajektorienprofilen verwendet werden. Bei korrekter Vorhersage des Clusters ist der mittlere quadratische Fehler der Steigprofile in Flugfläche 250 gleich der Clustervarianz. Durch die Zuordnung in Cluster kann das weite Leistungsspektrum der Steigraten eingeengt und damit die Vorhersage erleichtert werden.

### **Stefan Tenoort & Volker Weinriefer-Hack: Monitor-Evaluation - Große Monitore für einen zukünftigen Lotsenarbeitsplatz**

In dieser Untersuchung wurde ein 43 Zoll-Monitor auf seine Tauglichkeit als Lotsenbildschirm untersucht. Neben der Generierung von Einsparungen durch Monitore mit Standardformaten, besteht das Potential zur Verbesserung von Darstellungsqualität und Ergonomie. Insbesondere mit iCAS als zukünftigem Flugsicherungssystem entstehen gesteigerte Anforderungen an die verfügbare Bildschirmfläche, da zusätzliche Anzeigen, Listen und Eingabemenüs dargestellt werden müssen. Des Weiteren bietet die Integration von derzeit auf mehrere Monitore verteilt dargestellten Daten auf einen großen Bildschirm die Möglichkeit, ein einheitliches Erscheinungsbild aller Anzeigen zu erhalten, das Bedienkonzept zu harmonisieren und damit das HMI gebrauchstauglicher und zukunftssicher zu gestalten.

### **Andreas Udovic: Integration von Remotely Piloted Aircraft Systems - Entwicklung von Standards bei der ICAO**

Seit 2008 befasst sich auch die International Civil Aviation Organisation (ICAO) mit dem Thema Remotely Piloted Aircraft System (RPAS). Der Artikel gibt eine Übersicht über die Arbeiten der Unmanned Aircraft System Study Group (UASSG) und des nachfolgenden Remotely Piloted Aircraft System Panel (RPASP) und zeigt die zunehmende Bedeutung dieses Themas für die zivile Luftfahrt auf. Die Arbeiten werden in den Kontext der weiteren weltweiten Aktivitäten eingebunden. Der Ausblick zeigt die geplanten weiteren Arbeiten des RPASP auf.

# Test von Drohndetektionssystemen in der DFS: Testkampagne 2020 in Frankfurt und München

Ralf Heidger, Vincent Lambercy & Douwe Lambers

## Einleitung

Drohnen oder – mit dem korrekten ICAO-Begriff bezeichnete – „unmanned aircraft systems“ (UAS) sind in jüngerer Zeit für Flughäfen sowohl zu einem wertvollen Werkzeug als auch zu einer Bedrohung für den Betrieb geworden. Illegale UAS-Aufstiege haben den Betrieb an Flughäfen unterbrochen und je nach Dauer der Unterbrechung Kosten zwischen 5 und 60 Mio. Euro verursacht (1.000 betroffene Flüge z.B. in Gatwick 2018, siehe [2]). Gleichzeitig werden UAS an Flughäfen zunehmend ganz planmäßig für wertvolle Dienste eingesetzt wie ILS-Monitoring und Vermessung, Überwachung von Baufortschritt, Überprüfung von Runway- und Rollflächen auf Fremdkörper, Überprüfung der Hüllen von Flugzeugen. Des Weiteren entwickeln sie sich vielleicht zu einem neuen Transportmittel wie z.B. „Air Taxis“ für „Urban Air Mobility“ und Passagiertransport zwischen Innenstädten und Flughäfen.

Im Sommer 2019 hat daher nicht unerwartet das BMVI die DFS beauftragt, die Sachlage genau zu prüfen und eine „Roadmap“ zu entwickeln, um die 15 internationalen Flughäfen in Deutschland mit einem geeigneten Drohndetektionssystem (DDS) auszustatten. Die DFS entschied sich, kurzfristig eine Marktanalyse und eine technische Vorab-Evaluation sowie längerfristig eine gründliche Machbarkeitsstudie mit Tests in realen Flughafenumgebungen durchzuführen.

Die Marktanalyse zeigte auf, dass es international bereits weit mehr als 100 Unternehmen gab, von denen mehr als 25% operationelle Installationen für Grenzschutz, Testgebietsüberwachung, Schutz von Gefängnissen, Schutz von militärischen Einrichtungen und Camps sowie einige für die Überwachung von Flughäfen aufwiesen. Auf dem Testgebiet beim Fraunhofer FKIE in Wachtberg wurde ein Interview mit den dortigen Experten und ein Vorabtest mit einem DDS des Instituts durchgeführt, was das Verständnis der DFS für diese Technologie, ihre Komponenten und ihre Möglichkeiten und Grenzen vertiefte (siehe [3]).

## Eine generische Architektur für DDS

In diesem Report wurde deutlich, dass ein DDS mehrere unterschiedliche Sensortechnologien zur Erfassung von Drohnen verwenden muss, da nicht ein einzelner Sensortyp der fraglichen Technologien geeignet ist, alle Arten von Drohnen zu detektieren. Der Umfang dieser Technologien variiert je nach Anwendungskontext, aber für Flughäfen wurden im Wesentlichen identifiziert:

- Phased-array Primärradar – entweder vom Typ Puls-Doppler-Radar oder FMCW-Radar,
- Radiofrequenz-Detektion (RF),
- Elektrooptische bzw. infrarotbasierte Videotechnik, ggf. kombiniert und zusätzlich mit lasergestützter Entfernungsmessung versehen.

Akustische Sensoren werden im Umfeld eines Flughafens wegen ihrer kurzen Reichweite und dem Lärmpegel vor Ort durch die Flugzeuge als nicht einsetzbar eingestuft. Passivradar bzw. „passive coherent location“ (PCL) hingegen ist eine vielversprechende Technologie, die vielleicht in Zukunft die Detektion und Lokalisation von Drohnen mit Hilfe der Nutzung von dritten Beleuchtern wie DAB, DVB und u.U. auch Mobilfunk ermöglicht. Sie spielt aber in den aktuellen Tests und DDS-Installationen noch keine Rolle.

Zu jedem Sensor gehört dabei die sensorspezifische Datenverarbeitung wie Signaldetektion, Datenextraktion, Zeitstempelung, Filterung, Triangulation oder Multilateration bei RF bzw. Lokalisation bei den anderen Sensortypen, Formatkonversion, Kommunikation mit der Zentraleinheit, ggf. lokales Recording und weitere Begleitfunktionalitäten.

RF-Detektion ist nun möglicherweise nicht geeignet für alle UAS, z.B. für solche, die Non-Standard-Funkfrequenzen und -protokolle für Datenübertragung zwischen UAS und RPS verwenden, oder UAS, die autonom arbeiten und überhaupt keine Funksignale abgeben. Radar ist möglicherweise nicht geeignet, um UAS im tangentialen Flug ohne Dopplerverschiebung oder schwebende UAS vor einem störenden Hintergrund wie z. B. Vegetation zu erkennen, oder um kleine UAS von Vögeln zu unterscheiden. Die optische Erkennung

kann in Bezug auf Reichweite und Auflösung unzureichend sein oder zu Fehlklassifizierungen führen.

Grundlegend für das DDS ist daher das Vorhandensein einer zentralen Multisensor-Datenfusion (MSDF), die den Plot- oder Track-Input der einzelnen Sensoren verarbeitet, um

- sie zu einer gemeinsamen besten Schätzung des Trackzustands zu fusionieren,
- fehlende Erfassungen von einem bestimmten Sensor zu kompensieren,
- alle verfügbaren Merkmalsdaten eines Objekts zum Systemtrack zu kombinieren,
- erkannte Tracks mit Trackquellen kooperativer Ziele zu vergleichen (s. UTM, ATM),
- eine bestmögliche Objektklassifizierung zu unterstützen,
- Trackaktualisierungen für Lagedarstellungen in HMI-Clients, oder für Interventionsmodule (Jammer, Netguns, HPEM, u.a.) bereitzustellen,
- relevante Daten an die einzelnen Sensorverarbeitungseinheiten zur Verbesserung der Detektion und Lokalisation zurückzugeben.

Die Zielklassifizierung kann evtl. bereits auf den Trackdaten der einzelnen Sensoren berechnet werden, es erscheint aber sinnvoller, sie auf der MSDF-Ausgabe

aufzubauen. Relevante Faktoren für die Zielklassifizierung, die von den Anbietern in den Experteninterviews bei unseren DDS-Tests [5] genannt wurden, umfassen Objektgröße, RF-Emission, Geschwindigkeit, Bewegung, Objektform, Varianz der Geschwindigkeit, Varianz der Bewegung, Dopplerpräsenz, Mikrodopplerpräsenz – also Parameter, die am besten auf MSDF-Ebene bekannt sind.

Im Prinzip kann eine solche MSDF auch direkt ATC-Sensordaten von ATM-Systemen und Sensordaten von kooperativen Drohnen integrieren, aber das beinhaltet eine weitere erhebliche Komplexität. So ist es vielleicht der wirtschaftlichere Ansatz, sie stattdessen mit einem UTM-System zu integrieren, um zu identifizieren, welche der erkannten Spuren zu bekannten bemannten oder unbemannten Flugzeugen gehören [2], [6]. Ein solches UTM-System existiert bereits in der DFS, und das Unternehmen pflegt und erweitert es, so dass eine Schnittstelle zu jedem potentiellen DDS-Standort in Deutschland möglich ist.

Das Interesse der DFS an DDS umfasst das Erkennen, Verfolgen, Anzeigen und Warnen, nicht aber das Eingreifen. Das Eingreifen wird als polizeiliche Aufgabe betrachtet, die von der zuständigen Behörde ausgeführt wird. Dennoch wird sie als Teil des DDS aufgefasst, aber diese Funktion kann einfach durch Übertragung der DDS-Tracks an Interventions-HMIs oder verwandte C<sup>3</sup>-

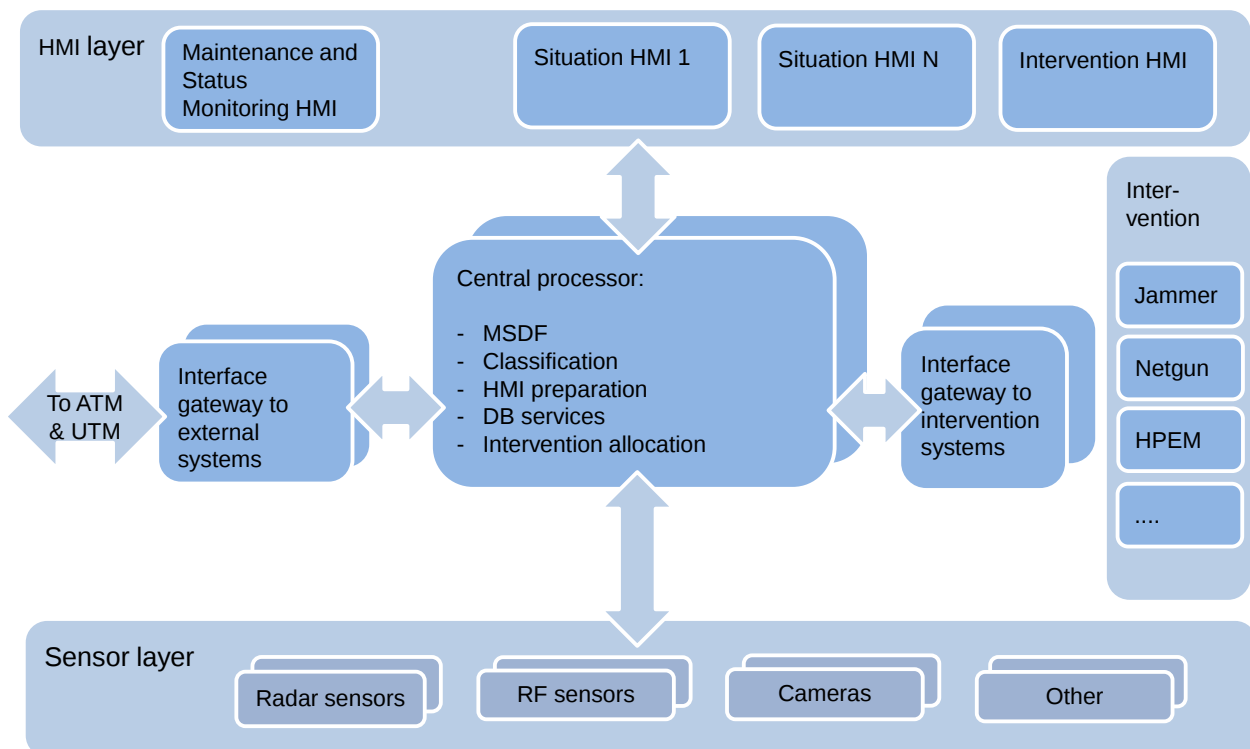


Abbildung 1: Generisches Modell einer DDS-Architektur.

Systeme erfüllt werden. Die Eingriffszuweisung kann durch die Trackauswahl erfolgen, die direkt aus der zentralen MSDF-Trackverarbeitung abgeleitet werden kann.

Alles in allem ergibt sich daraus die in Abbildung 1 gezeigte, generische DDS-Architektur, die zur Grundlage unserer weiteren Überlegungen wurde.

Auf der Grundlage dieses Modells konnten wir Fragen an bestehende, zu testende DDS ableiten wie

- Ist diese Struktur erfüllt?
- Sind die identifizierten Module vorhanden?
- Sind die identifizierten Funktionen vorhanden?
- Sind die identifizierten Schnittstellen vorhanden?
- Ist die inhärente Abstraktion zwischen Daten (Tracks) und Darstellung (HMI) vorhanden?

Diese Fragen bildeten den Leitfaden für unsere Experteninterviews mit jedem ausgewählten Anbieter sowie für die Gestaltung unserer Tests und Beobachtungen.

## Testmethodik

Wie oben hergeleitet wurde die Fähigkeit, Drohnen zu tracken, zu einem zentralen Thema unserer DDS-Testkampagne (mehr Details in [4]). Inspiriert von der Surveillance- und Tracking-Evaluierungsmethodik im ATM (siehe [7] für PHOENIX-Tests und [8] für SASS-C von Eurocontrol), differenzierten wir die typischen Surveillance- und Tracking-Verarbeitungsschritte:

- Erkennung der Anwesenheit einer Drohne
- Lokalisierung einer Drohne
- Tracking einer Drohne (mit einem Sensor)
- MSDF-Tracking einer Drohne (mit allen möglichen Sensoren)
- Klassifizierung einer Drohne bzw. eines getrackten Objekts
- Geeignete Bereitstellung für Lagedarstellung und für Fremdnutzer
- Darstellung einer Lage bzw. Situationsanzeige in einem geeigneten HMI.

In der Folge umfasste die Methodik dann

- die Verwendung von vorprogrammierten UAS-Szenarien, die für jeden Testlauf mit einem DDS wiederholt werden,
- die Verwendung eines fest ausgewählten Satzes von Drohnen unterschiedlicher Größe in einem sich wiederholenden Muster

- die Verwendung von festen Szenario-Standorten in Frankfurt und München für jeden Testlauf mit einem DDS
- GPS-Logger an jeder verwendeten Drohne lieferten eine "Ground Truth" (= wahrer Referenztrack)
- Visuelle Beobachtung der DDS-Anzeige durch instruierte Beobachter
- Videoaufzeichnung des DDS
- Integration aller Daten in ein DDS-Missionskontrollsystem (MCT)
- Qualitativer Vergleich der DDS-Tracklogs (auf MSDF-Ebene) gegen die „Ground Truth“ (GPS)
- Quantitativer Vergleich der DDS-Tracklogs (auf MSDF-Ebene) gegen die „Ground Truth“ (GPS)
- Bewertung der HMIs gegen HMI-Standards für C<sup>3</sup>-Systeme

Wir haben uns sodann für 6 Anbieter entschieden, davon 3 am Flughafen Frankfurt und 3 am Flughafen München. Für jeden Anbieter wurde der gleiche Gesamttestlauf über 3 bzw. 4 Tage wiederholt. Jeder Testlauf bestand aus dem gleichen Satz von vorprogrammierten UAS-Flügen oder Szenarien, gruppiert in festen Testsegmenten. Diese Segmente waren:

- Schwebeflug eines einzelnen UAS an verschiedenen Orten
- Kombinierte Schwebeflüge von mehreren UAS an diesen verschiedenen Orten
- Flüge mit kombinierten Manövern (Start, Aufstieg, Kreis, Tangentialflug, Radialflug, Zickzackflug tangential, Zickzackflug radial, dann Sinkflug und Landung) in einem vorprogrammierten Szenario,
  - wiederholt für verschiedene Drohnentypen/-größen am gleichen Standort
  - wiederholt an einem 1-2 km entfernten Standort vom Standort des Hauptsensors
  - wiederholt an einem 3-5 km entfernten Standort
  - wiederholt an einem 8 km entfernten Standort
  - wiederholt an einem 10 km entfernten Standort
  - wiederholt an einem 18 km entfernten Standort
- Schwarmflüge mit 2 bis 5 UAS an einem 1-2 km entfernten Standort
  - parallele Radialflüge relativ zu den Sensoren
  - parallele tangentielle Flüge relativ zu den Sensoren
  - konvergierende parallele Radialflüge relativ zu den Sensoren

- divergierende parallele Radialflüge relativ zu den Sensoren
- Nachtfüge mit Nicht-Standard-UAS, d.h. solche die nicht die Standardfrequenzen 2,4 und 5,8 GHz nutzen, des Typs Opterra (Nurflügler-Drohne) entlang der Start- und Landebahn in verschiedenen Höhen zwischen 10 m und 300 m über dem Boden, einschließlich Kurven an den Schwellen der Start- und Landebahn und sowohl gerade Flüge als auch sinusförmige Flüge. Diese UAS benutzen Funkfrequenzen außerhalb der üblichen 2,4 bzw. 5,8 GHz-Bänder, und sind daher für RF-Systeme schwerer oder gar nicht erkennbar.
- Nächtlche Flüge über der Landebahn mit Multikoptern. UAS können aufgrund von Windeinflüssen oder FMS-Spezifika und -Fehlern von den vorprogrammierten Routen abweichen, daher mussten an jeder Drohne im Test individuell zuordenbare GPS-Logger mit einer ID angebracht werden. Diese Logger wurden in Pre-Tests an ganz unterschiedlichen Orten validiert und lieferten dann in den Flughafentests die Flugdaten für die Ground Truth auf SD-Karten. Diese wurden nach jedem Flug ausgelesen und über eine Github-Infrastruktur in die

zentrale Datenbank des DDS Mission Control Tools (MCT) zusammengeführt.

Während die Szenarien geflogen wurden, versuchte das DDS, die Drohnen zu erkennen und zu verfolgen, und die Ergebnisse wurden zeitsynchron in den DDS-Datenbanken protokolliert. Diese Protokolle wurden am Abend eines jeden Testtages über dieselbe Github-Infrastruktur in das DDS-MCT übertragen. Beide Datensätze werden dann einer statistischen Analyse unterzogen. Gleichzeitig beobachteten die menschlichen Beobachter im DDS-Testzentrum die DDS-Situationsanzeigen und protokollierten ihre Beobachtungen in das gleiche DDS-MCT. Das Tool diente als zeitsynchronisierter Eventlogger, und wenn Drohnenpiloten ihre Missionsdaten in den Drohnen aktivierten, dann geschah dies mit demselben Tool, wodurch die Beobachter über die aktuell aktive Mission und die ausgewählte Drohne informiert wurden.

Außerdem wurde eine VRR-Infrastruktur an die DDS-Situationsanzeigen angeschlossen. Die Daten der Videoaufzeichnung wurden mit einem Zeitstempel versehen und ebenfalls in die DDS-MCT-Infrastruktur

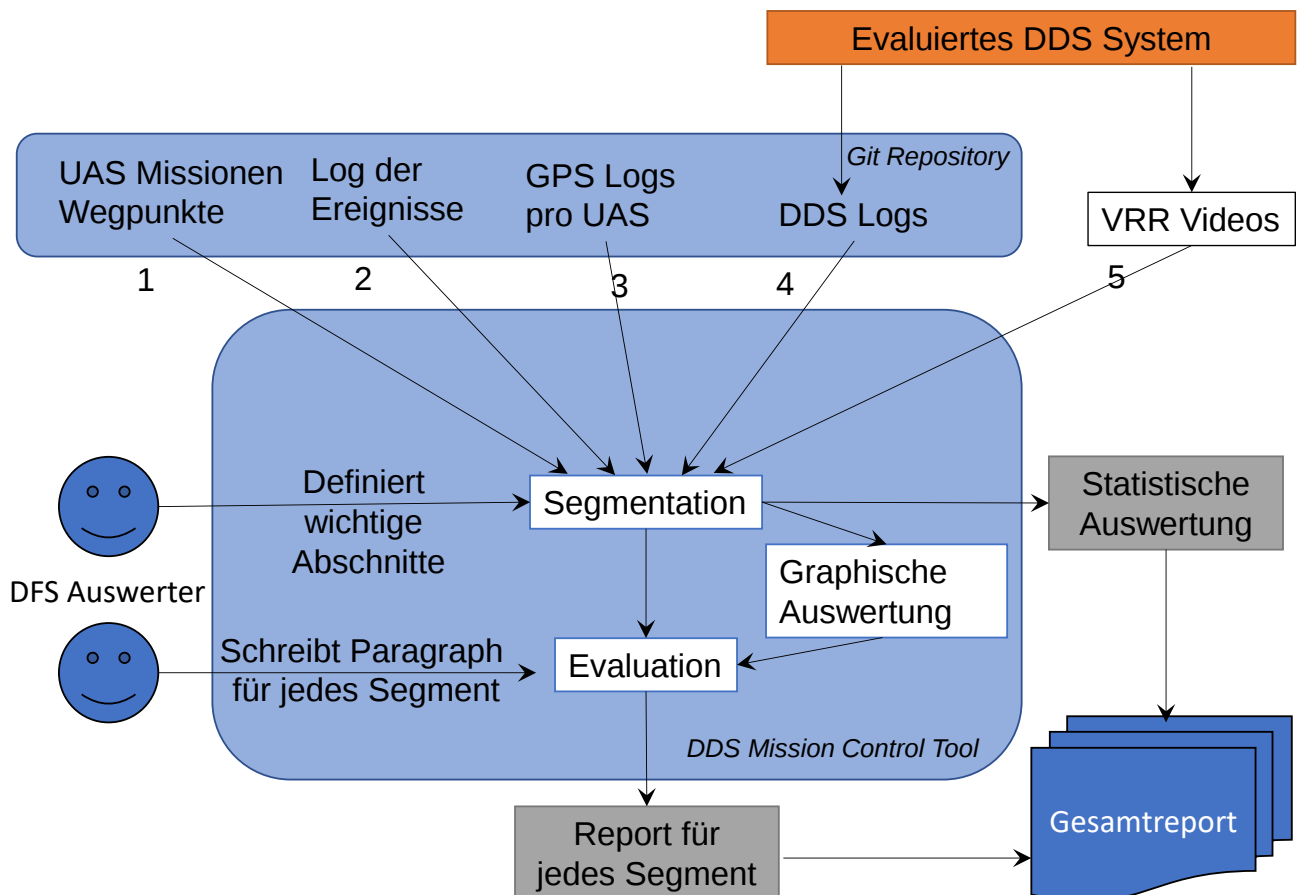


Abbildung 2: Angewandte Testmethodik.

eingespeist. Dies ermöglicht die Rekonstruktion durch Missionsauswahl und zeitsynchrone Wiedergabe der geplanten Mission, der GPS-Logdaten, der DDS-Logdaten und der zugehörigen DDS-Videosequenzen. Die gleichzeitige Darstellung der geplanten, geflogenen und erkannten Routen bietet eine grafische Analyse der Unterschiede zwischen Missionsplan, GPS-Log, DDS-Log und DDS-Video. Dieser Ansatz erlaubt es, aus der visuellen Inspektion Hypothesen abzuleiten, die dann durch die statistische Datenanalyse bestätigt oder widerlegt werden. Mit dieser quantitativen Analyse war das Fraunhofer FKIE-Institut aus Wachtberg beauftragt.

Das Diagramm in Abbildung 2 stellt den gesamten Ansatz dar.

## Standorte, Drohrentypen und Missionsplanung

Flughäfen sind stark regulierte Umgebungen aufgrund der bestehenden hohen Sicherheitsrisiken, die sich hier auf eine Infrastruktur konzentrieren. Für die Standortwahl der Testflüge war es notwendig, dass es keine Konflikte mit An- und Abflugrouten, Hubschrauber Routen, Fehlanflugverfahren, keine Konflikte mit Sperrgebieten und keine oder zumindest minimierte Konflikte mit

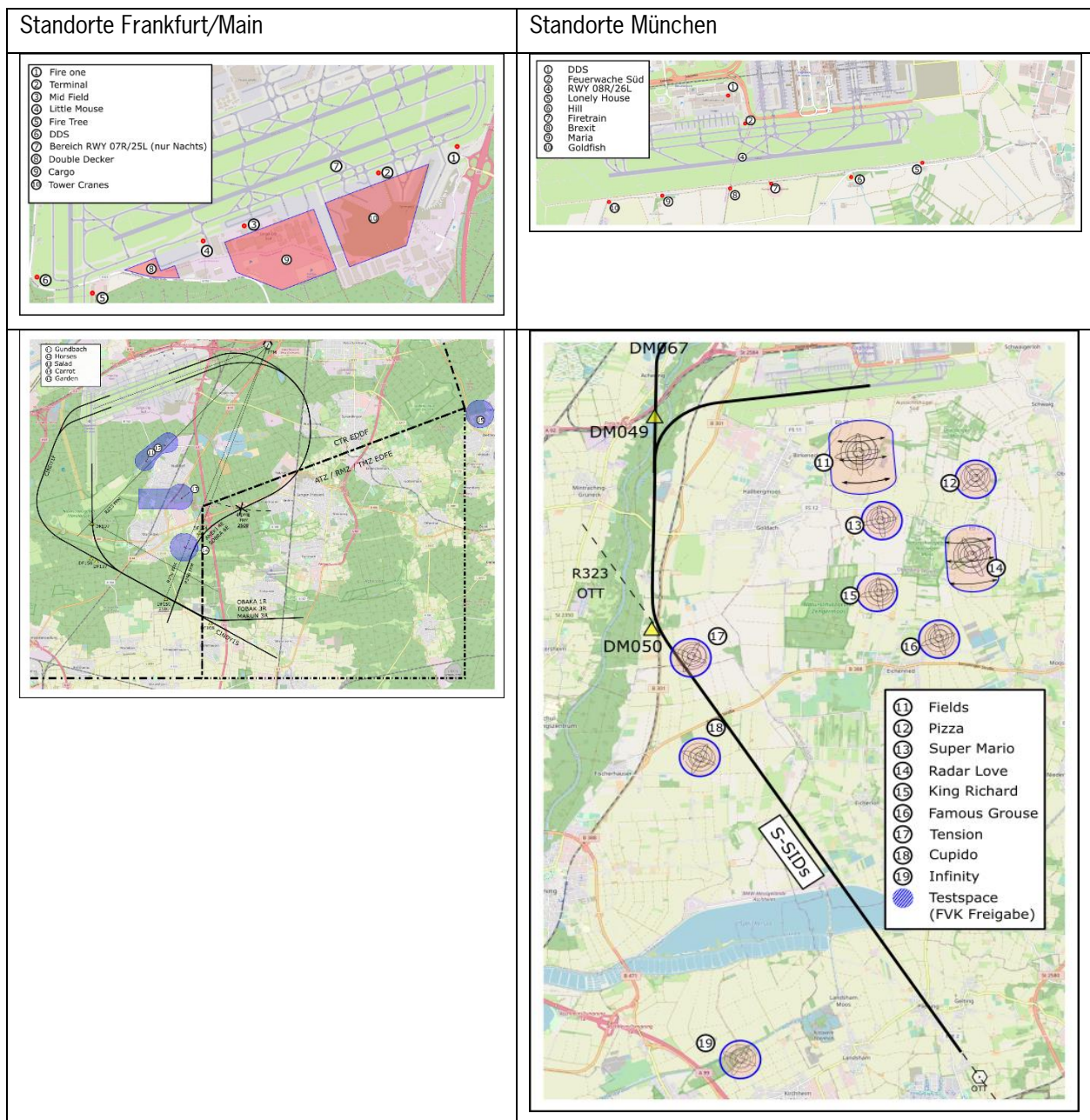


Abbildung 3: DDS Teststandorte auf den Flughäfen Frankfurt und München sowie in außerhalb liegenden Gebieten südlich, bzw. in Frankfurt auch östlich.

Flugverbotszonenanforderungen für Drohnen gibt. Diese Voraussetzungen wurden in einem ATC-Sicherheitsgutachten bewertet [1]. Bei der Auswahl des Teststandorts spielten auch Naturschutzgebiete eine Rolle. Gleichzeitig war es notwendig, dass der Test inmitten des Flughafenbetriebs stattfand, um die Präsenz des Flughafenverkehrs und der Infrastruktur als Kontextfaktoren (Gelegenheitsverkehr, verschiedene HF-Emissionen, Kräne, andere Metallinstallationen, reflektierende Gebäude usw.) zumindest teilweise abzudecken. Wir haben uns dafür entschieden, den Erfassungsbereich auf einen 90°-Sektor von einem Mittelpunkt des Flughafens in Richtung Süden zu beschränken, der einen Teil der Start- und Landebahn und des Rollbahnsystems sowie Teile des Flughafenzauns und der südlich angrenzenden Umgebung abdeckt. Es zeigte sich, dass dies sowohl in Frankfurt als auch in München praktikabel war. Die Standorte außerhalb der Flughäfen mussten die geforderten Abstandsintervalle einhalten und mit PKW und LKW erreichbar sein, ohne mit Flugverbotszonen für UAS zu kollidieren. So wurde die Standortwahl zu einer recht komplizierten Planungsaufgabe, und schließlich erhielten wir die in Abbildung 3 dargestellten Standortpläne für Frankfurt und München.

Bei dieser Komplexität war es von entscheidender Bedeutung, dass wir mit unserem DDS-MCT in der Lage waren, alle UAS-Programmierungen im Playback wiedergeben, kontrollieren und korrigieren zu können. Anstatt jede einzelne Wegpunkt-Koordinate zu bearbeiten, die in der Größenordnung von Tausenden lagen, bearbeiteten wir z.B. nur die Startpunkte, und der Rest wurde automatisch aktualisiert.

Die Teststandorte auf dem Flughafen wurden hauptsächlich für Schwebetests und der Bereich der Start- und Landebahn für die nächtlichen Flüge verwendet, während die Standorte außerhalb der Flughäfen für Kombinationen von Manövern in verschiedenen Entfernungen und mit verschiedenen Drohnentypen verwendet wurden. Die verwendeten UAS-Typen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Die Missionsprogrammierung wurde im DDS-MCT durchgeführt, mit Formatkonvertierung in die spezifischen UAS-FMS-Formate wie in Tabelle 1 gezeigt. Abbildung 4 zeigt nun typische Screenshots des DDS-MCT, das in der Planung Verwendung fand.

Zunächst muss die Mission mit ihren Wegpunkten mit elementaren Befehlen konstruiert werden, ausgehend von einem Startpunkt mit Breiten- und Längenkoordinaten. Dann kann die konstruierte Mission

auf einem Geo- oder Sat-Kartenhintergrund visualisiert und ein simulierter „UAS-Flug“ durchgeführt werden. Danach kann eine Gegenprüfung gegen Geofences und/oder Beschränkungen der Flugparameter (Entfernung, Sichtwinkel) und Beschränkungen der FMS-Formate durchgeführt werden (maximale Entfernungen, Beschränkungen in Koordinaten usw.), und schließlich kann die Reihenfolge der konstruierten Missionen pro Tag und in der gewünschten Reihenfolge sortiert werden.

Tabelle 1: Eingesetzte UAS-Typen.

| FMS Format | Variante | UAS-Typ               |
|------------|----------|-----------------------|
| Litchi CSV | klein    | DJI Mini Mavic        |
| Litchi CSV | mittel   | DJI Mavic             |
| Litchi CSV | groß     | DJI Phantom 4         |
| CCC        | klein    | Yuneec Typhoon H      |
| CCC        | mittel   | Yuneec H520           |
| CCC        | groß     | Yuneec H920           |
| QGC plan   | klein    | Race Minikopter       |
| QGC plan   | mittel   | E-Flite Opterra klein |
| QGC plan   | groß     | E-flite Opterra groß  |

### Allgemeine Testergebnisse

In sechs Testläufen wurden etwa 600 vorprogrammierte UAS-Flüge durchgeführt, im Durchschnitt etwa 100 pro Testlauf, inkl. Kalibrierungsflüge in der jeweiligen Vorwoche der Tests. Variationen ergaben sich, weil wir Tests bei größeren Entfernungen übersprungen haben, wenn keine Erkennung mehr stattfand. Zusätzliche, wiederholte oder modifizierte Flüge wurden ebenfalls auf der Grundlage früherer Beobachtungen durchgeführt.

Insgesamt wurden von den menschlichen Beobachtern mehr als 6000 Beobachtungen in das DDS-MCT eingetragen, im Durchschnitt etwa 1000 pro Testlauf. Aus der Analyse der im DDS-MCT digital erfassten Beobachterprotokolle haben wir die folgenden allgemeinen Erkenntnisse gewonnen (siehe dazu [5], S. 80-88, sowie nach Herstellern S. 90-215). Die Beobachtungen mit den beteiligten Radarsensoren waren wie folgt:

- Die Radarerfassungen waren am besten zwischen 0,7 und 5 km Entfernung. Nur ein Radartyp konnte Plots bis zu 8 km erfassen, war aber nicht in der Lage, stabile Tracks zu halten. Die gewünschte Abdeckung

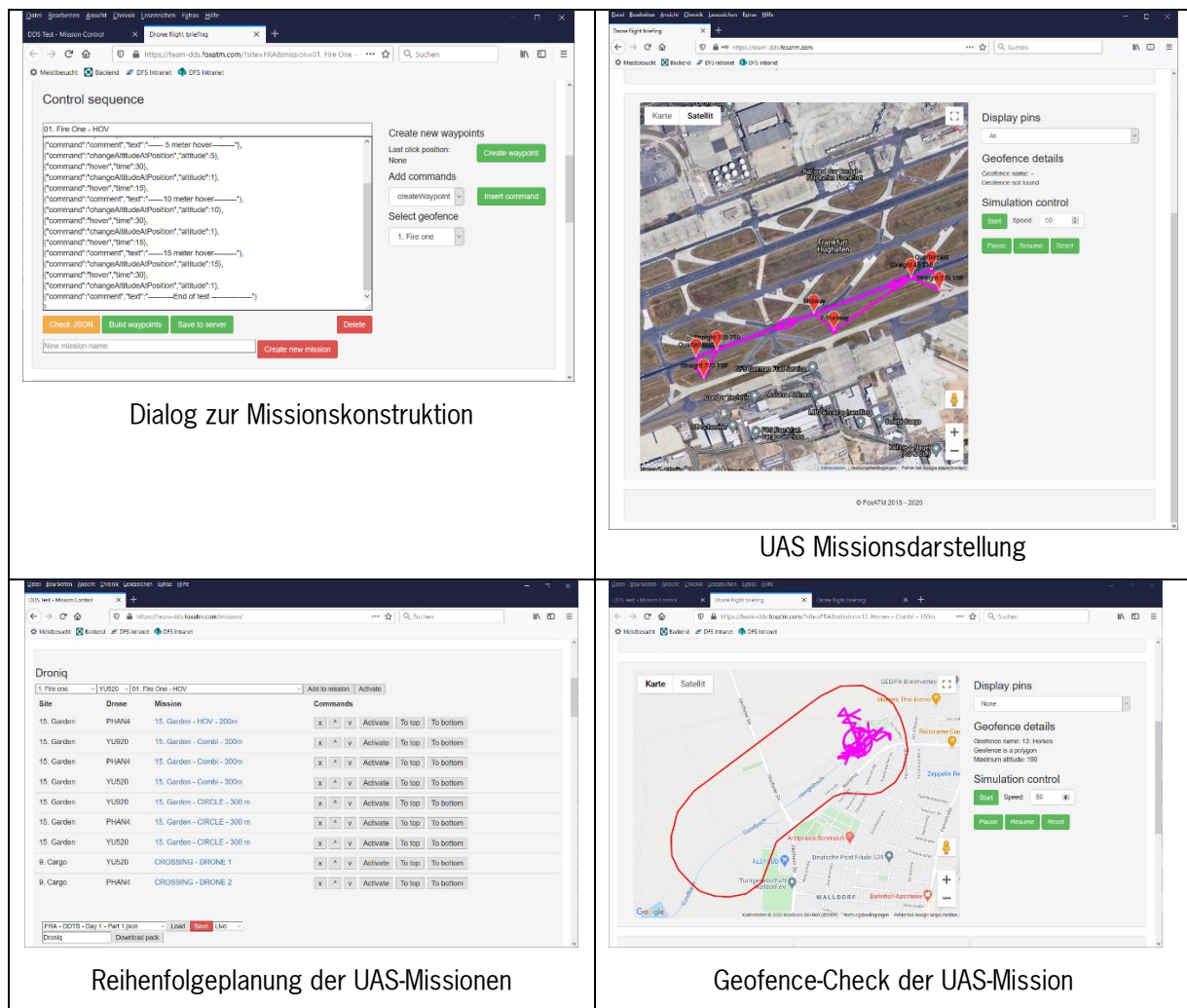


Abbildung 4: Screenshots des DDS Mission Control Tools.

von 18 km oder 10 NM konnte mit keinem Radar erreicht werden.

- Die Radarerfassung lieferte eine sehr unübersichtliche Situationsdarstellung mit vielen Falschzielen (mehr als 50 %), einer Mehrzahl falscher Klassifizierungen (mehr als 75 %) und vielen Spurabbrüchen (Trackkontinuität von mehr als 60s in weniger als 50 % der erstellten Tracks).
- Bei den nächtlichen Flügen mit den Nicht-Standard-Drohnen, die in 1-3 km Entfernung vom Radarsensor stattfanden, waren die Erkennung, Lokalisierung und Trackhaltung vergleichsweise besser.
- Die Positionsgenauigkeit der Trackerstellung und -aufrechterhaltung ist weiter unten dargestellt. Der „visuelle Eindruck“ auf den DDS-Displays und im DDS-MCT zeigt eine Genauigkeit von ca. 50-100 m, die mit der Entfernung des Objekts vom Sensor korreliert und mit vielen Ausreißern verbunden ist.

- Die Konfigurierbarkeit der DDS-Radare auf Flughäfen steht erst am Anfang der notwendigen technischen Entwicklung. Sie ist derzeit nicht ausreichend und weit weniger ausgearbeitet als z.B. die SMGCS-Sensor- und Tracking-Konfigurierbarkeit, die die DFS mit dem SMGCS-Programm auf den deutschen Flughäfen seit ca. 2001 etabliert hat (siehe [7] für Beispiele). So ist z. B. eine spezifische, nach Bereichen (Start- und Landebahn, Rollwege) definierte Verarbeitung noch nicht verfügbar.

- Die Anforderungen des BMWI an die Erfassungsreichweite (10 NM) können nicht mit einem Radar allein erfüllt werden; es werden viele Sensoren benötigt.

Die RF-Erkennung lieferte ebenfalls einige interessante Ergebnisse:

- Es wurden im Test vier Arten von RF-Erkennungen beobachtet:

- eine reine Erkennung der UAS-Präsenz ohne Lokalisierung,
- Peilung mit Peil- und Winkelunsicherheit, in Kombination von mehreren Richtungsfeststellungen eine Triangulation mit einer Positionsschätzung und einer Ellipse der Unsicherheit der geschätzten Drohnenposition,
- eine Multilateration mit einer Verarbeitung einer „time difference of arrival“ und anschließender hyperbolischer Lokalisierung,
- Dekodierung des RF-Signals und Extraktion der Telemetriedaten aufgrund der herstellerspezifischen Kenntnis der gesendeten Signale (DJI Aeroscope), jedoch mit entsprechender Einschränkung auf die herstellerspezifischen Drohnentypen.
- Die RF-Erkennung erwies sich nur bei einer bestimmten Verarbeitungsart (Multilateration vs. Triangulation) als recht genau. Mit Multilateration waren Genauigkeiten unter 50 m möglich, in den besten Fällen sogar zwischen 5 und 20 m. Man muss allerdings auch in Rechnung stellen, dass das betreffende System – DDS 2 – mit 9 Stück rund um den Flughafen verteilt in einer Entfernung bis zu 6 km deutlich mehr RF-Detektoren aufwies als die übrigen Setups.
- Der RF-Beitrag bei Triangulationssystemen beschränkte sich oft nur auf die Erkennung, ohne Lokalisierung. In den Lokalisierungsfällen war die Genauigkeit schlechter als 100 m. In diesen Fällen trug die RF-Erkennung nicht zur Verbesserung der Positionsschätzung bei, und ihr Wert war auf die Klassifizierung als Drohne beschränkt.
- Die RF-Erkennung funktioniert nicht mit Nicht-Standard-UAS. Eine erweiterte Erkennung für einen größeren Bereich von Frequenzbändern bringt viele weitere Herausforderungen mit sich, aufgrund der möglichen Anzahl von Bändern, der Echtzeitanforderungen, der Notwendigkeit einer zumindest teilweisen Dekodierung des Signals und der Menge der zu verarbeitenden Daten. Die Erkennung und Kenntnis von Protokollen ist notwendig, da einige Drohnen im gleichen Frequenzband wie WiFi-Sender arbeiten.
- Die RF-Erkennung mit Multilateration wird ihren Beitrag aufgrund ihrer ziemlich genauen Lokalisierung für bekannte Frequenzbänder übernehmen. Triangulation liefert nur nützliche Lokalisierungen in der unmittelbaren Umgebung unter 500m. RF-Detektion trägt zur korrekten Klassifizierung bei und weist eine sehr geringe Rate an falschen Zielen auf. Aufgrund der unbekannten Frequenzen und Protokolle wird es jedoch eine hohe Rate an nicht erkannten Drohnen geben.

- Es wird erwartet, dass viele RF-Sensoren benötigt werden, um eine große, komplexe Struktur wie einen Flughafen abzudecken. Es werden nicht 4-6, sondern realistischerweise mehr als 20 Sensoren sein.
- Die Verarbeitung vieler Sensoren und die Abdeckung von mehr Frequenzbändern wird zu einem hohen CPU-Bedarf führen, ggf. einschließlich KI-Algorithmen für eine schnelle Mustererkennung. Dies könnte nach Cloud-Computing-orientierten Systemarchitekturen verlangen.

Man beachte, dass Drohnen in Zukunft möglicherweise mit LTE- oder 5G-Kommunikation betrieben werden, was es fast unmöglich machen würde, sie von Mobiltelefonen oder anderen IoT-Geräten zu unterscheiden.

Der Einsatz von elektrooptischen und Infrarot-Videokameras im Test lieferte folgende Erkenntnisse:

- Die Videokameras waren immer kombinierte EO- und IR-Kameras, in einigen Fällen ergänzt mit Laserscannern zur Entfernungsbestimmung. Eine "DJI P4"-Drohne war im Bereich von 3,5 und 5 km detektierbar, während die instrumentierte Reichweite bei 14 km liegen soll.
- Das primäre Detektionswerkzeug war in den meisten Fällen Radar oder RF. Die Kamera wurde dann auf die gewählte Spur eingestellt, in einem Fall geschah dies automatisch nach Erreichen eines bestimmten Vertrauensniveaus.
- Die Kameranutzung war hauptsächlich zur Unterstützung des Bedieners gedacht, eine echte Integration als Sensor in das MSDF war nur in 2 Fällen teilweise vorhanden, mit einem Beitrag zur Objektklassifizierung und einer Lokalisierungsschätzung. Es gibt Raum für Entwicklung, und einige Anbieter gaben an, dass Investitionen in die KI-Entwicklung für die Videosensorverarbeitung geplant sind.

Der aktuelle Stand der MSDF in DDS war wie folgt in der Testkampagne zu beobachten:

- Im Test wurde keine überzeugende brauchbare MSDF vorgestellt. In der Regel dominierte ein Sensor die Erkennung, Lokalisierung und Trackhaltung. In einem Fall wurde dies von RF übernommen.
- Andere Sensoren trugen zur Klassifizierung bei, aber nicht zur Positionsschätzung (außer in einem Fall). Es gibt einige Ansätze für MSDF mit unterschiedlichem Reifegrad, meist bei den Anbietern mit militärischem Hintergrund.

- In vielen Fällen wurden Informationen von mehreren Sensoren grafisch überlagert, ohne dass eine Datenfusion stattfand.
- Ein geeignetes MSDF, z. B. mit Schwerpunkt auf nicht-kooperativen Objekten vor unübersichtlichem Hintergrund, muss also noch entwickelt werden.
- Wir gehen von nutzbaren Technologien in den Bereichen SNR/CFAR-Techniken, Anwendung von statischen und dynamischen Clutter Maps, fortgeschrittenen Assoziationstechniken wie JPDA, MHT-Tracking, Sensor Track - System Track - Loopbacks und verwandten Techniken aus dem militärischen Bereich aus.
- In jüngster Zeit werden KI-Algorithmen vom Typ „Convolutional Neural Networks“ (CNN) in der Video- und Sensordatenverarbeitung erfolgreich eingesetzt. Wir gehen davon aus, dass dies eine Technologie ist, die weitere Verbesserungen in der Sensordatenverarbeitung erbringen wird.

Im Übrigen enthielten alle DDS Lage- bzw. Situationsdarstellungen, manche eher einfach und manche eher ausgefeilt. Ausgefeilte Benutzer- und Rollenmodelle, Skalierbarkeit, die Einbindung von webbasierten Darstellungen, eine hohe Konfigurierbarkeit, Filterwerkzeuge für die Darstellung und evtl. manuelles Tracking wie in der Luftverteidigung werden für die Anwender von DDS eine zentrale Rolle spielen. Zwei der getesteten Systeme entwickeln sich bereits in diese Richtung.

Analytische Darstellungen waren in den getesteten DDS nur in geringem Maße vorhanden. Nur ein Anbieter zeigte hier deutliche Fortschritte. Es wurde aufgrund der eigenen Erfahrung der DFS mit der MSDF-Entwicklung (siehe [7] zur PHOENIX AWP) den Herstellern empfohlen, die Bemühungen in diesem Bereich zu erweitern, da er sich als ein Schlüssel für den Fortschritt des MSDF erweisen wird. Interne R&R wird für die notwendigen Regressionstests relevant sein. Für die Entwicklung und das Training von KI-Algorithmen, z. B. die Anwendung neuronaler Netze, wird eine integrierte „Learning Suite“ benötigt werden.

## Quantitative Ergebnisse

Die quantitativen Auswertungen durch das Fraunhofer FKIE-Institut bestätigten die qualitativen Beobachtungen der DFS (vgl. [5], S. 90-205) im Wesentlichen (FKIE-Report in [9], Zusammenfassung S. 525). Die zentralen Kennwerte für die 6 Systeme sind in Tabelle 2 wiedergegeben. Die Wahrscheinlichkeit, einen Drohnentrack zu detektieren (Track PD), zu orten und

durch einen Track im System wiederzugeben, lag über alle Systeme in einem Spektrum von 0.06 bis 0.61, gemittelt über alle Arten von Manövern, alle Arten von Drohnen, und alle Entfernungsbereiche.

Tabelle 2: Quantitative Resultate der DDS-Tests.

| KPI (all man.) | DDS 1  | DDS 2   | DDS 3  | DDS 4  | DDS 5  | DDS 6  |
|----------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Track PD       | 0,17   | 0,61    | 0,06   | 0,29   | 0,27   | 0,15   |
| Continuity     | 0,10   | 0,52    | 0,03   | 0,15   | 0,14   | 0,08   |
| Track duration | 56,2 s | 189,5 s | 98,8 s | 69,6 s | 62,7 s | 46,2 s |
| Position RMS   | 41,7 m | 30,4 m  | 38,5 m | 60,1 m | 51,2 m | 67,9 m |
| Height RMS     | 53,1 m | NaN     | 47,2 m | 71,2 m | 59,7 m | 61,2 m |

Auch wenn man bedenkt, dass hier die besondere Herausforderung die Primärzieldetektion von nicht-kooperativen Zielen in starkem Clutter ist, und die Anpassungszeit an die örtlichen Gegebenheiten des Flughafens nur 1 Woche betrug, so waren diese Werte sehr ernüchternd. Lediglich ein System, das allerdings nur mit RF-Detektion arbeitet und UAS in nicht bekannten RF-Frequenzbereichen gar nicht detektiert, also mithin eine unvollständige Lösung darstellt, erreichte durch das angewandte Multilaterationsverfahren und eine höhere Anzahl verteilter RF-Detektoren eine Track PD > 0.5. Bei einer Track PD nahe 0 wurde von einem beteiligten System praktisch kaum ein Track aufgebaut, so dass die statistische Signifikanz seiner Werte zu Trackdauer und Positions- bzw. Höhen-RMS als fraglich einzustufen ist. Bei den übrigen Systemen lag die „Continuity Rate“, also die Maßzahl, ob ein wirklicher Track durch sehr viele „Trackbruchstücke“ im DDS abgebildet wird (dann ein Wert eher gegen 0), oder eben genau durch einen Systemtrack (dann liegt der Wert bei 1) zwischen 0,08 und 0,52. Dies bestätigte den optischen Eindruck der DDS-Beobachter, dass die Trackbildung sehr bruchstückhaft ausfiel. Dies korrespondiert auch mit der ermittelten mittleren „Track Duration“, also der zeitlichen Dauer der Aufrechterhaltung eines Tracks. Sie lag zwischen 46,2 und 189,5 Sekunden. Die Flüge fanden allerdings mit Zeitdauern von 10 bis 25 Minuten statt. Auch hier zeigte sich DDS 2 als positiver Ausreißer. Die Positionsgenauigkeit wurde mit RMS zwischen 30,4 und 67,9 Metern im Mittel über alle Manöver, Drohnen und Entfernungen ermittelt, auch hier schneidet DDS 2 am besten ab, und in der Detailauswertung wurde ersichtlich, dass sie bei Distanzen zwischen 1,8 und 5 km sogar noch einmal deutlich kleiner werden konnte. In diesem System wurde leider nicht die festgestellte Höhe der Drohne geloggt, so dass der Fehler in der Höhe nicht geschätzt werden konnte. Bei den übrigen Systemen lag

die „Height RMS“ zwischen 47,2 und 71,2 m, mit Ausreißern bei 200 m, vor allem in weiteren Entfernungen. Dieser unerwartet hohe Fehler in der Höhe ist weiter aufklärungsbedürftig, und daher stehen dazu noch weitere Analysen aus.

Nach Entfernungsbereichen differenziert ergeben sich für die Track-PD nach [9], S. 525 für die 6 Systeme das folgende Bild:

Tabelle 3: Track PD nach Entfernungsbereichen.

| Track PD (all man.) | DDS 1  | DDS 2  | DDS 3  | DDS 4  | DDS 5  | DDS 6  |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| < 1,8 km            | 0,23   | 0,54   | 0,01   | 0,61   | 0,33   | 0,32   |
| 1,8 – 5 km          | 0,12   | 0,75   | 0,09   | 0,33   | 0,25   | 0,13   |
| 5 – 10 km           | 0,1    | 0,72   | 0      | 0,15   | NaN    | 0      |
| > 10 km             | 0      | 0      | 0      | 0      | NaN    | NaN    |
| Max Range           | 8,2 km | 6,7 km | 2,3 km | 6,3 km | 3,1 km | 2,6 km |

Man erkennt hier bei allen Systemen außer DDS 2 die Verschlechterung mit der Entfernung, was nicht weiter verwunderlich ist, wenn man berücksichtigt, dass das Radar der wichtigste beitragende Sensor zur Trackbildung war. Die PD fiel dann in unterschiedlichen Distanzen auf 0 ab, es ergibt sich hier eine de facto Reichweite der Systeme zwischen 2,3 und 8,2 km. Bei DDS 2 waren die RF-Detektoren z.T. um den Flughafen herum verteilt, bis zu einem Range von etwa 6 km zum Referenzmittelpunkt des Systems auf dem Flughafen. Bis zu dieser Distanz wurden die Ergebnisse sogar mit der Entfernung besser, fielen dann aber deutlich ab, weil die Drohnen außerhalb des aufgespannten Feldes von Sensoren lokalisiert werden mussten.

Die Detailanalysen des umfangreichen Reports zeigen überdies, dass die tangentialen Teile der UAS-Flugmanöver wie erwartet schlechter detektiert werden als die radialen Bestandteile. Die mit Radar arbeitenden Systeme konnten die Non-Standard-Drohnen ähnlich gut detektieren wie die marktüblichen Multikopter, lediglich DDS 2 war überhaupt nicht dazu in der Lage, Eigenbau-Drohnen mit Non-Standard-Kommunikationsfrequenzen zu detektieren. Im Hinblick auf die eingangs aufgeführten Kennwerte „Track-PC“, „Continuity Rate“ und „Track Duration“ zeigte sich, dass einzelne oder mehrere schwebende Drohnen sowie Schwarmflüge am schlechtesten detektiert werden konnten.

### Weiteres Vorgehen

Der Test der DDS an den Flughäfen Frankfurt/Main und München durch die DFS und ihre Partner zeigte in einem besonderen Maße, wie anspruchsvoll die Umgebung eines großen Flughafens für die Detektion

nichtkooperativer Drohnen ist. Die heute verfügbaren Systeme haben noch eine erhebliche Entwicklung vor sich, sowohl in der Detektion und in der MSDF als auch in den Clients, zumindest bei Konfigurierbarkeit und analytischen Funktionalitäten für den systembetreuenden Ingenieur.

Im Test ging es nicht um Herstellerauswahl oder eine Rangfolgefeststellung zwischen den Systemen. Man kann aus den Ergebnissen auch nicht ableiten, wie gut das eine oder andere System sich für Einsätze bei zu schützenden politischen Gipfeln, bei Gefängnissen oder militärischen Camps eignet. Ziel der Tests war eine Machbarkeitsstudie, die das heute verfügbare Lösungspotenzial der Systeme am Markt für den Anwendungsfall „Flughafen“ exemplarisch, methodisch robust und reproduzierbar aufzeigt, und dabei hilft, für die Beschaffungsphase die richtige Strategie zu identifizieren und realistische Anforderungen an derartige Systeme zu stellen.

Die gelernte Lektion deutet auf eine phasenorientierte, inkrementelle Beschaffungsstrategie hin, die mit Kernkomponenten beginnend auf ein modulares System mit Komponenten unterschiedlicher Hersteller abzielt und weitere Entwicklungsarbeit über einen längeren Zeitraum einbezieht. Die nächsten Schritte im Projekt zielen mit einem entsprechenden Betriebskonzept, einer Architekturentwicklung mit den drei Layern „DDS für sich“, „DDS und Nachbarsysteme“ sowie „mehrere DDS in einer Zentrale kombiniert“, und mit dem darauf aufbauenden Anforderungs-Engineering genau auf die Umsetzung dieser Lektion ab.

## Abkürzungsverzeichnis

|                |                                                                               |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| ATC            | Air Traffic Control                                                           |
| ATM            | Air Traffic Management                                                        |
| AWP            | Analysis Working Position                                                     |
| BMVI           | Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur                      |
| C <sup>3</sup> | Command, Control, and Communication (System)<br>(= Mission Control System)    |
| CFAR           | Constant False Alarm Rate                                                     |
| CNN            | Convolutional Neural Networks                                                 |
| CPU            | Central Processing Unit                                                       |
| DAB, DVB       | Digital Audio Broadcasting,<br>Digital Video Broadcasting                     |
| DDS            | Drohnendetektionssystem                                                       |
| DFS            | Deutsche Flugsicherung GmbH                                                   |
| EO/IR          | Electro-optical/infrared video systems                                        |
| FKIE           | Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie |
| FMCW           | Frequency Modulated Continuous Wave (Radar)                                   |
| FMS            | Flight Management System                                                      |
| GPS            | Global Positioning System                                                     |
| HMI            | Human Machine Interface                                                       |
| HPEM           | High Power Electro Magnetics                                                  |
| ILS            | Instrument Landing System                                                     |
| IoT            | Internet of Things                                                            |
| ICAO           | International Civil Aviation Organisation                                     |
| JPDA           | Joint Probabilistic Data Association                                          |
| KI             | Künstliche Intelligenz                                                        |
| LTE            | Long Term Evolution                                                           |
| MCT            | Mission Control Tool                                                          |
| MHT            | Multi-Hypothesis Tracking                                                     |
| MSDF           | Multisensor-Datenfusion                                                       |

|          |                                                     |
|----------|-----------------------------------------------------|
| NaN      | Not a number                                        |
| NM       | Nautische Meile                                     |
| PCL      | Passive Coherent Location                           |
| PD       | Probability of Detection                            |
| R&R      | Recording und Replay                                |
| RF       | Radio Frequency                                     |
| RMS      | Root Mean Square (statist. Maß)                     |
| RPS      | Remote Pilot System<br>(Funksteuerung)              |
| SASS-C   | Surveillance Analysis Support System for ATC-Centre |
| SD-Karte | Secure Digital Memory Card                          |
| SMGCS    | Surface Movement Guidance and Control Systems       |
| SNR      | Signal-to-Noise Ratio                               |
| UAS      | Unmanned Aircraft System                            |
| UTM      | UAS Traffic Management (System)                     |
| VRR      | Video Recording und Replay System                   |

## Referenzen

- [1] DFS (2020). Sicherheitsdokumentation Durchführung von Flugszenarien mit UAV zum Test von Drohnendetektionssystemen (DDS) in D (CTR) und in der Nähe von FRA und MUC. Version 1.1 vom 06.04.2020. Langen: DFS Deutsche Flugsicherung GmbH.
- [2] DFS (2019). Systematische Detektion von unbemannten Fluggeräten in Flugplatznähe durch die DFS. Roadmap Stufe 1 - Definitionsphase. Version vom 25.09.2019. Dokument der DFS Geschäftsführung. Langen: Deutsche Flugsicherung GmbH.
- [3] Heidger, R. (2020). Technischer Report: DDS Test bei FKIE. Version 1.1 vom 22.01.2020. Langen: DFS Deutsche Flugsicherung GmbH.
- [4] Heidger, R. Lamercy, V. & Lambers, D. (2020). DFS DDS Testplan. Version 3.1.1 vom 23.06.2020, Langen: DFS Deutsche Flugsicherung GmbH.
- [5] Heidger, R., Lamercy, V. & Lambers, D. (2021). DFS DDS Testreport. Version 2.7 vom 11.02.2021, Langen: DFS Deutsche Flugsicherung GmbH.

- [6] Heidger, R. (2018). UAS Traffic Management (UTM) aus Sicht der DFS. Innovation im Fokus, 02/2018, S. 5-20. Langen: DFS Deutsche Flugsicherung GmbH.
- [7] Heidger, R. (2014). The PHOENIX White Paper. Version 5.0 vom 13.01.2014, Langen: DFS Deutsche Flugsicherung GmbH.
- [8] Desmond-Kennedy, A. & Gardner, B. A. (1998). Tools for analysing the performance of ATC surveillance radars. IEE Colloquium on Specifying and Measuring Performance of Modern Radar Systems (Ref. No. 1998/221). London, UK. S. 6/1-6/4. doi: 10.1049/ic:19980148.
- [9] Bös, H., Brötje, M. Dorau, D. Fiolka, T. & Teichröb, M. (2021). TWA-DDS (Technisch-wissenschaftliche Auswertung Drohnen-detektionssysteme). FKIE-Bericht zur Studie. Wachtberg: Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie (FKIE).

# Clustering Climb Profiles for Vertical Trajectory Analysis

Dr. Matthias Poppe & Jörg Buxbaum

## Deutsche Zusammenfassung

Die Steigprofile von Luftfahrzeugen weisen ein weites Leistungsspektrum in Bezug auf die Steigraten und die Zeit bis zum „Top of Climb“ auf und sind schwer zu interpretieren. Diese Studie stellt einen systematischen Ansatz vor, der die im Jahr 2019 gesammelten Steigprofile aller Luftfahrzeugtypen für zwei große deutsche Flughäfen in Cluster mit ähnlichen Leistungsmerkmalen einteilt. Dabei wurde zur Generierung und Analyse der bis zu 16 Cluster der K-Means Algorithmus verwendet. Die Repräsentanten der Cluster können zur Vorhersage von Trajektorienprofilen verwendet werden. Bei korrekter Vorhersage des Clusters ist der mittlere quadratische Fehler der Steigprofile in Flugfläche 250 gleich der Clustervarianz. Durch die Zuordnung in Cluster kann das weite Leistungsspektrum der Steigraten eingeengt und damit die Vorhersage erleichtert werden.

## Abstract

Aircraft climb trajectories show a wide performance range and are difficult to predict. This study provides a systematic framework which clusters the climb profiles, collected during 2019, for all aircraft types from two major German airports. Clusters with similar climb performance could be distinguished with K-Means for up to 16 clusters. The cluster representatives could be used for prediction of the trajectory profile and the root mean square error of the deviation at FL250 could be reduced to the error of the cluster members if the correct cluster was predicted.

*Keywords - Air Traffic Control, trajectory prediction, clustering, climb profiles*

## Introduction

The aircraft climb performance and the prediction of the aircraft trajectory are key enablers for future ATM trajectory based operations. The climb profile depends on many factors of different nature, being it the aircraft intent, the aircraft current state, the atmospheric

conditions, and last but not least human controller and pilot interventions. This results in an operational and technical uncertainty [1] where many of these factors are not known or can only roughly be estimated.

As the aircraft mass is a critical factor and one of the major uncertainties to the climb performance, several attempts have been made to estimate the aircraft take off mass (e.g. [2][3][4]). With a better and more accurate mass estimate, parametric approaches like BADA [5] or [6] will provide more accurate climb trajectories. Alternatively, non-parametric approaches [7][8] try to estimate the aircraft trajectory not only in the climb phase.

Despite all the progress made during the last years, the resulting uncertainty may still be too high for certain safety critical applications like Conflict Detection or Controller Decision Support tools.

The focus of this study is to analyze the climb performance based on a clustering approach as it is proposed for trajectory prediction e.g. in [9] or applied for air flow identification [10]. All aircraft types within a performance range typical for civil transport aircraft from Take Off to Flight Level FL 250 will be considered. This limit has been chosen because it is well below the typical crossover altitude<sup>1</sup> for most aircraft types. The resulting look ahead time is about 6-8 minutes. The question is to which extent this analysis can be used for predicting the future climb profile based on the first observed climb segment.

Section II explains the basic approach with K-Means. After discussing the data pre-processing in section III, sections IV and V and provide the obtained results and how to use them for trajectory prediction.

## Approach

### Unsupervised Learning

The field of unsupervised learning is used to discover structures in big data sets and try to extract useful information without knowing the corresponding output

<sup>1</sup> The crossover altitude is the altitude at which a specified CAS and Mach value represent the same TAS value. Above this altitude the Mach number is used to reference speeds.

variable. On the other hand, it is hard to assess the results obtained from unsupervised learning methods since there is no universally accepted mechanism for performing cross validation. Therefore, the time to reach FL250 has been chosen as a benchmark for this study.

Clustering is an exploratory data analysis to understand the magnitude of the problem. It is based on a distance or similarity function. Multiple clustering approaches are known, e.g. based on density functions [11][12]. However, the authors have chosen the well-known k-Means partitioning algorithm [13] based on the Euclidean distance function. As we are interested in the climb behavior, the high-dimensional trajectory data were reduced to flight level over time and sampled every 10 FL. A vector of constant length has been derived which is required for using the Euclidean distance. One advantage of k-Means is that all input data will be assigned to a cluster, and on the same time a cluster representative will be provided which can be used for further analysis.

## K-Means Clustering

In K-means clustering [14][15], we seek to partition the observations into a pre-specified number of clusters  $k$ . Each cluster  $C_k$  contain  $|C_k|$  number of observations and each of the  $n$  observations is assigned to exactly one cluster:

$$C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_K = \{1, \dots, n\} \quad (1)$$

The clusters are non-overlapping, two different clusters are disjoint:

$$C_k \cap C_{k'} = \emptyset \text{ for all } k \neq k' \quad (2)$$

The basic idea is to minimize the within-cluster variation, i.e. the amount to which extent the observation within a cluster differ from each other, in our case the squared Euclidean Distance:

$$\underset{C_1 \dots C_K}{\text{minimize}} \left\{ \sum_{k=1}^K \frac{1}{|C_k|} \sum_{i,i' \in C_k} \sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{i'j})^2 \right\} \quad (3)$$

The K-means algorithm solves the above equation and finds a local optimum (not necessarily the global optimum). Therefore, the algorithm will run several times with different initial configurations. One disadvantage of K-Means may be the distortion of clusters due to the presence of outliers since the squared distance is not very robust to perturbations.

## Data Preparation

Selected Mode S Enhanced Surveillance Data (EHS) and the Mode C altitude information were used from 2019 to extract the required information for data preparation.

The Mode-S EHS data [16] contain the following Binary Data Selector (BDS) register:

1. BDS 4.0 - Selected Vertical Intention
2. BDS 5.0 - Track and Turn Report
3. BDS 6.0 - Heading and Speed Report

An overview of the used raw data for this study can be seen in Table 1.

Table 1: Extracted data items.

| Index | Abbreviation | Explanation                  | Unit   |
|-------|--------------|------------------------------|--------|
| 0     | t            | Time                         | sec    |
| 1     | FL           | Flight level (Mode C)        | FL     |
| 2     | AID          | Aircraft ID (24 bit address) | -      |
| 4     | FCU          | FMS Selected Altitude        | feet   |
| 5     | GS           | Ground Speed                 | knots  |
| 8     | IAS          | Indicated Airspeed           | knots  |
| 10    | RoC          | Inertial Vertical Speed      | ft/min |

A climbing flight was defined when it shows a positive flight level change over time and when no apparent restrictions in terms of Level off segments are available. This means:

$$\begin{aligned} & \max_t \{FL(t) > 255\} \quad \text{AND} \\ & \argmin_t \{FL(t)\} < \argmax_t \{FL(t)\} \quad \text{AND} \quad (4) \\ & \forall FL(t) < 255: \quad FCU(t) - 100 \cdot FL(t) \leq \omega \end{aligned}$$

It was chosen to set  $\omega := 1000$  [feet]. In total, more than 45.000 climbing flights from Frankfurt (EDDF) and Munich (EDDM) airport fulfilled the criteria and were selected for this study. The original Mode S and ADS-B data were extracted and downloaded with the 'traffic' toolbox [18] from the OpenSky [19][20] website during the period from February 2019 to August 2019 (approximately 104 days EDDF departures, 93 days EDDM departures).

Caveat: Mode C altitudes below the transition altitude<sup>2</sup> are also given in respect to 1013.25 hPa (and not to QNH) in our data so no deviations to the Flight Level information were obtained from these circumstances<sup>3</sup>. Yet, differing altitudes at Take Off due to varying airport elevations are not respected. Due to the selected quantization (see next section), the impact should be negligible.

## Vector Extraction

For the identification of similar climb profiles, we need to cluster these profiles, i.e. we need to consider the flight level change over time. Figure 1 shows a synthetic profile and how the feature vector for each flight was extracted.

In order to get a vector of constant length for application of the Euclidean Distance, we divided the climb phase from FL30 up to FL250 in 23 segments and recorded for each segment the time  $t_k$  needed to climb to the respective flight level. This has the advantage that the vector length is constant and independent of the individual flight time to FL250 which may vary considerably (please refer to Figure 4). FL30 has been selected as a lower bound in order to reduce noise effects from the initial take off phase and the different airport altitudes.

All data were scaled to a range between 0 and 1 (in the following figures the absolute values are provided for a better interpretation).

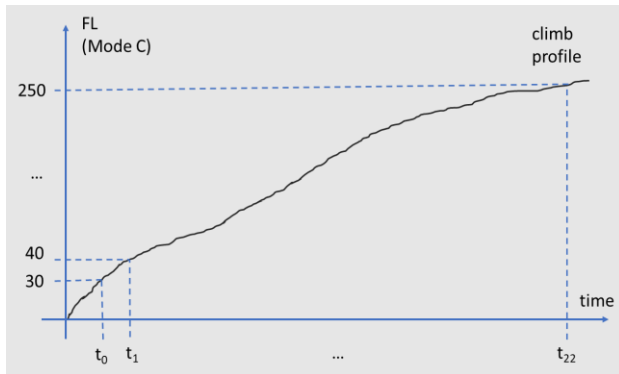


Figure 1: Extraction of the climb feature vector.

The calculation of the times  $t_k$  is derived from:

$$t_k = \operatorname{argmin}_t \{FL(t) > 10 \cdot (k + 3)\}, k = 0, 1, \dots, 22 \quad (5)$$

The resulting feature vector describes the flight climb behavior to FL250. The starting point of FL30 and the division of 10 FL means a quantization which eliminates noise in the profile and eases the later clustering and processing of the data.

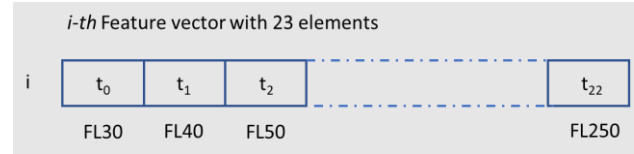


Figure 2: Structure of the feature vector

For a flight  $i$ , the vector structure is shown in Figure 2. Each element of the vector thus contains the time needed to reach the respective Flight Level.

In Figure 3, the resulting piecewise constant approximation of the climb time as a function of the Flight Level is outlined. The basis function  $t_m$  can be described with

$$t_m(FL) = I(L_m \leq FL_k < U_m) \quad k, m = 0, \dots, 22 \quad (6)$$

The upper and lower bounds  $L_m$  and  $U_m$  has been set to

$$L_m = U_m = 5 FL \quad (7)$$

As a reference for the spread of the time to climb to FL250 and in order to get a sense for the magnitude of the problem, the distribution of  $t_{22}$  is shown in Figure 4. All aircraft types are included, and the distribution has a mean of 707 seconds and a standard deviation of 108 seconds. The distribution has been cut at 450 seconds and at 1100 seconds to eliminate outliers in the data (because of the sensitiveness of K-Means regarding outliers). This results in an average Rate of Climb (RoC) after the cut of about 3700 feet/minute and 1400 feet/minute respectively.

<sup>2</sup> At the transition altitude, the aircraft switches from the use of local barometer derived altitudes to flight levels. In Germany, this altitude is reached at about 5000ft (depending on local conditions).

<sup>3</sup> The QNH is the barometric pressure adjusted to mean sea level. It is dependent on current weather conditions and the difference to 1013.25 hPa can be large dependent on the current weather situation [17]

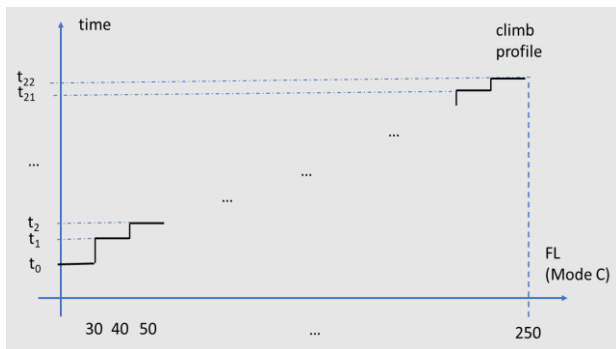


Figure 3: Piecewise constant FL segments.

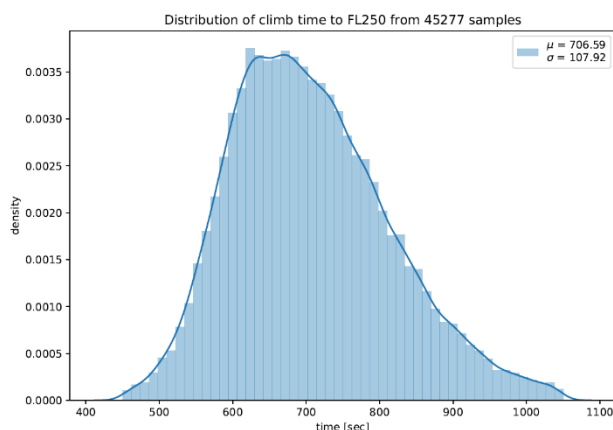


Figure 4: Climb time to FL250 (EDDF, EDDM).

## Results

Because we are interested to which extent we can use the clustering approach for trajectory prediction, the clusters of the feature vector are presented with respect to the time from Take Off to FL250. In total, 35000 flights have been used for clustering while the remaining 10000 flights were used for prediction (they were not part of the clustering).

The number of clusters  $k$  is a free-to-choose parameter in K-Means. We need to find the number of clusters that show a small cluster variance but at the same time we should be able to predict the correct cluster for a new query. The challenge is to assign the correct cluster based on partial information, e.g. only from a feature vector with elements  $t_0$  to  $t_{11}$ . Figure 5 and Figure 6 show the sample distribution for six and for 10 clusters. With more clusters, the overlap between cluster members increases while the general structure remains similar. Most members are in the clusters with a cluster mean around 600 to 700 seconds.

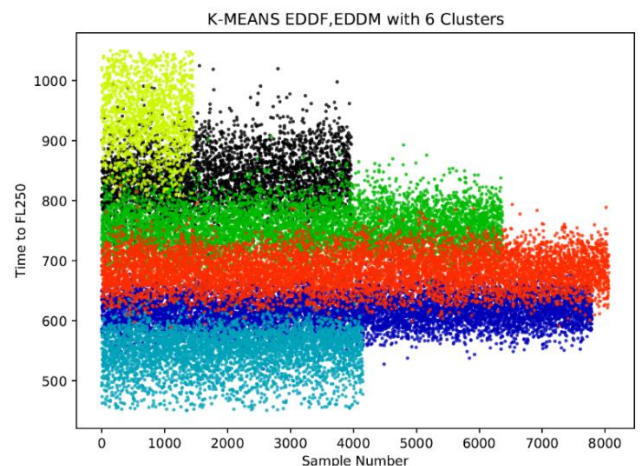


Figure 5: Distribution of samples to six clusters.

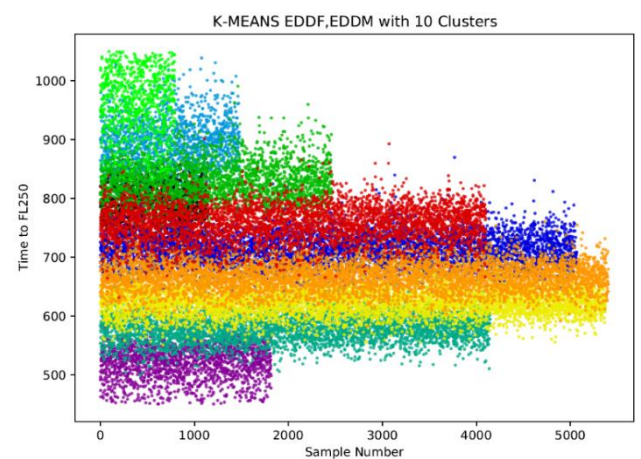


Figure 6: Distribution of samples to 10 clusters.

From these clusters, it can be seen that in particular the range between 500 and 600 seconds and between 900 and 1000 seconds will benefit from a higher number of clusters because the cluster range becomes narrower. For example, the intra-cluster standard deviation for six clusters with mean 549 seconds is 34 seconds while this value decreases for 10 clusters to 28 seconds.

In order to get a good value for the number of clusters, Figure 7 shows the total sum-of-squares within the cluster for different numbers of clusters. This diagram shows a sharp decrease from one to six clusters while the curve flattens for a higher number of clusters.

Based on the shape of this curve, the examples provided refer either to six or to 10 clusters.

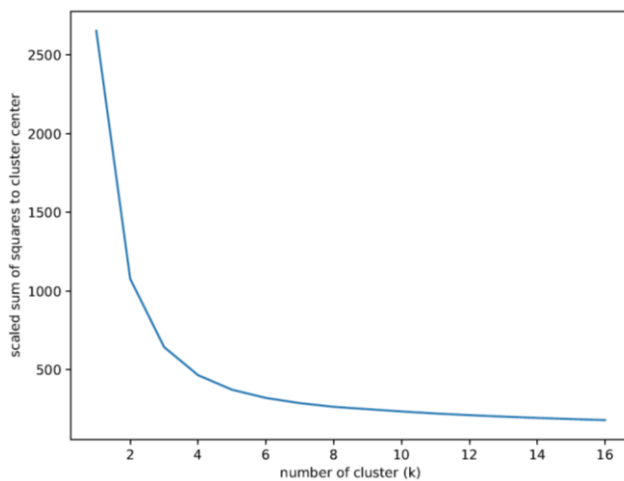


Figure 7: Total within-cluster sum of squares.

In Figure 8, the cluster representatives  $C_{rk}$  are plotted for  $k = 10$  clusters. Here, one of the representatives is crossing two other cluster centroids at sample numbers 10 and 17. This means that the climb profiles may exhibit different behavior. A low initial climb performance changes to a later high climb performance (curve flattens in Figure 8) when compared to the other characteristic profiles.

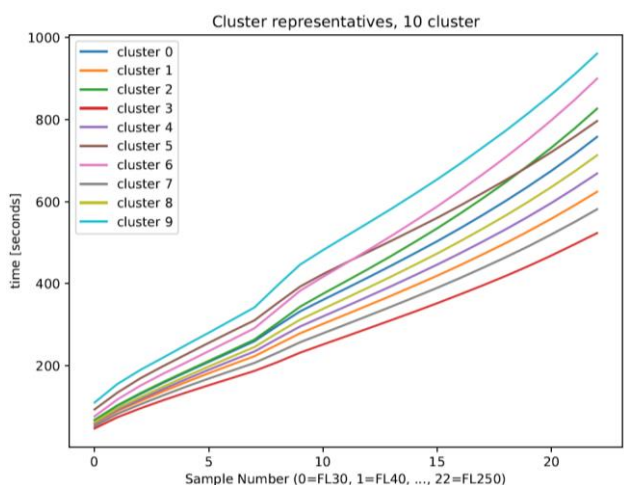


Figure 8: Cluster representatives for 10 clusters.

This is not the case for less than 10 profiles, and the number of crossing representatives  $C_{rk}$  increases with the number of clusters. Figure 9 shows the situation for 16 clusters. Only the outer cluster representatives are not crossed by others in this case. It is not clear what causes these overlaps and whether this is due to human controller or pilot intervention (operational uncertainty) or whether this is caused by the Flight Management System or the Cost Index, dependent on the aircraft mass (technical uncertainty) or may be atmospheric impact.

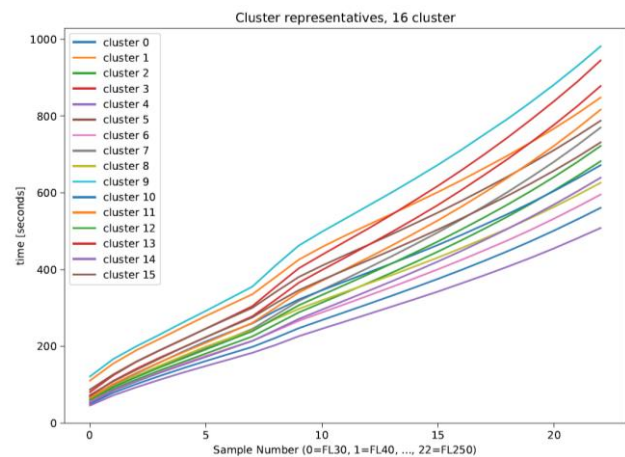


Figure 9: Cluster representatives for 16 clusters.

Another observation is that the cluster representatives are closer together at lower FL and spread more and more towards higher altitudes.

To better understand the results of the clustering, the mean and standard deviation were computed for all cluster members with respect to the time to FL 250, i.e. the vector element  $t_{22}$ . Table 2 shows an example for six clusters (the color corresponds to the colors in Figure 5).

Table 2: Mean and standard deviation of all class members at FL250 for six clusters (in seconds).

| Cluster        | Mean  | Std. Dev. | Number |
|----------------|-------|-----------|--------|
| 0 – light blue | 548.9 | 33.6      | 4267   |
| 1 - dark blue  | 619.0 | 26.0      | 8120   |
| 2 - red        | 686.1 | 29.0      | 8411   |
| 3 - green      | 756.2 | 33.7      | 6551   |
| 4 - black      | 837.9 | 44.7      | 3996   |
| 5 - yellow     | 940.7 | 54.4      | 1455   |

While the standard deviation is around 30 seconds for the four most populated clusters, the two clusters with the highest mean (low climb performance) have a standard deviation around 45 and 55 seconds respectively.

## Analysis of Prediction Capability

After having analyzed the different climb behavior with K-Means clustering and having found cluster representatives with a standard deviation in the order of 30 seconds, it would be beneficial to use this a-priori

knowledge for predicting the time to FL250 for new yet unknown trajectories.

With the full knowledge of a new feature vector, the correct cluster can be found by choosing the one with the minimum squared Euclidean distance (ED) to  $C_{rk}$ . The challenge is to assign the correct cluster  $k$  with only partial knowledge of the feature vector, e.g. when only  $t_0$  to  $t_{10}$  are known (i.e. the prediction takes place at FL130). Figure 10 shows the percentage of queries that are assigned to the correct cluster centroid dependent on the knowledge of the length of the feature vector, i.e. when the prediction has been taken place. In addition, the number of clusters  $k$  has been varied from 2 to 10. A lower number  $k$  results in a higher number of correctly assigned queries to the correct cluster. For example, with a prediction at FL150 and 6 clusters, a bit more than 60% of all queries could be assigned to the correct cluster (based on 10000 queries).

In general, the percentage can be slightly increased to 70%, if the distance of the last available vector element (e.g.  $t_{10}$ ) to the corresponding 10th cluster element is compared, instead of using the squared ED from  $t_0$  to  $t_{10}$ . Reason for this seems to be the noisier climb behavior in the beginning.

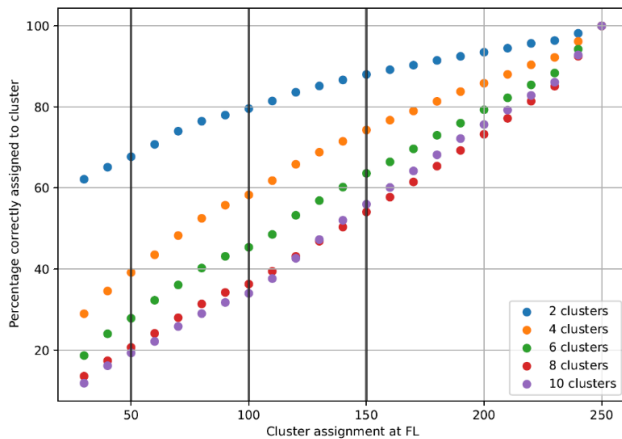


Figure 10: Correctly assigned clusters as a function of the flight level and the total number of clusters.

The resulting error distribution is shown in Figure 11 for six clusters. If the correct cluster  $k$  is assigned to a new query, the standard deviation of the prediction error (true time to FL250 – predicted time based on the cluster representative  $C_{rk}$  at FL250) is about 37 seconds.

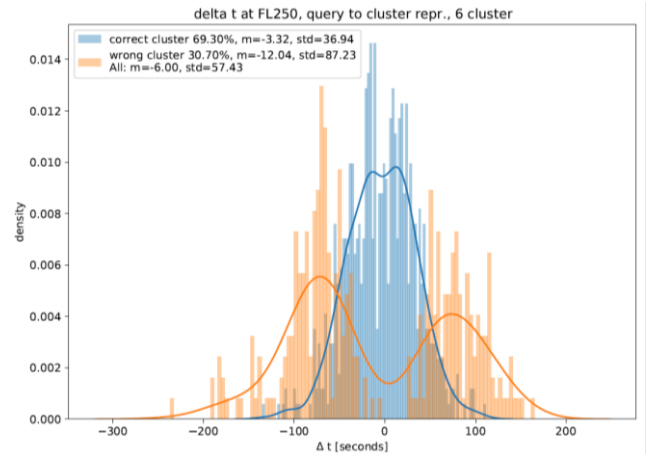


Figure 11: Error distribution at FL250 for correctly and wrongly assigned clusters.

On the other hand, if the wrong cluster has been assigned, the standard deviation increases to 87 seconds (refer to orange double dipped distribution). The overall resulting standard deviation is about 57 seconds.

The quadratic confusion matrix  $M$  with elements  $m_{ij}$  (row  $i$  with true cluster, column  $j$  with predicted cluster) shows for the 10000 queries the distribution of predicted and true clusters. The class accuracy (sum of  $m_{ii}, i = 1, \dots, k$ ) is about 70%. About half of the matrix elements  $m_{ij}$  are 0 or close to 0. Looking for example at the predicted cluster 4 in the fifth column, in most cases the prediction  $m_{44}$  is correct while in about 1/3 of the cases (144+365) the true cluster is one of the neighbor clusters, either cluster three or five. Note that the cluster number corresponds to those in Table 2.

Table 3: Confusion Matrix for six clusters.

| Cluster number | Pred. 0    | 1           | 2           | 3           | 4           | 5          |
|----------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| True 0         | <b>529</b> | 84          | 0           | 0           | 0           | 0          |
| 1              | 236        | <b>1257</b> | 291         | 0           | 0           | 0          |
| 2              | 28         | 419         | <b>1508</b> | 400         | 0           | 0          |
| 3              | 2          | 38          | 457         | <b>1663</b> | 365         | 0          |
| 4              | 0          | 0           | 21          | 318         | <b>1540</b> | 133        |
| 5              | 0          | 0           | 0           | 5           | 144         | <b>561</b> |

Of course, it would be beneficial, if the class accuracy could be further improved. So far, we have only been using the climb behavior, i.e. the time needed to achieve a certain flight level. Open question is whether the not

yet used information about the query flight (refer to Table 1 plus additional flight plan data, together with parametric models like BADA and e.g. mass estimation from [2] or [3], or using a framework like [22]) would allow to discriminate between clusters 3, 4 and 5 if cluster 4 has been predicted. For this specific example, this is a classification problem with three classes (sometimes two classes or four classes, refer to matrix  $M$ ) instead of six classes.

## Conclusions and Outlook

With a derived vector of constant length that describes the climb profile, K-Means is capable of identifying clusters with similar climb behavior. As all aircraft types have been considered in the sample of 45000 climbing flights, the cluster representatives present typical profiles. If the number of clusters is increased, the climb profiles cross each other and a high initial climb performance may switch to lower climb performance, in particular after the acceleration phase to constant Calibrated Airspeed. This indicates that a prediction of the climb profile based on initial climb segments (and even with good knowledge of aircraft climb parameters) is very difficult.

The cluster representatives allow to compare new partially known trajectories, only based on the climb behavior, and to predict the correct cluster with a certain accuracy. This accuracy depends on the number of clusters - more clusters imply less intra-cluster standard deviation of the prediction error but it is more difficult to forecast the correct cluster.

Further analysis is required to look at similarities within each cluster, based on the static and dynamic aircraft parameters like aircraft type, Take Off mass, departure route, Indicated Airspeed or others. The authors believe that a combination with other available approaches like parametric models and/or mass estimations could further improve the correct cluster prediction.

In a second step, an intra-cluster search with algorithms like K-Nearest Neighbors (as proposed in DART [7]) could probably further improve the prediction accuracy.

*Copyright notice: This is an updated reprint of the SESAR Innovation Days (SID) Publication that took place virtually from December 7-10, 2020.*

## Abbreviations

|       |                                  |
|-------|----------------------------------|
| BDS   | Binary Data Selector             |
| CAS   | Calibrated Air Speed             |
| hPA   | hecto Pascal                     |
| CI    | Cost Index                       |
| ED    | Euclidian Distance               |
| EHS   | Enhanced Surveillance            |
| FCU   | Flight Control Unit              |
| FL    | Flight Level                     |
| GS    | Ground Speed                     |
| IAS   | Indicated Air Speed              |
| ML    | Machine Learning                 |
| RoC   | Rate of Climb                    |
| SESAR | Single European Sky ATM Research |

## References

- [1] Common Trajectory Prediction Capability for Decision Support Tools, Sip Swierstra, EUROCONTROL HQ, Brussels, Steven M. Green, National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center, Moffett Field, CA, 5th USA-Europe ATM Seminar, Budapest, June 2003.
- [2] Sun, J., Ellerbroek, J. & Hoekstra, J., Bayesian inference of aircraft initial mass, in 'Proceedings of the 12th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar', FAA/ EUROCONTROL, 2017.
- [3] Machine Learning and Mass Estimation Methods for Ground-Based Aircraft Climb Prediction. Richard Alligier, David Gianza, Nicolas Durand. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, IEEE, 2015, pp.1-12.
- [4] Statistical Modelling of Aircraft Takeoff Weight. Y.S. Chati, H. Balakrishnan. 12th USA/Europe ATM Research and Development Seminar ATM 2017.
- [5] User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA), Revision 3.8, EEC Technical/Scientific Report No. 2010-003, April 2010.
- [6] Adaptive Trajectory Prediction Algorithm for Climbing Flights. Charles A. Schulz, David

- Thippavong, Heinz Erzberger. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [7] Evaluation and Validation of Algorithms for Single Trajectory Prediction. DART D2.4 Data Science in ATM, ER-2-2025. University of Piraeus Research Center, August 2018.
- [8] Flight Level Prediction with a Deep Feedforward Network. Matthias Poppe, Deborah Fieberg, Roland Scharff. SESAR Innovation Days Salzburg, December 2018.
- [9] Review & Perspective for Distance Based Trajectory Clustering. Philippe Besse, Brendan Giullouet et.al. arXiv: 1508.04904v1. August 2015.
- [10] Deep Trajectory Clustering with Autoencoders. Xavier Olive, Luis Basora, Benoît Viry and Richard Alligier. International Conference of Research in Air Transportation ICRAT 2020.
- [11] OPTICS: Ordering Points to Identify the Clustering Structure. M. Ankerst, M. Breunig et.al. Proc. ACM SIGMOD 99 pp.49-60, Philadelphia PA, 1999.
- [12] A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. M. Ester, H.P. Kriegel et.al., KDD, vol. 96, no.34, pp.226-231, 1996.
- [13] Least squares quantization in pcm. S. Lloyd. IEEE transactions on information theory, vol. 28, no. 2, pp 129-137, 1982.
- [14] The Elements of Statistical Learning. Trevor Hastie et.al. Second edition, Springer New York, 2017.
- [15] Introduction to Statistical Learning. Trevor Hastie et al. Springer New York, September 2013.
- [16] ICAO Doc 9871 AN/464 Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter, First Edition, 2008.
- [17] EUROCONTROL Guidance Material For Transition Altitude Change, First Edition, Brussels, September 2004.
- [18] Traffic, a toolbox for processing and analysing air traffic data. Xavier Olive. Journal of Open Software, Vol. 4, 2019.
- [19] Bringing up OpenSky: A large-scale ADS-B sensor network for research. Matthias Schäfer, Martin Strohmeier, Vincent Lenders, Ivan Martinovic, Matthias Wilhelm. ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, April 2014.
- [20] The OpenSky Network, <http://www.opensky-network.org>.
- [21] Deep Learning, Ian Goodfellow, Yoshua Bengio and Aaron Courville, MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, England, 2016.
- [22] Open Aircraft Performance Model and Python Toolkit. Junzi Sun, 2019. Accessible via <https://github.com/junzis/openap>.

# Monitor-Evaluation – Große Monitore für einen zukünftigen Lotsenarbeitsplatz

Stefan Tenoort & Volker Weinriefer-Hack

## Einleitung

Mit dem im Jahr 2019 in der Abteilung Simulationen, Forschung & Entwicklung begonnenem Vorhaben „Arbeitsplatz der Zukunft“ soll eine Weiterentwicklung und Gestaltung des iCAS-Arbeitsplatzes mit Hilfe arbeitswissenschaftlicher Methoden (Human Factors) unterstützt werden. Es sollen erweiterte Funktionalitäten und prototypische Darstellungen entwickelt werden, um zu untersuchen, wie das HMI (Human Machine Interface) für Fluglotsen optimierbar ist.

Damit reihte sich das Vorhaben in das DFS Zukunftsprogramm „Sprint2024“ ein, welches die strategischen Schwerpunkte der nächsten Jahre vorgab und ist vornehmlich dem Themenbereich Innovation und Digitalisierung zuzuordnen. Wesentliche Aspekte des Clusters sind Digitalisierung, Cloud-Technologien und Automatisierung. Letzteres ist aus Human Factors Sicht von hoher Bedeutung.

Da die Flugsicherungsstätigkeit durch einen großen kognitiven Arbeitsanteil, einer hohen Dynamik und einer mäßigen Vorhersagbarkeit charakterisiert ist, bestehen besondere Herausforderungen bei der Automatisierung. Eine Automatisierung um ihrer selbst willen ist daher nicht zielführend, sondern sie soll den Lotsen dort entlasten, wo es sinnvoll ist. Im Vorhaben „Arbeitsplatz der Zukunft“ kommt daher einer integrierten Darstellung von situationsabhängigen und bedarfsgerechten Informationen sowie der Vereinfachung von Systeminteraktionen eine zentrale Aufgabe zu.

Hierbei liegt der Schwerpunkt auf den Lotsenarbeitsplatz im Center, d.h. die Rollen von Executive und Planner. Die Inhalte betreffen sowohl Hardware (großer Monitor, Eingabemedien), als auch die sich daraus ergebenden Möglichkeiten zur Verbesserung und Optimierung des HMI. Mögliche weitere Schritte der Automatisierung sollen unter Beteiligung von Lotsen entwickelt und evaluiert, und deren Auswirkungen auf Arbeitsverfahren und Systeminteraktion berücksichtigt werden.

Die Ziele des Vorhabens sind

1. Optimale Gestaltung des Lotsenarbeitsplatzes und Verbesserung der Ergonomie am iCAS-Arbeitsplatz.

2. Realisierung von Einsparungen bei der Hardwareausstattung von Lotsenarbeitsplätzen durch Harmonisierung der Bildschirme.
3. Zukunftsfähigkeit des Lotsenarbeitsplatzes bezüglich Hardwareverfügbarkeit und Anforderungen zunehmender Automatisierung berücksichtigen.

Nicht betrachtet werden die Ausgestaltung des Kontrollraums, der Technik und besonderer Hardware sowie Klima und Akustik.

Derzeit sind drei Module des Vorhabens „Arbeitsplatz der Zukunft“ definiert: a) Nutzung von 43-Zoll Bildschirmen im 16:9 Format (Monitor-Evaluation), b) Optimierung der Systemeingaben mit Fokus auf Gestensteuerung für taktische Eingaben mittels Touch Input Device (TID) und Nutzung von Spracherkennung zur Lotsenunterstützung sowie c) Gesamtoptimierung des HMI des Lotsenarbeitsplatzes. Systemeingaben mittels TID und Spracherkennung waren zuletzt Gegenstand des SESAR 2020-Projekts der Wave 1 PJ.16-04 „Workstation, Controller Productivity“, insbesondere den Teilprojekten „Multi-Touch Input Devices (MTI)“ und „Automatic Speech Recognition (ASR)“. Da die DFS sich in der Wave 2 des europäischen SESAR 2020 Programms nicht mehr an den Themen Spracherkennung und Multi-Touch Eingaben beteiligt, werden diese Aktivitäten derzeit im kleineren Rahmen DFS-intern weiterbearbeitet.

Thema dieses Artikels ist die Monitor-Evaluation. Die derzeit in allen Kontrollzentralen der DFS eingesetzten quadratischen 28-Zoll 2k2k-Monitore (Displaygröße 580 x 580 mm) stellen ein Nischenprodukt dar, da es seit einigen Jahren kaum noch Gründe gibt, quadratische Monitore neben ATM-Zwecken zu verwenden. Weiterhin sind diese Bildschirme, die hauptsächlich für das Air Situation Display (ASD) genutzt werden, aufgrund der geringen Stückzahlen und hohen betrieblichen Anforderungen sehr teuer. Neue Bildschirmstandards mit anderen Auflösungen und Formaten sind bereits verfügbar, getrieben durch rasante Entwicklungen in der Unterhaltungselektronik (Consumer Electronics) und erweiterten Anwendungen (Smart TV, Multimedia, Filmangebote in 4K-Qualität). In der Folge sind auch die Kosten für Bildschirme kontinuierlich gesunken, bei

gleichzeitiger Zunahme von Qualität und Funktionalität. Das High-End Segment ist dagegen relativ preisstabil.

Vor diesem Hintergrund sollten rechteckige großformatige Monitore auf ihre Tauglichkeit als Lotsenbildschirme untersucht werden. Konkret stellte sich die Frage, ob rechteckige 43-Zoll-Bildschirme die derzeitigen quadratischen 2k2k-Monitore (s. Abb. 1) ablösen können.

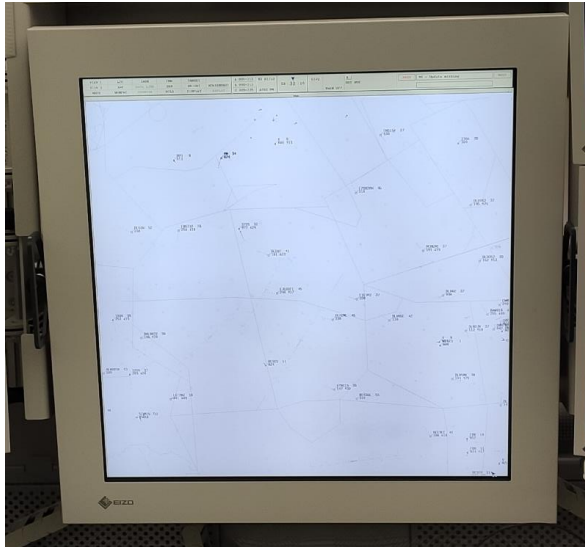


Abb. 1: 2k2k-Monitor an P2-Arbeitsplatz.

Die Triebfeder der Aktivität ist neben oben genannten Sachzwängen, wie fraglicher zukünftiger Verfügbarkeit, die Generierung von Einsparungen für den Lifecycle von Monitoren, bei Aufrechterhaltung bzw. Verbesserung von Darstellungsqualität und Ergonomie.

Hagemann et al. (2011) führten zusammen mit dem DLR Institut für Flugführung in Braunschweig im Rahmen des SESAR Projekts 10.10.2 „Integrated Controller Working Position Human Factors Design“ ein Technologie Screening durch. Darin erfolgte eine ergonomische Bewertung zur Nutzung eines 56-Zoll Quad HD-Bildschirms am Lotsenarbeitsplatz.

Auch wenn ein größerer Monitor grundsätzlich als wünschenswert beurteilt wurde und einige Vorteile damit verbunden waren, zeigte sich, dass größer nicht immer besser ist. Insbesondere der Sehabstand führte zu Problemen bei der Fokussierung aller Bildbereiche. Die große Bildfläche erforderte außerdem umfangreiche Kopfbewegungen, es gab eine ausgeprägte Blickwinkelabhängigkeit bei der Darstellung, die ungünstige Höhe führte zu unangenehm empfundener Kopfhaltung, eine Bedienung war nur mit großen Mausbewegungen möglich. Nicht zuletzt schränkten die besonderen

Anforderungen bei der Installation in bestehende Arbeitstische den betrieblichen Nutzen deutlich ein. Die damaligen Kosten waren ein weiterer Knackpunkt.

Eine weitere Untersuchung zur Nutzung großer marktüblicher Monitore am Fluglotsenarbeitsplatz wurde von Breitruck (2014) im Rahmen ihrer Bachelorarbeit durchgeführt. Es wurden grundlegende Anforderungen bestimmt sowie Stärken und Schwächen verschiedene Monitore betrachtet. Solche mit 30 und 31,5 Zoll Bildschirmdiagonale, jeweils bei einem 16:10 Format und einer Auflösung von 2560 x 1600 px sowie einem mit 2k x 2k Auflösung auf 36,4-Zoll Diagonale.

Bei den Monitoren aus dem Consumer-Bereich wurde die Displayhöhe als nicht ausreichend bewertet. Sektoren bestimmten Zuschnitts sind dann nur mit hohem Zoomfaktor innerhalb der Bildschirmfläche darstellbar. Damit verringern sich zwangsläufig auch die Abstände zwischen Labels mit negativen Folgen für Übersichtlichkeit und einer Abstandsschätzung zwischen LFZ.

Ein möglicher Alternativ-Monitor mit ausreichender Höhe ließ jedoch aufgrund der damaligen Marktlage - 4K Monitore waren erst seit kurzem verfügbar, Anwendungsfälle dagegen noch nicht etabliert - eine Kostenersparnis (noch) nicht erwarten.

Des Weiteren wurden Empfehlungen für eine weitere betriebliche Validierung über einen längeren Zeitraum und mit realem Verkehr ausgesprochen, um sicherheitsrelevante und ergonomische Aspekte valide beurteilen zu können.

Seitdem fand eine Weiterentwicklung von Monitorstandards ebenso statt, wie technologische Entwicklungen und Marktanpassungen bei Hardware-Kosten. High-End Geräte von früher sind mittlerweile Standard geworden. Eine Neubewertung könnte daher Einsparpotential identifizieren. Grundsätzlich kann bei der Beschaffung durch Aufweichen mancher harten Anforderungen – sofern sinnvoll – der Einkaufsmarkt vergrößert werden. Zwischen High-End Gerät und handelsüblichen Massenmarktprodukten liegt eine Bandbreite, die sorgfältig betrachtet werden sollte.

Die Untersuchung von Breitruck (2014) nutzte u.a. statische Screenshots für Beispielanwendungen und unterschiedliche Monitore, die aufgrund der zu geringen Bildschirmhöhe nicht für die Luftlagedarstellung geeignet waren. Bildschirmgröße und Auflösung heutiger Bildschirmstandards bieten nun mehr, auch die Darstellungsqualität wurde stetig verbessert. Als geeignete Bildschirmgröße wurde für diese Untersuchung eine Diagonale von 43-Zoll identifiziert, da

sie die Höhe des 2k Monitor um 2,56 cm übertrifft, also ziemlich genau einem Zoll (inch) und somit keine Einschränkungen bei der Darstellung von bestimmten Sektoren gegenüber der Ist-Situation bestehen. Die Punktdichte (pixels per inch, ppi) ändert sich ebenfalls nicht, die Panels sind quasi identisch mit ca. 102 und 103 ppi.

Ein wesentlicher Beweggrund für größere Monitore ist in der anstehenden Einführung von iCAS als zukünftiges Flugsicherungssystem zu sehen. Mit iCAS entstehen gesteigerte Anforderungen an die verfügbare Bildschirmfläche der 2k Monitore, da zusätzliche Anzeigen, Listen und Eingabemenüs dargestellt werden müssen. Teilweise sind dafür Zusatzmonitore vorgesehen. In Abb. 2 ist der iCAS Standardarbeitsplatz schematisch und nicht maßstabsgetreu dargestellt. Neben dem Hauptbildschirm mit der Radardarstellung (Air Situation Window – ASW) sind abhängig von der EBG bis zu vier weitere Zusatzmonitore vorgesehen. Darunter Arrival Manager (AMAN), Auxiliary oder Main Data Window (AUX/ MDW), Additional Data Display (ADD) und natürlich das Air Traffic Control Information Support System (ATCISS) als wichtigste Informationsquelle.

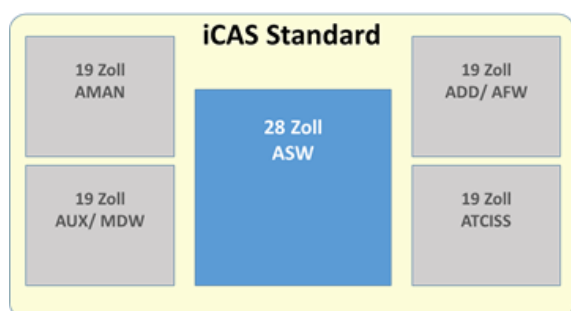


Abb. 2: Schematische Darstellung der Monitore eines iCAS Standardarbeitsplatzes.

Derzeit haben die verschiedenen Bildschirme unterschiedliche Anzeigephilosophien und Darstellungsqualitäten bzgl. Auflösung, Leuchtdichte, Kontrast, Farbdarstellung, u.a. Der Wechsel zwischen den unterschiedlichen Monitoren kann bei längeren Arbeitsperioden unnötig anstrengend und belastend sein.

Die Integration von derzeit auf mehrere Monitore verteilt dargestellten Daten und Informationen auf einen großen Bildschirm bietet nun die Möglichkeit ein homogenes Erscheinungsbild aller Anzeige- und Bedienelemente zu erhalten. Fenster, Farben, Schriften und Schriftgrößen, Buttons, Menüs, etc. können einem einheitlichen Styleguide folgen. Ebenfalls ist zu erwarten, dass der Zugriff auf Daten und Informationen mit großen Monitoren erleichtert wird, da alle Daten in räumlicher

Nähe angeordnet werden können. Das gesamte Bedienkonzept könnte vereinheitlicht werden und damit das HMI gebrauchstauglicher und moderner gestaltet werden.

Die Größenverhältnisse der unterschiedlichen Monitore werden in Abb. 3 dargestellt, als Maße sind Größe und Pixel angegeben. Berücksichtigt man nur die Auflösung, so könnten zwei der zusätzlichen 19-Zoll Displays (1024 px Höhe) ohne Einschränkungen übereinander auf einem 43-Zoll Monitor (UDH 4K, 2160px) untergebracht werden. Für die physikalischen Dimensionen trifft das nicht zu, zwei 19-Zoll Panels wären knapp 7 cm höher als die 43-Zoll Bildschirmfläche.

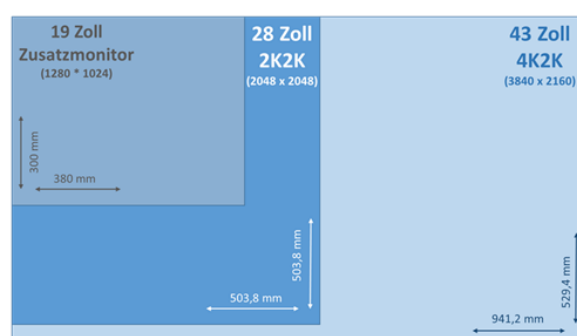


Abb. 3: Größenvergleich verschiedener Monitore.

Sofern also keine formatfüllende Darstellung der Luftlage (Air Situation Window ASW) erforderlich ist, eröffnet ein großformatiger Monitor die Möglichkeit, die freie Displayfläche zur Integration von derzeit verteilten Displays auf einem Monitor zu nutzen. Der Schwerpunkt im aktuellen Vorhaben liegt daher auf der weiterführenden Untersuchung der betrieblichen Eignung von großen Monitoren unter Berücksichtigung von iCAS. Welche aktuellen und in iCAS vorgesehenen Anzeigen integriert werden sollten, hängt zuvorderst von der Arbeitsumgebung der Lotsen und spezifischen Arbeitsweisen ab. Hier gilt es je nach EBG die besonderen Anforderungen aber auch Einschränkungen zu bestimmen. Dazu gehören auch Grundsatzfragen, welche Anzeigearten und -typen weniger zur Integration geeignet oder ganz zu vermeiden sind, z.B. grafische oder alphanumerische Anzeigen, Farben und Formen, statische und dynamische Anzeigen. Diese zu ermitteln und zu evaluieren war ebenfalls Gegenstand dieser Arbeit.

Auch in Anbetracht zunehmender Automatisierung und weiterer Unterstützungssysteme, ist die Bedeutung einer integrierten Darstellung von relevanten Informationen nicht zu unterschätzen. Große Monitore können Wegbereiter sein und schaffen mutmaßlich erst

die Möglichkeit, solche Systeme adäquat zu nutzen. Als Beispiel sei die adaptive Anzeige häufig genutzter Informationen, Menüs, und Eingabefelder zu nennen, die abgestimmt auf die aktuelle Verkehrssituation automatisch erfolgt oder bedarfsgerecht zuschaltbar ist.

Das Potential großer UHD Monitore lässt sich zusammenfassen:

- Einsparmöglichkeiten, da Beschaffungskosten bei Standardformaten potenziell geringer sind als bei Nischenprodukten, wie quadratische 2k2k Monitore.
- Komplexitätsreduktion und verbesserte Informationspräsentation durch Integration von verteilten Anzeigen auf einen Bildschirm.
- Zusatzmonitore können zumindest teilweise entfallen. Bei einer optimierten Integration aller notwendigen Anzeigen möglicherweise sogar jeder einzelne.
- Berücksichtigung des erhöhten Platzbedarfs auf dem Hauptbildschirm durch zusätzliche Anzeigen mit Einführung von iCAS. Relevante Anzeigen, die auf getrennten Extramonitoren dargestellt werden müssen, könnten auf dem ASW erscheinen.
- Wegbereiter für zukünftige Automatisierung und Unterstützungswerkzeuge am Lotsenarbeitsplatz, die eine integrierte und angepasste Darstellung von situationsabhängiger und bedarfsgerechter Information erfordert.
- Erleichtert eine ergonomische Gesamtgestaltung des Lotsenarbeitsplatzes. Ein einheitliches Erscheinungsbild aller Anzeige- und Bedienelemente gepaart mit einem einheitlichen Bedienkonzept trägt wesentlich zur Verbesserung der Ergonomie bei.
- Die Chance für ein modernes Design für einen zukunftsfähigen Lotsenarbeitsplatz mit gesteigerter Usability und Effizienz.
- Durch eine Harmonisierung der Anzeigen kann sich der Systemwartungsaufwand reduzieren, da anstatt verteilten Displays mit unterschiedlichen Anzeigeformaten, Bildschirmauflösungen und Darstellungsqualitäten sowie Bedienelementen ein geschlossenes homogenes System und HMI gepflegt werden muss.

### Vorgehen

Zusammen mit Lotsen sollten verschiedene Möglichkeiten der Arbeitsplatzgestaltung mittels 43-Zoll Monitore konkret beschrieben und verglichen werden. Die Möglichkeiten wie auch Grenzen der integrierten Darstellung von Informationen und Daten auf einem Monitor sollten ermittelt werden und daraus

Empfehlungen für einen Einsatz im Betriebsraum abgeleitet werden.

Ziel war eine Bewertung mit Hilfe arbeitswissenschaftlicher Methoden (Human Factors), ob die Darstellung der Luftlage sowie weiterer Informationen durch Integration von derzeit verteilten Displays/ Monitoren auf einen marktüblichen 43-Zoll Monitor, für den Lotsenarbeitsplatz geeignet sind. Spezifische kritische Fragestellungen sind hierbei mögliche Informationsüberfrachtung, Ablenkung und mögliche Effekte durch dynamische, farbige oder kontrastreiche Anzeigen beim peripheren Sehen. Das kann bedeuten, dass sich nicht alle derzeitigen Anzeigen für eine Integration eignen und sorgsam abgewogen werden sollte, wie eine sinnvolle Integration erfolgen kann.

Des Weiteren sollten weitere Anzeigoptionen entwickelt werden, die über derzeit genutzte Displays/ Monitore hinausgehen, d.h. eine aufgabenorientierte und flexible Informationsanordnung ermöglichen. Besonders mit Blick auf eine weitergehende Automatisierung am Lotsenarbeitsplatz kommt einer integrierten Darstellung von situationsabhängigen und bedarfsgerechten Informationen eine zentrale Aufgabe zu. Große Monitore können ein Wegbereiter dafür sein.

Der Fokus lag auf den Arbeitsplätzen von Executive und Planner an den Center-Niederlassungen möglichst unter Berücksichtigung von iCAS. Die Einsatzbarkeit der Monitore in den Lufträumen UIR, FIR und APP sollte ermittelt und geeignete Arbeitspositionen bestimmt werden. Entsprechend werden die dort vorhandenen Funktionalitäten und Displays/ Monitore auf einen Bildschirm integriert (z.B. SDD, MDW, AMAN, ATCISS, ADD, Wetter, u.a.).

Diese Evaluation erfolgte unter Beteiligung von Lotsen. Vorgesehen war ein exploratives Vorgehen, bei dem die Lotsen unter realitätsnahen Bedingungen die integrierten Anzeigen am jeweiligen Monitor kennenlernen, ausprobieren und bewerten sollen. Es handelte sich dabei nicht um eine aufwändige Realzeitsimulation. Um eine realitätsnahe Umgebung abzubilden, erfolgt die Nutzung von Prototypen, d.h. Mock-ups des HMI mit Darstellung von dynamischen Inhalten, in FVK ähnlicher Umgebung. Um Interaktionen zu ermöglichen sind Eingabemenüs mit dem Look & Feel vom derzeit vorgesehenen iCAS auf einem ASW mit Verkehrsszenario ein wesentlicher Bestandteil.

Folgende Schritte waren in dieser Untersuchung vorgesehen.

Stufe 1: Benchmark mit anderen ANSP, ob und wie große Monitore genutzt werden und Vergleich der Anwendungsfälle

Stufe 2: In einer Bestandsanalyse wurden zunächst die vorherrschenden Anzeigen und Displays der bei iCAS verwendeten Monitore berücksichtigt. In einer Erstbefragung von Lotsen wurde der Bedarf und erste Anforderungen an integrierte Anzeigen erhoben.

Stufe 3: Erster Prototyp. Die Eignung der unterschiedlichen Anzeigen für eine Integration wurde zusammen mit den Nutzern erhoben und die Anforderungen für unterschiedliche Arbeitsplätze, je nach EBG und für Executive und Planner Position ermittelt. Dazu wurde eine Entwicklungsplattform erstellt, um unterschiedliche Anzeigekonzepte und verschiedene Layouts von integrierten Anzeigen einfach und flexibel erzeugen zu können. Die in der Erstbefragung identifizierten Displays sowie iCAS-spezifische Anzeigen werden entsprechend nachgebildet, bzw. auf die physikalischen Eigenschaften des 43-Zoll Rechteckmonitors angepasst (Auflösung, verfügbare Fläche).

Stufe 4: Lotsenbefragung zur Festlegung von Anzeigekonzepten. Die diversen Anzeigen können auf unterschiedliche Weise auf einem Monitor integriert werden. Welche nach Ansicht der Lotsen betrieblich sinnvoll sind, wurde erarbeitet. Die drei erfolgversprechendsten Konzepte sollten daraufhin intensiver evaluiert werden.

Stufe 5: Durchführung der Evaluation. Lotsen sollen die integrierten Anzeigen unter realitätsnahen Bedingungen bewerten. Human Factors Experten des Forschungszentrums führen Befragungen durch. Aus den Auswertungen der quantitativen und qualitativen Daten werden Empfehlungen abgeleitet, ob und wie große Monitore am Lotsenarbeitsplatz genutzt werden sollten.

Stufe 6: Um gezielt spezifische Fragestellungen unter Human Factors Aspekten zu untersuchen sollten prototypische Anzeigen mit unterschiedlichen Eigenschaften entwickelt werden. So kann für eine Integration zukünftiger Displays/ Anzeigen auf einem Monitor bestimmt werden, welche Arten und Typen von Darstellungen geeignet sind und welche weniger, sodass grundsätzliche Gestaltungsempfehlungen erhalten werden können.

Als Monitormodelle standen jeweils ein Modell von EIZO und LG zur Verfügung.

Firma: EIZO Modell: Raptor RP4325 (für den professionellen Einsatz, 24/7 zertifiziert) mit bis zu 3840 x 2160 @ 60 Hz;

Firma: LG Modell: 43UD79 (Consumer Electronics) mit bis zu 3840 x 2160 @ 60Hz;

Beide Monitore haben eine Bildschirmdiagonale von 43-Zoll (=108 cm) mit einer Displaygröße von 945 x 530 mm und ein Seitenverhältnis von 16:9. Sie werden als sogenannte UHD 4K, 2160p bezeichnet. Ursprünglich wurde der Begriff 4K-Auflösung für 4096 x 2160 Pixel benutzt. Die Hersteller bezeichnen Fernsehgeräte mit 3840 x 2160 Pixeln jedoch heute durchgängig mit 4K (Wikipedia).

Dazu im Vergleich der quadratische Standardmonitor am Lotsenarbeitsplatz der DFS, ebenfalls von der Firma EIZO, Modell Raptor SQ2804 mit 2048 x 2048 px und einer Bildschirmdiagonale von 28,1 Zoll/ entsprechend 71,2 cm).

An dieser Stelle soll betont werden, dass die durchgeführten Aktivitäten nicht das Ziel hatten, eine Bewertung der Hardware und Auswahl eines geeigneten Monitormodells durchzuführen. Vielmehr lag der Schwerpunkt auf der konzeptionellen Bewertung der Eignung großer Monitore am Lotsenarbeitsplatz. Mit welchen konkreten Monitormodell eine Realisierung möglich ist, muss zum gegebenen Zeitpunkt anhand der Marktsituation und den gestellten Anforderungen geprüft werden.

## Benchmark zur Monitornutzung anderer ANSP

Ein Vergleich mit anderen ANSP sollte zunächst aufzeigen, ob und wie große Monitore genutzt werden. Daraus lassen sich Anwendungsfälle ableiten und mit denjenigen der DFS vergleichen, um Synergieeffekte zu heben.

Durch Anfrage an SESAR Partner im April 2019 sowie über direkte Kontakte und Hinweise von Kollegen konnten verschiedene Ansätze zum Gebrauch und Einsatz von großen Monitoren ermittelt werden. Darunter waren die Flugsicherungen von NATS, LVNL, FAA, LFV, ENAIRE, und Oman. Beispiele aus den Centern von Tallinn und Kaliningrad sowie das Projekt MARS (Multiplatform ATC Re-hosting Solution) von Raytheon und WEYTEC.

Die vorgefundenen Beispiele zeigten, dass die Ansätze zur Nutzung von großen Monitoren sich sowohl von der Zielsetzung wie auch in der Umsetzung unterscheiden, es existiert ein breites Spektrum an Lösungen. Ein großer Monitor zur Anzeige der Luftlage allein ist zwar

bereits ein Gewinn, da Skalierung und Luftraumdarstellung profitieren, schöpft aber das Potential, das die größere Fläche bietet, nicht aus. Dennoch fand sich nur teilweise eine Integration von Anzeigen.

Sowohl ergonomische Aspekte als auch eine Reduktion der erforderlichen Technik an der CWP ließen sich als Zielsetzung für den Einsatz großer Monitore finden. Dass Funktionalität auch mit einem modernen Design gepaart werden kann, zeigten die Beispiele von Indra und Enaire mit einer ganzheitlichen Lösung von HMI und Hardware.

Die verfügbare aktuelle Monitortechnik wird weitestmöglich genutzt, teilweise kombiniert mit Multi-touch Funktionalität und innovativen Gestaltungsansätzen. Quadratische Monitore schienen zunehmend ihre Daseinsberechtigung zu verlieren und werden durch aktuelle Standardformate ersetzt. Auch monetäre Aspekte spielen bei den Entscheidungen der ANSPs eine wichtige Rolle. NATS hat sich für den Einsatz eines Massenmarktproduktes von LG entschieden, ähnlich dem oben beschriebenen. Zusammengefasst lässt sich festhalten

- Quadratische Monitore verlieren zunehmend ihre Daseinsberechtigung.
- Die DFS kann bezüglich CWP Gestaltung eine Technologieführerschaft nicht beanspruchen.
- Andere ANSP sind deutlich innovativer und haben die betriebliche Nutzung großer Monitore bereits umgesetzt oder sind kurz davor.
- Zwischen ANSPs gibt es unterschiedliche Nutzungskonzepte.
- Ein integriertes Arbeitsplatzkonzept von Anzeige- und Bedienkomponenten ist unter allen berücksichtigten Firmen nur teilweise vorhanden (ganzheitliche Lösung von HMI und Hardware).
- Oft wird eine Negativdarstellung verwendet.
- Monetäre Aspekte spielen bei den Entscheidungen der ANSPs eine wichtige Rolle.
- Teilweise werden Massenmarkt-Produkte (Consumer Monitore) genutzt.

### Bestandsanalyse - Erstbefragung von Lotsen

Es wurden 5 Lotsen die Ausbilder-Funktionen ausüben befragt, wie sie sich die Nutzung eines großen Monitors vorstellen könnten. Dazu wurde ihnen am EIZO Monitor ein einfaches Mock-up gezeigt, auf dem mithilfe von diversen Screenshots unterschiedliche Beispiele von Anzeigen vorgestellt wurden, die sie bereits aus dem Betriebsraum kannten oder zukünftige Anzeigen gemäß iCAS. Insgesamt wurden unterschiedlichste Layouts und

diverse Anzeigen variiert. Die Lotsen sollten angeben, welche Anzeigen sie derzeit benötigen und beurteilen, welche auf einem großen Monitor angezeigt werden sollten und wie. Auch Wünsche nach zusätzlichen und zukünftigen Anzeigen wurden erfragt. Die befragten Lotsen hatten allerdings bisher keine tieferen Einsichten in das iCAS-System. Auch wenn ihnen diverse iCAS Anzeigen vorgestellt und erklärt wurden, waren Aussagen zu möglichen zukünftigen Anzeigen nur eingeschränkt möglich.

Neben der Darstellung eines Radardisplays wurden folgende Zusatzdisplays genannt, die auf einem großen 16:9 Monitor integriert werden könnten:

- ATCISS und diverse Unterseiten, Nutzungshäufigkeit unterschiedlich nach EBG
- Grafische Wetterdarstellung (METFROG)
- Allgemeine Wetterinformationen (METAR)
- AMAN/CMAN Zeitleitern
- Hot Keys – schnell zu erreichende Funktionen, die man kurzfristig an-/ abschalten kann
- Planner Position: Sectorload Display (wie bei AMAN NRW Stufe 3 Validierungen verwendet)
- Info Display, um bedarfsgerecht wechselnde Zusatzinformationen anzuzeigen, z.B. LFZ Datenbank
- Die nicht für das Radar vorgesehene Fläche könnte individualisierte Darstellungen ermöglichen, abgestimmt auf Luftraum, Verkehrssituation, Sonderfälle.

Ebenso wurden noch spezielle Anforderungen genannt, die über eine reine Darstellung hinaus gehen. Der Monitor muss:

- hinreichend robust sein, d.h. resistent gegen Kratzer, Druck, manuelles Bewegen, etc.; Robustheit ist ein K.o.-Kriterium,
- spiegel- und blendfrei sein und
- leicht zu reinigend (Fingerabdrücke, Kugelschreiber).
- Der Blickwinkel muss groß genug sein, insbesondere, wenn Planner und Executive gegenseitig aufs Display schauen, daher sollte
- die Anzeige Planner – Executive gespiegelt sein, d.h. die Radardisplays sollten sich nahe sein, falls sie nicht zentriert auf dem Bildschirm liegen.
- Wünschenswert sind wärmere Farbtemperaturen („Blaulichtreduzierung“ also Verminderung der blauen Anteile im Farbspektrum), vor allem während Nachtdiensten.

In Breitruck (2014) wurden u.a. noch folgende Eigenschaften und Anmerkungen genannt:

- Einschränkungen der Erkennbarkeit durch Blickwinkelabhängige Eigenschaften des Monitors
- Informationsüberlastung
- Dauerbelastbarkeit und Ausfallsicherheit ist zu klären
- Durch Anschaffung erzeugte mögliche Folgekosten, z.B. Umbau oder Anpassung der Konsolen
- Einleitung weiterer Prozesse und Maßnahmen erforderlich, wie z. B. Validierungen, Sicherheitsbewertung (SiBe), Schulungen, Aktualisierung von Unterlagen, etc.

Gerade die beiden erstgenannten Punkte sind bei der Bewertung, ob ein großer Monitor auch tatsächlich betrieblich genutzt werden kann von Bedeutung.

## Evaluationsplattform RAPS

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Erstbefragung, dass eine realitätsnahe Evaluation mit Screenshot-basierten Mock-ups, nur eingeschränkt möglich ist, war es erforderlich, eine entsprechende Entwicklungsumgebung zu erstellen. Diese soll es ermöglichen, Anzeigen einfach zu integrieren und Layouts flexibel arrangieren zu können. Das Systemhaus entwickelte zusammen mit der Abteilung Simulationen, Forschung und Entwicklung eine Oberfläche mithilfe derer unterschiedliche Anzeigen auf dem Monitor angezeigt werden können. Diese basiert auf dem Rapid ATC Prototyping System – RAPS welche vom SH bereits genutzt wird. RAPS ist eine Entwicklungsplattform, um auf schnelle und einfache Weise neue Darstellungs- oder Bedienkonzepte für Lotsenarbeitsplätze zu erproben.

Dabei besteht es im Kern aus einem Modul, das Daten für Tracks und Flugplänen aus einem Simulator oder auch aus eingebetteten Szenarien verarbeiten kann. Somit kann es interaktiv mit mehreren Arbeitsplätzen, oder wahlweise als kompaktes Demonstrationssystem auf einem autarken Rechner eingesetzt werden.

Darauf aufbauend ist eine Benutzeroberfläche auf Basis von Qt/QML aufgesetzt. Qt ist eine weit verbreitete C++-Programmiersbibliothek und QML (Qt Modeling Language) eine darauf basierende Scriptsprache. Die QML-Plattform ist darauf spezialisiert Zustandsänderungen der zugrundeliegenden Daten zu erkennen, und effizient nur die daraus resultierenden Änderungen in der Darstellung zu bearbeiten. Dabei arbeitet sie sehr eng mit dem Grafikprozessor zusammen und nutzt dessen volle Performance. Die eigentlichen Berechnungen der Positionen der Luftfahrzeuge und deren Attribute wie

Abstände zueinander und die Sektorzugehörigkeit werden in einem in C++ geschriebenen Modul berechnet, um für dieses Teile plattformunabhängig zu bleiben.

Das QML-Programmierkonzept ermöglicht durch seine deklarative Beschreibung der Darstellung sehr agile Umsetzung der Nutzerwünsche. Auch das Verhalten der Widgets und deren Interaktionsmöglichkeiten können in QML sehr einfach beschrieben und geändert werden. So wurden mittlerweile für verschiedenen Projekte verschiedene Menü-Konzepte implementiert, und jeweils auf die Luftlagedarstellung gelegt. Die Handhabung und Funktionalität konnten sehr schnell ausprobiert und variiert werden.

Des Weiteren wurde ein sehr flexibles Layoutkonzept implementiert, dass an beliebigen Positionen beliebige Widgets darstellen kann, deren Eigenschaften in vielerlei Hinsicht konfigurierbar sind. Dazu wurde die Bildschirmfläche in verschiedene Bereiche aufgeteilt, die jeweils skalierbar sind und entsprechend eingeblendet werden oder nicht. In den eingeblendeten Bereichen können jeweils unterschiedliche Anzeigen platziert werden. Dabei sind grundsätzlich beliebige Belegungen der Bereiche möglich.

Über ein Konfigurationsmenü werden Inhalte, Größe und weitere Attribute der Bereiche festgelegt. Nicht benötigte Bereiche werden nicht angezeigt, die mögliche Größe der anderen Bereiche kann dann entsprechend vergrößert werden. Mithilfe zahlreicher Konfigurationseinstellungen ist es möglich, unterschiedlichste Darstellungskonzepte zu evaluieren. Insbesondere die Erstellung von umschaltbaren Features spielte eine wichtige Rolle bei der Evaluation der Konzepte. Es sind auch einige Widgets vorhanden, die eine interaktive Bearbeitung der Flüge zulässt. Andere Widgets wurden durch Screenshots operationeller Subsysteme eingeblendet, da diese nur mit großem Aufwand an das RAPS angebunden werden könnten.

Mithilfe dieser Entwicklungsplattform ist es somit möglich, Teile eines Standard DFS Lotsenarbeitsplatzes 1:1 auf einem Monitor darzustellen, wie in Abb. 4 zu sehen. Hierbei würde sogar noch Platz bestehen, um eine Menüleiste anzuzeigen und man könnte sogar einen Bereich „Custom Display“ nutzen, um z.B. spezifische iCAS Anzeigen und Menüs darzustellen.

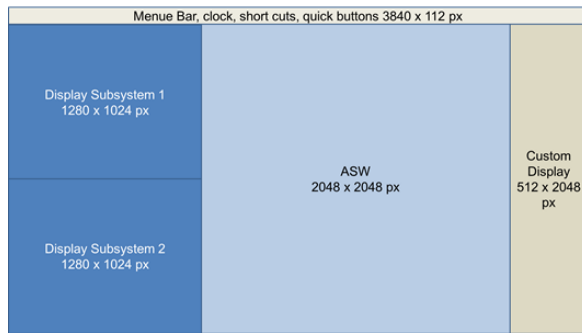


Abb. 4: Beispiel zur Aufteilung der verfügbaren Bildschirmfläche in Bereiche in Anlehnung an DFS Lotsenarbeitsplatz.

### Bewertung erster Prototyp

Die Befragung von Lotsen aus dem sogenannten Boxer-Team erfolgte im Juli 2020 mit 5 Teilnehmern. Ziel war es, möglichst viele Hinweise zur Nutzung von großen Monitoren am Lotsenarbeitsplatz zu erhalten. Die Grundidee war dabei die einer 1:1 Integration von zwei Zusatzanzeigen, um den Status quo abzubilden, wie in Abb. 4 schematisch dargestellt. Die Übertragung eines Teils des aktuellen Ist-Zustands von zwei Zusatzdisplays (Subsystem 1 + 2) auf eine Monitorfläche, ließe außerdem noch Raum für weitere Anzeigebereiche (Custom Display) oder stattdessen ein größeres ASW.

Es wurden gemeinsam verschiedene Wünsche, Vorschläge und Anforderungen erarbeitet. Diese Befragung diente auch dazu, grundsätzliche Designentscheidungen zu identifizieren. Sie ist ein wichtiger Schritt zur Detailspezifikation der verschiedenen Anzeigekonzepte, die in der anschließenden Evaluation bewertet werden sollen.

Die Dauer der jeweiligen Sitzung war ca. 60 – 90 min, inklusive Vorstellung des Vorhabens, der Möglichkeit zum Ausprobieren und einer Befragung mithilfe Interviewleitfaden sowie Fragebogen.

Die Befragung lief folgendermaßen ab:

1. Vorstellung des Vorhabens
2. Präsentation beispielhafter Anzeigen auf dem großen Monitor
3. Ausprobieren
4. Befragung mittels Interviewleitfaden
5. Wiederholung der Schritte 2. bis 4.
6. Vorlage Fragebogen
7. Verabschiedung

### Ergebnisse

Es wurden verschiedene Themenbereiche mittels Interviewleitfaden erfragt und gegebenenfalls im Dialog vertieft. Ergänzend wurde den Teilnehmern ein Fragebogen vorgelegt. Die Ergebnisse werden im Folgenden nach Themenfeldern dargestellt.

#### Anzeige der Luftlage

Die Lotsen sollten angeben, ob sie eine Anzeige der Luftlage und der Subsysteme in getrennten Bereichen neben dem ASW vorziehen oder eine Nutzung des gesamten Bildschirms für die Radar-Darstellung mit darüberliegenden verschiebbaren Fenstern, Menüs etc. Dies ist eine der Grundsatzentscheidungen für das weitere Anzeige- und Bedienkonzept.

Aufgrund der erweiterten Möglichkeiten, die Darstellung der Luftlage an die Gegebenheiten anzupassen (Scale und Verkehrsübersicht; Sektorzuschnitt; Verkehrsströme; individuelle Bedürfnisse, etc.), wurde von den meisten Lotsen ein ASW über den gesamten Bildschirm favorisiert.

Wenn allerdings feste Bereiche, wie im Dashboard-Konzept genutzt werden, dann sollte zumindest der Bereich für das ASW größer sein.

In den Ergebnissen des Fragebogens wurde beiden Anzeigeoptionen Fenster und Vollbild gleichermaßen eine Eignung attestiert.

Im Dashboard-Konzept könnte das ASW außermittig angezeigt werden, daher wurden die Lotsen befragt, wo das Radar platziert werden, wenn es in einem eigenen Fenster dargestellt wird (links, rechts, mittig) und ob es immer zentriert sein soll. Da dies dem gewohnten Erscheinungsbild widerspricht, waren die Lotsen zunächst skeptisch. Letztendlich sei es eine Gewöhnungssache. Wichtig war für sie, dass man mittig vor dem ASW sitzen kann, was bei der Gestaltung der Arbeitstische zu berücksichtigen ist.

#### Mögliche Anzeigen zur Integration

Hier sollten grundsätzliche Anzeigen ermittelt werden und solche die dauerhaft, regelmäßig oder bei Bedarf benötigt werden. Es wurde gefragt, welche Informationen neben einer Radardarstellung angeboten werden sollten. Welche Vorstellungen man hat, welche Wünsche es gibt und woran es derzeit mangelt.

Eine wichtige Aussage war, dass die benötigte Zusatzdisplays, bzw. Anzeigen für jeden Arbeitsplatz (EBG) individuell unterschiedlich sind. Beispielsweise

unterscheiden sich Anzeige und Nutzung des AMAN an Feeder und Center Position.

Unabhängig von der Arbeitsposition sollte ein AMAN vorzugsweise auf dem großen Monitor angezeigt werden, ebenso eine Anzeige von Wetterinformationen, bzw. der grafischen Wetterdarstellung (METFROG) bei Bedarf. Informationen zu zukünftig relevanten LFZ wurden ebenfalls genannt, z.B. Departure Listen, die im iCAS-System auf Zusatzmonitoren (AUX Display) angezeigt würden, um den Platz auf dem ASW nicht einzuschränken. Stattdessen könnten diese Informationen auf dem großen Monitor neben dem ASW dargestellt werden, also dort wo man sie regelmäßig benötigt.

Es wurde grundsätzlich eine andere Organisation der Informationen gewünscht. Dazu gehörte auch die bessere Integration der bestehenden Anzeigen und ein einheitliches „Look & Feel“.

Als Anzeigen, die auf dem großen Monitor zusätzlich zum ASW angezeigt werden sollten, wurden die folgenden genannt (Tabelle 1). Die Antworten sind in Kategorien zusammengefasst, unmittelbar FVK relevant, Informationen bei Bedarf und Wetter. Die Anzahl der potenziell gewünschten Anzeigen überschreitet die mögliche Anzahl bei einer 1:1 Lösung. Das bedeutet, dass weiterhin mindestens ein Zusatzmonitor benötigt würde. Alternativ müssten die integrierten Anzeigen so gestaltet werden, dass der erforderliche Platzbedarf optimiert würde. Das sollte in der folgenden Stufe der Untersuchung durchgeführt werden.

Tabelle 1: Gewünschte Anzeigen auf dem ASW

|                                                           |
|-----------------------------------------------------------|
| ATCISS                                                    |
| Zweites ATCISS/ ATCISS Seite                              |
| ADD (Additional Data Display)                             |
| SDD (Situation Data Display)                              |
| AMAN (Arrival Manager)                                    |
| Bodenradar (bei APP FRA)                                  |
| iCAS Departure Liste                                      |
| iCAS Holding Liste                                        |
| Conflict Risk Display                                     |
| Coordination Fenster                                      |
| Zusatzanzeigen für Infos über VFR, Segelflug etc. (NOTAM) |
| Absprachen                                                |
| ICAO Karte                                                |
| BA-FVD                                                    |
| ATIS (Automatic Terminal Information Service)             |
| AC-Viewer                                                 |

|                                                                                                         |     |            |                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------------|-------------------------|
| Infobox mit den aktuellen Absprachen zu angrenzenden EBGn                                               |     |            |                         |
| Metfrog                                                                                                 | bei | Bodenradar | zusätzlich eingeblendet |
| Wetter/ METAR (Meteorological Aviation Routine Report)                                                  |     |            |                         |
| Wetter/ Metfrog                                                                                         |     |            |                         |
| Metfrog wird nur bei Bedarf angezeigt, d.h. wenn beeinflussende Wetterphänomene beurteilt werden müssen |     |            |                         |

## Entwicklung von Darstellungskonzepten

Eine der wesentlichsten Aufgaben bei der Gestaltung eines HMI ist es, aus einem Überfluss von Daten die Bereitstellung klarer, einfach zugänglicher Informationen zu gewährleisten. Es ist wichtig, nur die relevantesten Daten darzustellen, denn je mehr Informationen angezeigt werden, desto schwieriger ist es für einen Benutzer, das zu finden, was aktuell benötigt wird. Im Prinzip bedeutet das, so viel Informationen wie nötig, so wenig wie möglich.

Als Ergebnis der oben beschriebenen Bewertung der ersten prototypischen Anzeigen ergaben sich unterschiedliche grundsätzliche Möglichkeiten der Darstellung, die nun im Detail ausgearbeitet werden mussten. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse und einer Abkehr von der 1:1 Lösung, mussten außerdem Anpassungen an der Evaluationsplattform RAPS vorgenommen werden, um flexibler unterschiedliche Anzeige-konzepte umzusetzen.

Es gibt unterschiedlichste Ansätze wie man die für einen Fluglotsen relevanten Daten anzeigen kann. Aufgrund der bisherigen Befragungen waren die drei Anzeigekonzepte Dashboard, Fenstertechnik und Hybrid, die vielversprechendsten Kandidaten, wie die Integration der diversen Subsysteme erfolgen könnte.

## Dashboard - Anzeige von Einzelbereichen

Mit dem Begriff Dashboard (Armaturenbrett, Instrumententafel) wird eine grafische Benutzeroberfläche bezeichnet, die zur Visualisierung der wichtigsten Informationen dient. Damit sollen bedarfsgerecht Daten aus verschiedenen Quellen, die für die Arbeitsaufgabe erforderlich sind, in einer Sicht zusammengefasst und angezeigt werden. Die Daten werden konsolidiert auf einem einzigen Bildschirm angeordnet, sodass die Informationen auf einen Blick überwacht werden können.

Ist ein Dashboard überschaubar aufgebaut, vereinfacht es die visuelle Darstellung komplexer Daten und hilft dem

Nutzer, wichtige Erkenntnisse zu verstehen, zu analysieren und anzuwenden. Optimalerweise sind Dashboards klar strukturiert, intuitiv und schnell zu verstehen und anpassbar auf individuelle Bedürfnisse.

Die Grundprinzipien von Dashboards lassen sich für den Lotsenarbeitsplatz folgendermaßen zusammenfassen:

- Die Radaranzeige (SDD bzw. ASW) kann vollflächig dargestellt werden oder es hat eine definierte Größe.
- Feste Bereiche für die Präsentation von Daten, die unterschiedlich angeordnet werden können.
- Das Design bietet einen kohärenten Überblick.
- Alle wesentlichen Informationen sind sofort verfügbar, verständlich aufbereitet sowie einfach und schnell zu erfassen.
- Daten werden priorisiert. Informationen sind weder versteckt noch überladen.
- Informationen werden auf einem Bildschirm übersichtlich in einer visuellen Hierarchie angezeigt.
- Elemente (Diagramme, Tabellen und Listen, Formulare, etc.) können bei Bedarf ein- und ausgeblendet werden.
- Benutzer können die Anzeige von Daten anpassen, Inhalte filtern und priorisieren.
- Informationen sind weder versteckt noch überladen.

Eine mögliche Konfiguration von Teilen des heutigen ACC Lotsenarbeitsplatz könnte wie in Abb. 5 aussehen. Ähnlich einem Schiebepuzzle könnten die Einzelflächen unterschiedlich angeordnet werden. Hier sind fünf Subsysteme dargestellt. Die Größe und damit mögliche Anzahl der dargestellten Subsysteme können variiert werden. Sie sind am rechten und linken Bildschirm angeheftet und können ein- und ausgeblendet werden. Darunter liegt vollflächig das ASW. Wird der Bereich für ein Subsystem ausgeblendet, erscheint somit mehr ASW Fläche.

Ebenso könnte es eine Option sein, die Einzelflächen skalierbar zu machen, um das ASW zu vergrößern, wenn es die Sektorkonfiguration oder Luftlage erfordert. Aufgrund der Displayhöhe könnte es außerdem sinnvoll sein, die Menüleiste (Menu Bar) am unteren Bildschirmrand anzuzeigen. In Abb. 6 ist das Dashboard mit Beispielinhalten gefüllt.

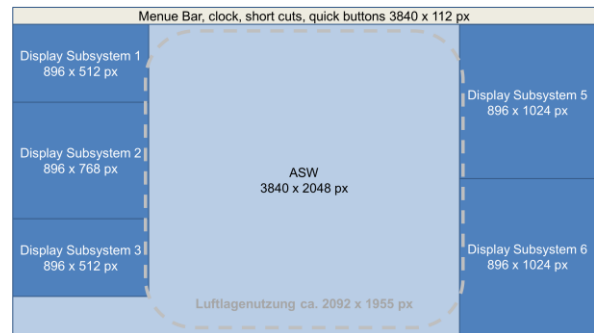


Abb. 5: Dashboard-Konzept, Beispiel zur Aufteilung der verfügbaren Bildschirmfläche in Bereiche.

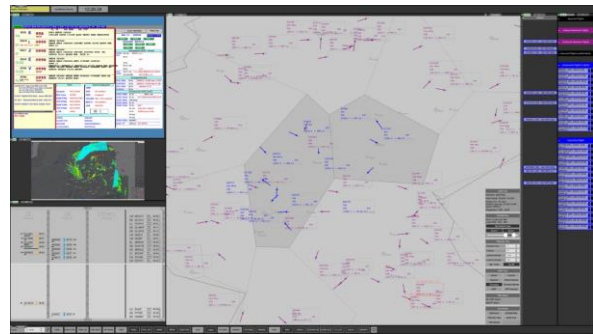


Abb. 6: Beispiel für Dashboard mit ATCISS, Metfrog, AMAN sowie WPT Manager und FPL Liste.

## Vollflächige Anzeige der Luftlage und Fenstertechnik

Hier wird der gesamte verfügbare Bildschirmbereich für die Darstellung des ASW genutzt. Alle weiteren erforderlichen Informationen, Daten und Eingabemenüs werden in darüberliegenden Fenstern angezeigt, wie beispielhaft in Abb. 7 dargestellt. Das ermöglicht größtmögliche Flexibilität bei der Einstellung und Nutzung des ASW an den jeweiligen Sektor und die Arbeitsposition und damit Anpassbarkeit an individuelle Arbeitsweisen.

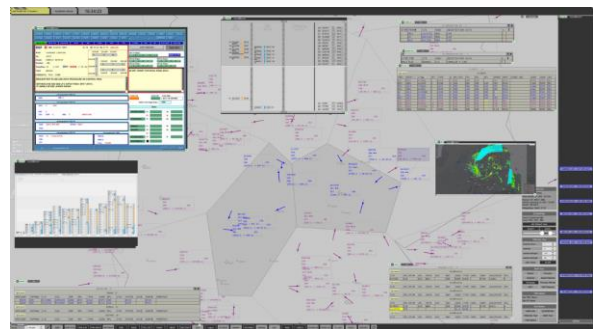


Abb. 7: Beispiel für Fenster mit ATCISS, Metfrog, AMAN sowie FPL Liste und iCAS Elementen.

Die Fenstertechnik beinhaltet zwangsläufig weitere Untersuchungsthemen. Dazu gehören Sicherheitsaspekte wie unabsichtliches Verdecken von Informationen auf dem ASW durch Fenster oder das Suchen von Informationen in besonderen oder stressigen Situationen, weil sie nicht am gewohnten Ort verfügbar sind. Zudem könnte die Nutzung von Fenstern die effektiv verfügbare Fläche zur Darstellung der Luftlage spürbar einschränken und der Vorteil großer Monitore damit vergeudet werden. Nicht zuletzt muss die technische Lösung zur Speicherung und zum Abruf von individuellen Lotseneinstellungen ebenfalls geklärt werden.

### Hybrid – Dashboard mit wenigen Fenstern

Dieser Vorschlag sieht vor, dass essenzielle Bereiche wie im Dashboard fest vorgegeben sind und/oder nur eingeschränkt skalierbar. Es gibt wenige zusätzliche Fenster, die entweder bedarfsgerecht manuell aufgerufen oder automatisch eingeblendet werden. Diese sind auf dem ASW verschiebbar. Dies ermöglicht wiederum individualisierte Arbeitsweisen und Umsetzung persönlicher Vorlieben bei den angezeigten Daten. Gleichzeitig gewährleistet das Hybrid-Konzept, dass die notwendigen Anzeigen an einem gewohnten Ort aufgefunden werden können, d.h. der Bildschirm bleibt übersichtlich und wesentlichen Informationen sind sofort verfügbar. In Abb. 8 ist ein Beispiel dargestellt. Auf der linken Seite wieder das Dashboard, mit ähnlichen Inhalten wie in Abb. 6. Nun wurde die Metfrog-Anzeige herausgelöst und auf dem ASW platziert. Die freigewordene Dashboard Fläche wurde mit einer anderen Anzeige befüllt.

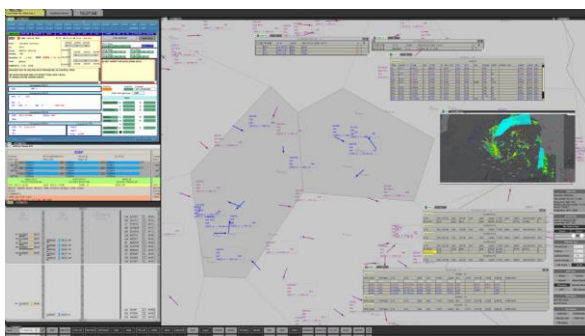


Abb. 8: Beispiel für Hybrid-Darstellung mit herausgelöster Metfrog Anzeige, welche als Fenster angezeigt wird.

### Fragestellungen

Die eigentliche Fragestellung der Evaluation lautete, die Eignung eines großen Monitors am Lotsenarbeitsplatz zu ermitteln und Anforderungen für einen Einsatz zu bestimmen. Vorrangig ist damit der betriebliche Nutzen

verbunden. Daraus lassen sich verschiedene Detailfragen ableiten.

- Wie wird der betriebliche Nutzen eines großen Monitors bewertet und wie hoch ist die Akzeptanz der Nutzer?
- Beeinflusst ein größerer Monitor die Lotsentätigkeit und -leistung negativ?
- Welches Konzept zur Anzeige der Luftlage und Darstellung weiterer Informationen ist betrieblich geeignet (Dashboard, Fenstertechnik, Hybrid)?
- Besteht der grundsätzliche Bedarf an einer größeren Anzeigefläche für die Luftlage (z.B. aufgrund besserer Scale für den jeweiligen Sektor und damit mehr Überblick)?
- Besteht grundsätzlicher Bedarf an größerer Anzeigefläche insgesamt (z.B. aufgrund iCAS Erfordernissen oder zukünftigen Unterstützungssystemen)?
- An welchen Arbeitsplätzen sind große Monitore geeignet? (ACC, APP, UPP; bzw. welche EBG). Gibt es Arbeitsplätze an denen große Monitore nicht geeignet sind?
- An welchen Arbeitspositionen sind große Monitore geeignet? (Executive, Planer)
- Ist eine Standardisierung möglich? (Integration von Anzeigen, Ausgestaltung des Arbeitsplatzes, Hardware, etc.)
- Kosteneinsparung klären, z.B. Nutzung der aktuellen Konsolen oder Umbau; Hardware; Folgeinvestitionen; notwendige Softwareanpassungen.
- Wie sieht eine Klassifizierung von Anzeigen (z.B. Bedeutung, Wichtigkeit, Dringlichkeit) und deren Eigenschaften (z.B. statisch, dynamisch, Anzeigeformat, Text, Grafik, Anzeigegröße, etc.) aus?

Um diese Themen abzudecken, wurde der in den ersten Untersuchungen verwendete Fragebogen weiter ausgearbeitet und ergänzt. Gleiches galt für den Interviewleitfaden, mit dessen Hilfe die Diskussionen inhaltlich strukturiert wurden.

Die Items des Fragebogens sollten auf einer 6-stufigen Skala beantwortet werden: starke Ablehnung – Ablehnung – etwas Ablehnung – etwas Zustimmung – Zustimmung – starke Zustimmung.

### Durchführung

Aufgrund der durch die Corona Pandemie bedingten Einschränkungen ab März 2020 konnte die Evaluation

nicht wie vorgesehen durchgeführt werden. Dies betraf Planung, Inhalt und Durchführung der Evaluation.

Um möglichst viele Lotsen befragen zu können war ursprünglich vorgesehen, einen transportablen Mock-up mit Teilfunktionen einer CWP zu nutzen und somit unter realitätsnahen Bedingungen Lotsenarbeit über längere Zeit durchzuführen. Die Befragung der Teilnehmer mittels Interviews und Fragebogen hätte an den Niederlassungen oder im Forschungszentrum in Langen stattgefunden.

Da Reisen stark eingeschränkt waren und der Kontakt mit operativen Personal auf ein Minimum zu beschränken war, wurden die Untersuchungen im Januar 2021 im Forschungszentrum Langen durchgeführt. Die neun Teilnehmer waren ausschließlich Lotsen der Niederlassung Mitte der EBGn 01, 02, 03, 04, 07 und 10 im Alter von 29 bis 51 Jahre (Mittelwert 39,8 J.) und einer Lotsenerfahrung von 5 bis 26 J. (Mittelwert 15,8 J.).

Es kamen zu jeder Sitzung zwei Lotsen, sodass die ursprünglich geplante Vorgehensweise angepasst werden mussten. Realitätsnahe Übungen mit den verschiedenen Darstellungskonzepten von einem Lotsen durchführen zu lassen, um anschließend Befragungen durchzuführen, war so nicht möglich. Daher wurden die Konzepte jeweils einzelnen vorgestellt, abwechselnd von den Lotsen ausprobiert und in Gruppendiskussionen inhaltlich bewertet. Abschließend füllten die Teilnehmer einen Fragebogen aus.

Somit stellte diese Untersuchung eine Erweiterung der vorherigen Befragung dar, mit vergleichbarer Methodik. Die Anzahl der Teilnehmer war größer, obwohl bedingt durch Coronamaßnahmen einige Absagen zu verzeichnen waren.

## Auswertung und Ergebnisse

### Bewertung Status Quo

Zunächst sollte der aktuelle Stand am Lotsenarbeitsplatz bewertet werden. Grundsätzlich wurde die Darstellung der Luftlage am 2k2k Monitor als geeignet bewertet. Dennoch bestand bei fast allen Teilnehmern der Wunsch nach einem größeren SDD (bzw. ASW). Die abschließende Frage, ob sie zukünftig mit einem großen Monitor arbeiten möchten wurde von allen bejaht.

Als nachteilig beim momentanen Monitor wurde häufig das regelmäßig notwendige Panning und Zooming genannt, also Schwenken des Bildausschnitts und ggf. Zoomen, um relevante Bereiche besser betrachten zu können. Hier bestand die Erwartung, dass mit einem

großen Monitor die Notwendigkeit dazu abnehmen würde.

### Monitoreigenschaften

In einem Fragenblock wurden die physikalischen Eigenschaften des Monitors bewertet. Grundsätzlich positiv wurde die Displayhöhe beurteilt. Die Displaybreite fanden die meisten ebenfalls gut geeignet, teilweise wurde sogar ein noch größerer Monitor bevorzugt. Sowohl der Sehabstand wie die Integration in bestehende Arbeitstische wurden als unkritisch bewertet.

### Bewertung der Integration von Anzeigen

Der betrieblich relevante Fragenblock betraf die Integration von Anzeigen und Datendarstellung, siehe Abb. 9, in dem die Fragen nicht immer im Wortlaut, sondern der Übersicht halber thematisch verkürzt aufgeführt sind. Beide Optionen zur Darstellung der Luftlage – in einem Fenster, bzw. einem Ausschnitt oder als Vollbild über die gesamte Monitorfläche wurden als geeignet bewertet, das Vollbild etwas besser.

Die meisten Befragten erwarten eine Erleichterung ihrer Arbeit durch eine Integration und dass Informationen leichter zugänglich sind. Die Gefahr einer Informationsüberlastung wurde nicht gesehen – Voraussetzung dafür ist laut Interviews eine harmonische Integration der Anzeigen – ebenso wenig eine möglicher Orientierungsverlust.

Weniger eindeutig fiel die Bewertung dahingehen aus, ob evtl. sogar alle Zusatzmonitore entfallen können, wenn deren Anzeigen integriert werden. Hier gab es Meinungen, dass es evtl. Anzeigen gibt, die permanent verfügbar sein müssen. Insbesondere bei bestimmten EBGn könnte ein Zusatzmonitor erforderlich bleiben.

### Eignung Lotsenrolle

Bei der Frage, für welche Lotsenrolle ein großer Monitor besser geeignet sei, gab es Unterschiede zwischen den Meinungen, die in den Diskussionen geäußert wurden und dem Ergebnis des Fragebogens. Letztere ergab eindeutig, dass der große Monitor für beide gleich gut geeignet sei. In den Diskussionen war hingegen eine Tendenz für den Planer festzustellen. Insbesondere durch eine größere verfügbare Bildschirmfläche für die Radaranzeige bei gleicher Scale (Maßstab), wäre eine bessere Vorplanung des Verkehrs möglich. Andererseits haben die Radarlotsen bestimmter EBGn, z.B. Anflugkontrolle oder die Feederposition Vorteile dadurch, dass sie eine bessere Scale einstellen können, ohne den dargestellten Luftraum zu verkleinern.

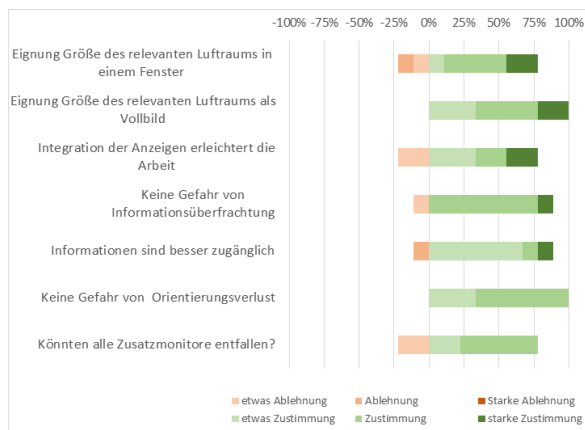


Abb. 9: Bewertung der Integration

## Bewertung Anzeigekonzept

Der wesentliche Inhalt der Untersuchung war es, ein geeignetes Darstellungskonzept zu entwickeln und bewerten zu lassen, mit dem die möglichen Vorteile eines großen Monitors bestmöglich zum Tragen kommen. Nachdem die Lotsen die verschiedenen Konzepte ausgiebig probieren und miteinander diskutieren konnten, war es möglich, die jeweiligen Vor- und Nachteile abzuwägen. Daher sollten abschließend die teilnehmenden Lotsen eine Rangfolge der drei Darstellungskonzepte vornehmen. Auf Platz 1 wurden zwar alle Konzepte gewählt, das Hybride am häufigsten aber das Ergebnis war nicht eindeutig. Daher wurde ein Gesamtscore ermittelt, angelehnt aus dem Regattasport, bei dem der erste Platz einen Punkt erhält, der zweite 2 usw. Der mit den wenigsten Punkten geht als Sieger hervor. Hier erhält die Hybrid-version den Pokal, gefolgt vom Dashboard-Konzept. Das in der zweiten Untersuchung bevorzugte Fenster-Konzept landete nun auf dem letzten Platz.

## Fazit und Empfehlungen

In dieser Untersuchung wurde ein 43-Zoll Monitor auf seine Tauglichkeit als Lotsenbildschirm untersucht. Die Nutzung am Lotsenarbeitsplatz wurde grundsätzlich sehr positiv aufgenommen. Der Wunsch mit einem solchen Monitor zu arbeiten war groß.

Die Integration von derzeit verteilten Anzeigen wurde als sehr gut bewertet, mögliche negative Aspekte als unkritisch betrachtet. Es fehlen jedoch ausführliche Validierungen unter realistischen Bedingungen für die unterschiedlichen EBGn, um ein belastbares abschließendes Urteil abgeben zu können.

Bei den unterschiedlichen Darstellungskonzepten wurde das hybride bevorzugt. Allerdings kann dies nur ein Zwischenstand sein, denn die Präferenz eines Darstellungskonzepts ist noch uneinheitlich und die Repräsentativität nicht ausreichend.

Prinzipiell zeigte die Untersuchung, dass die Integration von verteilten Displays möglich und sinnvoll ist. Allerdings lassen sich ohne Modifikationen auf einem 4K-Bildschirm nur zwei der 19“-Zusatzbildschirme integrieren. Eine 1:1 Übernahme sollte allerdings nicht den Zielzustand darstellen. Zum einen haben die Zusatzanzeigen unterschiedliche Darstellungsqualitäten (Farben, Kontraste, Auflösung, etc.). Insbesondere die farblich stark unterschiedlich designten Zusatzanzeigen würden auf dem großen Monitor mehr stören als auf getrennten Monitoren. Diese müssten daher angepasst werden. Zum anderen wird der verfügbare Platz auf den 19-Zoll Monitoren teilweise verschwenderisch genutzt, sodass deren Integration die verfügbare Fläche für das ASW bzw. für die Darstellung der Luftlage unnötig beschränken würde. Schließlich haben die Zusatzmonitore eine andere Auflösung und daher Pixeldichte (ca. 82 zu 102 ppi). Entweder würden diese Anzeigen zu klein und damit unleserlich dargestellt oder sie müssten vergrößert werden, was durch Interpolation zu Unschärfen und Qualitätseinbußen führen kann.

Erst eine einheitliche Anpassung aller zu integrierenden Anzeigen ermöglicht es, den optimalen Nutzen eines großen Monitors zu erzielen. Hier ist die wesentlichste Informationsquelle des Lotsen hervorzuheben: ATCISS, bzw. der Nachfolger CICIS (Centralised Interoperable Center Information Service). Diese grundsätzlich inhaltlich anzupassen und übersichtlicher darzustellen wurde von den meisten befragten Lotsen vorgeschlagen.

Für eine tatsächliche Verbesserung der Ergonomie, sprich gesteigerte Usability und Effizienz der Informationsdarbietung, ist allerdings ein übergreifendes HMI Konzept erforderlich. Erst mit einem überarbeitetem einheitlichen Darstellungskonzept ist auch eine Optimierung des Platzbedarfs der Anzeigen möglich. Wenn die Anzeigen von Subsystemen so gestaltet werden, dass alle zusätzliche Monitore entfallen können, wird bereits an Hardware-Kosten gespart, auch wenn als großer Monitor kein Consumer Gerät verwendet wird. Neben der Generierung von Einsparungen durch Monitore mit Standardformaten, besteht daher das Potential zur Verbesserung von Darstellungsqualität und Ergonomie.

Für die Gestaltung der iCAS-Arbeitsplätze wird daher empfohlen, auf Basis der vorgestellten Anzeigeconzepte eine iterative Entwicklung mit Lotsenbeteiligung zu durchlaufen. Dazu eignet sich die RAPS Plattform, um Gestaltungsvorschläge schnell und flexibel umsetzen zu können. Abschließend sind Validierungen mit ausgewählten EBGn durchzuführen, um final entscheiden zu können, welches Anzeigeconzept an einem iCAS-Arbeitsplatz mit einem großen Monitor am besten geeignet ist.

Es war zwar nicht Schwerpunkt dieser Untersuchung, dennoch konnte festgestellt werden, dass auch aus ergonomischer Sicht der Nutzung von Consumer-Bildschirmen nichts entgegensteht. Sie erfüllen grundlegende Anforderungen an Leuchtdichte, Kontrast, Reflexionsgrad, Blickwinkelstabilität und Farbdarstellung, s.a. Messberichte 2020.

Allerdings sind die DFS-internen Anforderungen bei der Beschaffung von Hardware zur Nutzung im betrieblichen Umfeld sehr hoch. Es sollte aber kein Tabu sein, diese harten Anforderungen ergebnisoffen zu bewerten, um der aktuellen wirtschaftlichen Situation aufgrund der Corona-Pandemie gerecht zu werden. Das Einsparpotential könnte erheblich sein, muss allerdings noch im Detail analysiert werden, z.B. ob aktuelle Konsolen weiter genutzt werden können oder umgebaut werden müssen; ggf. erforderliche Hardware; Folgeinvestitionen; notwendige Softwareanpassungen, etc. Des Weiteren ist zu erwarten, dass sich der Systemwartungsaufwand reduziert, da anstatt verteilten Displays ein geschlossenes homogenes System und HMI gepflegt werden muss.

Die wesentliche Motivation für den Einsatz von großen Monitoren darf aber in der ergonomischen Gesamtgestaltung des Lotsenarbeitsplatzes mit einem einheitlichen Erscheinungsbild und harmonisierten Bedienconzept gesehen werden, um damit ein modernes HMI Design für einen zukunftsfähigen Lotsenarbeitsplatz mit gesteigerter Usability zu ermöglichen.

## Abkürzungsverzeichnis

|      |                                 |
|------|---------------------------------|
| ACC  | Area Control Centre             |
| ADD  | Additional Data Display         |
| ADM  | Arrival & Departure Manager     |
| AGDL | Air-Ground Data Link            |
| AMAN | Arrival Manager                 |
| ANSP | Air Navigation Service Provider |

|        |                                                      |
|--------|------------------------------------------------------|
| APP    | Approach Control                                     |
| ASW    | Air Situation Window                                 |
| ATCISS | Air Traffic Control Information Support System       |
| ATIS   | Automatic Terminal Information Service               |
| ATS    | Air Traffic Services                                 |
| AUX    | Auxiliary                                            |
| CICIS  | Centralised Interoperable Center Information Service |
| CMAN   | Centermanager                                        |
| CMD    | Control & Monitoring Display                         |
| CO     | Coordinator                                          |
| COTS   | Commercial Of The Shelf                              |
| CPDLC  | Controller Pilot Data Link Communication             |
| CWP    | Controller Working Position                          |
| dpi    | Dots per Inch                                        |
| EBG    | Einsatzberechtigungsgruppe                           |
| EFS    | Electronic Flight Strip                              |
| EX     | Executive                                            |
| FAA    | Federal Aviation Administration                      |
| FDD    | Flight Data Displays                                 |
| FDP    | Flight Data Processing                               |
| HD     | High Density                                         |
| HF     | Human Factors                                        |
| HMI    | Human Machine Interface                              |
| ICAO   | International Civil Aviation Organization            |
| iCAS   | iTEC Centre Automation System                        |
| IPS    | In-Plane-Switching                                   |
| iTEC   | Interoperability Through European Collaboration      |
| KVM    | Keyboard Video Mouse                                 |
| LFV    | Luftfartsverket (schwedische Luftverkehrs-kontrolle) |

|       |                                                                   |
|-------|-------------------------------------------------------------------|
| LVNL  | Luchtverkeersleiding Nederland<br>(niederländische Flugsicherung) |
| MARS  | Multi-platform ATC Re-hosting<br>Solution                         |
| MDW   | Main Data Window                                                  |
| METAR | Meteorological Aviation Routine<br>Report                         |
| MTCD  | Medium Term Conflict Detection                                    |
| NATS  | National Air Traffic Services                                     |
| NOTAM | Notice to Airmen                                                  |
| ppi   | Pixels per Inch                                                   |
| px    | Pixel                                                             |
| QML   | Qt Modeling Language                                              |
| RAPS  | Rapid ATC Prototyping System                                      |
| SDD   | Situation Data Display                                            |
| SDP   | Surveillance Data Processing                                      |
| STARS | Standard Terminal Automation<br>Replacement System (Raytheon)     |
| STCA  | Short Term Conflict Alert                                         |
| TID   | Touch Input Device                                                |
| VA    | Vertical Alignement                                               |

## Referenzen

Andrews, C., Endert, A., Yost, B. & North, C. (2011). Information visualization on large, high-resolution displays: Issues, challenges, and opportunities. *Information Visualization* 10 (4) 341–355.

Breittruck, I. (2014). Potenziale marktüblicher Computermonitore für die Luftlagedarstellung. *Innovation im Fokus* 2/2014.

Buxbaum, J. (2015). Der „conceptdesk“ im DFS-Forschungszentrum – ein Lotsenarbeitsplatz „von übermorgen“ zum Anfassen. *Innovation im Fokus* 2/2015.

Hagemann, K., Uebbing-Rumke, M., Gürlük, H. & Lambrecht, J. (2011). Ergonomische Bewertung eines Quad HD Monitors für den TMA/ACC Lotsenarbeitsplatz. *TE im Fokus*, 1/11.

Honghui Mei, Huihua Guan, Chengye Xin, Xiao Wen, Wei Chen (2020). DataV: Data Visualization on large high-resolution displays. *Visual Informatics* 4, 12–23.

Lischke, L., Mayer, S., Preikschat, A., Schweizer, M., Vu, B. Wozniak, P. & Henze, N. (2018). Understanding Large Display Environments: Contextual Inquiry in a Control Room. *CHI EA '18: Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. April 2018 Paper No.: LBW134 Pages 1–6

McGuffin, M. & Balakrishnan, R. (2005). Fitts' law and expanding targets: Experimental studies and designs for user interfaces. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 12(4):388-422.

Photometrik GmbH (2020). Messbericht 2020-079 EIZO - Raptor-RP4325 durchgeführt im Auftrag der DFS (April 2020).

Photometrik GmbH (2020). Messbericht 2020-0668 LG - 43UD79 durchgeführt im Auftrag der DFS (März 2020).

Robertson, G. Czerwinski, M., Baudisch, P., Meyers, B. Robbins, D. Smith, G. & Tan, D. (2005). The large-display user experience," in *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 25, no. 4, pp. 44-51.

SESAR (2018). SESAR 2020 PJ.16-04-01 TRL2 TVALR – Multi-Touch Inputs (MTI). Deliverable D3.1.020

SESAR (2019a). SESAR 2020 PJ.16.04.02 TRL4 TVALR – Automatic Speech Recognition (ASR). Deliverable D3.2.020.

SESAR (2019b). SESAR 2020 PJ.16-04-01 TRL4 TVALR – Multi-Touch Inputs (MTI). Deliverable D3.2.020.

Tenoort, S. & Hagemann, K. (2017). Styleguide for iCAS TID - SFIT. *Innovation im Fokus*, 02/17, Langen: Deutsche Flugsicherung.



# Integration von Remotely Piloted Aircraft Systems - Entwicklung von Standards bei der ICAO -

Andreas Udovic

## Einleitung

Bereits seit dem Jahr 2003 beschäftigt sich die DFS auf vielfältige Weise mit der möglichen Integration von Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS), die nach Instrumentenflugregeln (IFR) in den verschiedenen Lufträumen operieren. Auslöser für die DFS war die mögliche Anschaffung solcher Systeme durch die Bundeswehr. RPAS sind definiert als Luftfahrzeuge, die durch einen Piloten aus einer Station heraus gesteuert werden. Dazu ist es notwendig, dass eine Funkverbindung zwischen der Bodenstation und dem Flugzeug etabliert wird. Über diesen Steuerlink wird dann auch die Kommunikation zwischen dem Piloten und ATC durchgeführt. Da das ferngeführte Flugzeug meistens außerhalb der Reichweite der Bodenstation betrieben wird, sind Relay-Stationen (Satelliten) notwendig, um die Funkverbindung zu realisieren (siehe Abb. 1).

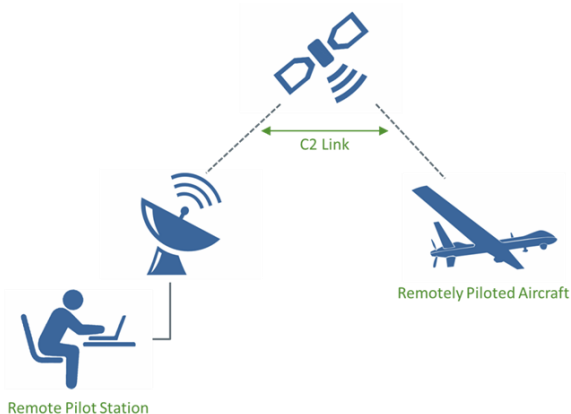


Abb. 1: Systemansicht RPAS (ICAO RPAS Manual, Doc 10019) [1].

Seit 2008 befasst sich auch die International Civil Aviation Organisation (ICAO) mit dem Thema RPAS. Die DFS, durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) beauftragt, vertritt die Bundesrepublik Deutschland zu diesem Thema bei der ICAO. Die Arbeiten dort werden im Folgenden dargestellt.

## RPAS bei der ICAO

Die Arbeiten der ICAO zum Thema RPAS wurden 2005 auch auf Anforderung des BMVI begonnen und führten zu einem ersten informellen Treffen im Mai 2006. Auf dieser Besprechung wurde eine mögliche Rolle der ICAO bei der Erstellung von sog. ICAO Standards and Recommended Practices (SARPs) für unbemannte Luftfahrtsysteme (Unmanned Aircraft System – UAS) diskutiert.

Eine zweite informelle Besprechung zu diesem Thema fand im Januar 2007 statt. Auf dieser Besprechung wurde die Gründung einer Study Group beschlossen, die dieses Thema im Rahmen der ICAO-Arbeiten formal übernehmen sollte. Dies stellt die Grundlage für die weiteren Arbeiten dar. Es wurde festgelegt, dass sich die Study Group mit RPAS befassen soll, welche via IFR international operieren und keine Passagiere an Bord haben.

Die Study Group war dem Air Navigation Bureau des ICAO Secretariat unterstellt, welches die Koordination der Arbeiten übernahm. Diese Unmanned Aircraft System Study Group (UASSG) tagte zum ersten Mal im April 2008 in Montreal. Insgesamt fanden bis 2014 vierzehn Treffen der UASSG statt.

Die UASSG wurde 2014 durch das Remotely Piloted Aircraft System Panel (RPASP) abgelöst. Dieser Übergang bedeutete eine Aufwertung der Arbeiten zum Thema RPAS bei der ICAO und unterstrich die Bedeutung, welche das Thema bei der ICAO durch die Mitgliederstaaten bekommen hatte. Das RPASP ist direkt der Air Navigation Commission (ANC) unterstellt, welche die Arbeiten aller Panels steuert. Dies bedeutet auch, dass das RPASP direkt an das ANC berichtet. Änderungsvorschläge des RPASP an den ICAO Standards (Annex und Document) werden durch die ANC geprüft und genehmigt.

In den folgenden beiden Kapiteln sollen die Arbeiten und Ergebnisse dieser beiden Gremien vorgestellt werden. Den Abschluss bildet ein Ausblick auf die geplanten weiteren Arbeiten der ICAO zum Thema RPAS.

Weitere Arbeiten der ICAO, die in diesem Rahmen nicht besprochen werden, sind die durch die ICAO organisierten „Drone Enabler Conference“, die in den

Jahren 2017, 2018, 2019 und 2021 durchgeführt worden sind. Ebenso werden die Arbeiten der „small UAS Advisory Group“ der ICAO nicht dargestellt.

### Arbeiten und Ergebnisse der UASSG

Wie bereits ausgeführt startete die UASSG mit der ersten Sitzung im April 2008. An dieser nahmen insgesamt 32 Vertreter aus 14 Ländern sowie von sieben Organisationen (z.B. CANSO, IFALPA, IFATCA) und zwei ICAO-Vertreter teil. An der 15. und letzten Sitzung im Juli 2014 nahmen bereits 64 Kolleginnen und Kollegen teil sowie sieben Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der ICAO. Die Zahl der teilnehmenden Staaten stieg auf 17, die der Organisationen auf 11. Sowohl die steigende Anzahl der Teilnehmer als auch der Länder und Organisationen reflektierte die auch heute noch andauernde, steigende Bedeutung des Themas weltweit. Abb. 2 zeigt die Teilnehmer an der 1. Sitzung der UASSG im April 2008.



Abb. 2: Teilnehmer der 1. Sitzung der UASSG (Foto ICAO).

Als Aufgaben der UASSG wurden folgende Punkte festgelegt:

1. Die UASSG dient als Focal Point für alle Arbeiten bezüglich UAS. Ziel ist die weltweite Harmonisierung und Interoperabilität.
2. Die Entwicklung eines regulativen Konzepts mit den dazugehörigen Guidance Material.
3. Review der ICAO SARPs und Erarbeitung und Koordinierung von Vorschlägen zur Integration von RPAS.
4. Zuarbeit zu der technischen Spezifikation durch andere Organisationen
5. Identifikation der Anforderungen an die Bandbreite und Frequenzen für den RPAS Command and

Control Link, um dem ICAO Aeronautical Communications Panel (ACP) und der International Telecommunications Union (ITU) World Radio Conference (WRC) passende Vorschläge zu unterbreiten.

Dazu wurden die anstehenden Arbeiten der UASSG in sechs Arbeitsgruppen (Working Groups - WG) aufgeteilt:

- WG 1: Airworthiness
- WG 2: Command and Control (C2) Link
- WG 3: Detect and Avoid (DAA)
- WG 4: Pilot Licencing
- WG 5: Operation
- WG 6: ATM

Dabei wurden den verschiedenen Arbeitsgruppen die thematisch relevanten Annexe, die die grundlegenden ICAO Standards enthalten, zur Bearbeitung zugeordnet. So bearbeitete die WG 1 den Annex 8 „Airworthiness of Aircraft“ oder die WG 6 den Annex 2 „Rules of the Air“.

Die Aufgabe der Arbeitsgruppen war es, eine erste „Gap Analyse“ der Annexe durchzuführen und zu identifizieren, wo Änderungsbedarf in den Annexen bestehen, um RPAS in die Standards zu integrieren. In einem zweiten Schritt wurden erste Vorschläge erarbeitet, wie die Annexe geändert werden müssen, damit RPAS in den SARPs abgebildet werden. Folgenden Hauptergebnisse wurden durch die UASSG erarbeitet:

- Entscheidung, dass die RPAS in die bestehenden Annexe integriert werden und nicht ein eigener RPAS Annex erstellt wird.
- Definition und Abgrenzungen wurden festgelegt, z.B. RPAS, Remote Pilot, Remote Pilot Station (RPS), Remote Observer, und Command and Control (C2) Link, so dass diese in den Definitionen der Annexe verwendet werden können.
- Änderung des Annex 1 „Personnel Licensing“ wurde komplett abgeschlossen und die Änderungen durch die ANC angenommen und verabschiedet. [5]
- Erstellung des Annex 2 „Rules of the Air“: Dessen Integration in das Kapitel 3 (3.1.9 „Remotely piloted aircraft“) sowie das Einfügen des Appendix 4 „Remotely Piloted Aircraft Systems“, welcher die Genehmigung von international RPAS Flügen regelt. [4]
- Erstellung und Veröffentlichung des Circular 328, Unmanned Aircraft Systems (UAS), im Jahr 2011. [6]
- Erstellung und Veröffentlichung des Doc 10019, Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) im Jahr 2015 [1].

Des Weiteren wurde die Diskussion mit anderen Panels zum Thema RPAS angestoßen und somit in der ICAO weiter verankert.

## Arbeiten und Ergebnisse des RPAS Panel

Im November 2014 nahm das RPAS Panel mit der ersten Sitzung die Arbeit auf. Die Einsetzung eines Panels anstelle einer Study Group spiegelt die gestiegene Bedeutung des Themas weltweit wider. Die Einsetzung eines Panels wurde durch die ANC beschlossen. Dazu wurden Experten eingeladen, an diesem Thema zu arbeiten und Lösungen zu finden. Die Aufgabe des Panels ist es, SARPs zu entwickeln und mit anderen Panels zu koordinieren, um RPAS sicher und effizient zu integrieren. Ebenso soll Guidance Material entwickelt werden, um die Integration zu unterstützen. An der ersten Sitzung des Panels nahmen Vertreter aus 20 Staaten und 13 Organisationen teil. Insgesamt nahmen 88 Kolleginnen und Kollegen an der Sitzung teil. Pro Jahr wurden drei Sitzungswochen vereinbart. Auf Grund von Ressourcenproblemen bei der ICAO wurde die Sitzungshäufigkeit ab dem Jahr 2020 auf eine reguläre Sitzungswoche im März plus eine weitere Sitzungswoche im Oktober als sog. „Working Group of the Whole“, d.h. das Panel trifft sich, um zu arbeiten, wird aber keine formellen Entscheidungen treffen, reduziert. Bedingt durch die SARS-CoV-2 Pandemie wurden die letzten beiden Sitzungen im März 2020 und 2021 als virtuelle Besprechungen durchgeführt. Insgesamt konnte man dabei feststellen, dass insbesondere in der fachlichen Arbeit in den Arbeitsgruppen, die Intensität geringer war als bei den Präsenzveranstaltungen. Abb. 3 zeigt die Teilnehmer der letzten Präsenzveranstaltung im Oktober 2019.



Abb. 3: Teilnehmer der 15. Sitzung des RPASP (Foto ICAO).

Im Gegensatz zu der lockeren Organisationsstruktur der UASSG werden die Arbeiten der RPAS Panels anhand von Arbeitsaufträgen (sog. Job Cards) definiert, die durch die ANC vorgegeben werden. Anpassungen der Job Cards

werden durch die ANC geprüft und genehmigt. Auch wird jede Sitzung protokolliert, und Entscheidungen werden formal durch die benannten Vertreter der Mitgliedstaaten oder Organisationen (Member) getroffen.

Wie bereits die UASSG startete das RPAS Panel mit der gleichen Arbeitsgruppenstruktur, d.h. mit den 6 bereits etablierten Gruppen. Im Verlaufe der Jahre wurden zwei weitere Arbeitsgruppen etabliert:

- WG 7: Human in the System (HITS)
- WG 8: RPAS Manual

Die WG 7 befasst sich mit den Human Factors bei der Integration von RPAS, und die Aufgabe der WG 8 ist eine Neufassung des Doc10019, RPAS Manual [1]. Da die Änderung des Annex 1 bereits durch die UASSG erarbeitet wurden, wurde die WG 4 „Remote Pilot Licence“ bald eingestellt.

Durch die Vernetzung und Abstimmung der erarbeiteten Änderungen an den Annexen wurde der Austausch mit anderen Panels im Verlaufe der Zeit stark intensiviert. Dies führte dazu, dass das RPAS Panel zusammen mit den anderen Panels Task Forces etablierte, die bestimmte Themen bearbeiteten. So wurde von der WG 6 „ATM Integration“ eine Task Force mit dem ATM Operation Panel etabliert, um z.B. Themen wie Ausfallverfahren für den C2 Link zu diskutieren und zu definieren. Weitere Task Forces mit anderen Panels sind:

- TF RPASP – Safety Panel
- TF RPASP – Aerodrome Panel
- TF RPASP – Metrological Panel

Ebenfalls werden zu bestimmten Themen Task Forces aufgesetzt, wenn gruppenübergreifend Arbeiten koordiniert werden müssen. So gibt es z.B. eine Task Force, die Lösungen zum Thema Interception, also dem Abfangen von RPAS finden soll.

Seit Bestehen des RPASP wurden folgende Hauptergebnisse erzielt:

- Verabschiedung des neuen Annex 6 Part IV, welches die Standards für die Operation von RPAS und den C2 Link enthält.
- Verabschiedung der Änderungen Annex 8 „Airworthiness“ mit den Anforderungen an RPAS.
- Verabschiedung des Annex 10 mit der Integration der Anforderungen an ein Detect and Avoid System.
- Verabschiedung der Änderungen des Annex 12 „Search and Rescue“ mit der Integration von RPAS.
- Abstimmung mit der ITU bezüglich der Nutzung von Frequenzen für die RPAS C2 Link.

- Konsens und Verabschiedung der Verfahren für RPA beim Ausfall des C2 Link und des Vorschlages für die Änderung des Annex 2. Festlegung des „special Code 7400“ als Kennung für den Ausfall des C2 Link. Festlegung des Verfahrens für das DAA-Manöver.
- Erstellung eines neuen Part I für das RPAS Manual, Doc 10019, mit dem generellen Guidance Material für RPAS und Einigung über die Struktur und Inhalt des Part II mit konkretem Guidance Material z.B. bezüglich des C2 Links, der ATM-Verfahren, des Detect and Avoid-Systems oder der Human Factors.

## Arbeiten außerhalb der ICAO

Auch außerhalb der ICAO wurden regulatorische Arbeiten zur Integration von UAS vorgenommen. Da die ICAO sich auf die Integration von IFR international betriebener RPAS konzentrierte, haben eine Reihe nationaler Verkehrsministerien und Luftfahrtbehörden eine Arbeitsgruppe gegründet. Diese befasst sich mit der Integration von UAS welche national unter VFR betrieben werden können. Die Arbeitsgruppe wurde als „Joint Authorities for Rulemaking on unmanned Systems (JARUS)“ formalisiert und umfasst Behörden weltweit. In den letzten Jahren erarbeitet diese Arbeitsgruppe die Grundlagen für einen risikobasierten Ansatz für die Integration von UAS. Dieser risikobasierte Ansatz wurde mittlerweile durch die European Aviation Safety Agency (EASA) für Europa adaptiert und eingeführt. Er umfasst die drei Risikoklassen „offen“, „speziell“ und „zertifiziert“. UAS bis 25kg, die in Sichtweite des Steuerers und nicht über Personen betrieben werden, fallen in die offene Klasse. Insbesondere UAS, die Beyond Visual Line of Sight (BVLOS) betrieben werden und damit ein höheres Risiko haben, fallen in die spezielle Klasse. Für den Betrieb ist eine Genehmigung notwendig, in der das Luft- und Bodenrisiko beim Betrieb bewertet wird. Ist das Risiko zu hoch, sind z.B. Passagiere an Bord oder werden gefährliche Güter transportiert, fällt das UAS in die höchste Risikoklasse und bedarf einer Zertifizierung. Auch diese Arbeitsgruppe arbeitet weiter an zusätzlichen Regelungen.

## Ausblick

Das RPAS Panel soll den ersten vollständigen Satz an SARPs, die die Integration von RPAS ermöglichen, so erstellen, dass sie 2026 anwendbar sind. Dazu müssen die Änderungen an den Annexen bis zum 4. Quartal 2022 vorliegen, mit den anderen Panels abgestimmt und durch das RPAS Panel verabschiedet sein. Für die Arbeiten bedeutet dies, dass für das nächste Meeting im März 2022 eine Reihe von Vorschlägen für SARPs

vorliegen müssen, damit der Zeitrahmen eingehalten werden kann. Abb. 4 zeigt den Zeitplan für die Arbeiten des RPASP.

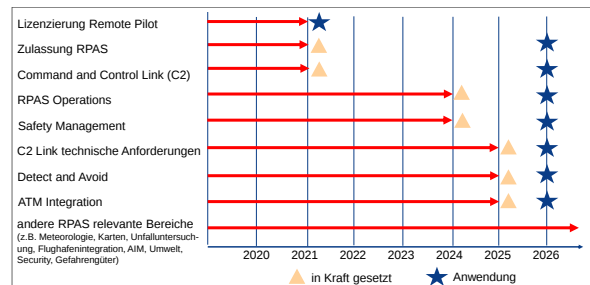


Abb. 4: Zeitplan des RPAS Panel (ICAO, RPASP#17 Report) [3].

Nachdem das RPASP die Änderungsvorschläge bei der ANC abgeliefert hat, müssen die Änderungen durch die ANC angenommen werden. Danach werden die Annexen zur Kommentierung an die Staaten versandt und die Staaten um Zustimmung gebeten. Wenn diese durch eine Mehrheit der Staaten erfolgt, können die Änderungen in Kraft treten.

Die Arbeiten des RPASP werden nach 2022 weitergeführt. Zum einen müssen die den Annexen zugeordneten Guidance Material (Docs) erstellt werden, soweit dies nicht bereits parallel zu den Änderungen der Annexen erfolgt ist. Zum anderen sind neue Felder durch das RPASP zu bearbeiten. So sollen der Passagiertransport, der internationale Flug von Air Taxis oder die Integration von neuen Landeplätzen für autonom betriebene, vertikal startende und landende Flugzeuge (Vertical Take-off and Landing – VTOL) ermöglicht werden. Diese Landeplätze (Vertiports) müssen z.B. in den Annex 14 „Aerodrome“ integriert werden.

## Abkürzungsverzeichnis

|       |                                           |
|-------|-------------------------------------------|
| ACP   | Aeronautical Communications Panel         |
| ANC   | Air Navigation Commission                 |
| BVLOS | Beyond Visual Line of Sight               |
| C2    | Command and Control                       |
| DAA   | Detect and Avoid                          |
| EASA  | European Aviation Safety Agency           |
| ICAO  | International Civil Aviation Organisation |
| ITU   | International Telecommunications Union    |

|       |                                                      |
|-------|------------------------------------------------------|
| JARUS | Joint Authorities for Rulemaking on unmanned Systems |
| RPA   | Remotely Piloted Aircraft                            |
| RPAS  | Remotely Piloted Aircraft System                     |
| RPASP | Remotely Piloted Aircraft System Panel               |
| RPS   | Remote Pilot Station                                 |
| SARPs | Standards and Recommended Practices                  |
| UAS   | Unmanned Aircraft System                             |
| UASSG | Unmanned Aircraft System Study Group                 |
| VTOL  | Vertical Take-off and Landing                        |
| WG    | Working Group                                        |
| WRC   | World Radio Conference                               |

## Referenzen

- [1] Doc 10019, Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS), Order Number: 10019, ISBN 978-92-9249-718-7, ICAO Montreal 2015.
- [2] ICAO Cir 328, Unmanned Aircraft Systems (UAS), Order Number: CIR328, ISBN 978-92-9231-751-5, ICAO Montreal 2011.
- [3] RPAS Panel#17 Report, internal RPASP Document, ICAO, Montreal 2021.
- [4] ICAO Annex 2, Rules of the Air, Amendment 42, Montreal 2009.
- [5] ICAO Annex 1, Personal Licencing, Amendment 175, Montreal 2018.
- [6] Unmanned Aircraft Systems (UAS), ICAO DOC 328, Montreal 2011.



## Innovation im Fokus Informationen zu Forschung, Entwicklung und Validierung

*Innovation im Fokus* erscheint halbjährlich und beschäftigt sich bevorzugt mit Informationen zu Forschung, Entwicklung und Validierung mit Beteiligung der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH. Diese Ausgabe ist elektronisch im Internet ([www.dfs.de](http://www.dfs.de) > [Flugsicherung](#) > [F&E](#) > [Service](#)) sowie über das DFS Intranet verfügbar. 90 Exemplare werden in gedruckter Form aufgelegt.

Wie auch der Vorgänger-Zeitschrift „TE im Fokus“ wurde dieser Zeitschrift von der Deutschen Bibliothek eine ISSN (International Standard Serial Number) zugeteilt:

**Printversion: ISSN 2198-8951** (vormals: 1861-6364)

**Internet-Version: ISSN 2198-896X** (vormals: 1861-6372)

**Datum dieser Ausgabe:** 12.07.2021

### DISCLAIMER

Alle hier erwähnten Warenzeichen sind Eigentum ihrer jeweiligen Besitzer. Warenzeichen werden nicht ausdrücklich als solche gekennzeichnet. Aus dem Fehlen von Urheber- oder Markenrechtskennzeichen darf jedoch nicht geschlossen werden, dass es sich um einen nicht geschützten Namen oder um eine nicht geschützte Marke handelt.

### COPYRIGHT

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH unzulässig und wird zivil- und strafrechtlich verfolgt. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Copyright © 2021 by DFS Deutsche Flugsicherung GmbH - Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlage, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Alle Rechte vorbehalten, insbesondere für den Fall der Patenterteilung oder eines GM-Eintrages.



## Impressum

Innovation im Fokus

Informationen zu Forschung,  
Entwicklung und Validierung

### Herausgeber:

DFS Deutsche Flugsicherung GmbH

Günter Achatz, Bereichsleitung  
Planung & Innovation

### Redaktion:

Dr. Konrad Hagemann  
Tel. +49 (0)6103 707 5745  
E-Mail: [konrad.hagemann@dfs.de](mailto:konrad.hagemann@dfs.de)

Stefan Tenoort  
Tel. +49 (0)6103 707 5769  
E-Mail: [stefan.tenoort@dfs.de](mailto:stefan.tenoort@dfs.de)

Dr. Morten Grandt  
Tel. +49 (0)6103 707 1139  
E-Mail: [morten.grandt@dfs.de](mailto:morten.grandt@dfs.de)

Oliver Haßa  
Tel. +49 (0)6103 707 5762  
E-Mail: [oliver.hassa@dfs.de](mailto:oliver.hassa@dfs.de)

Iris Filbrich  
Tel. +49 (0)6103 707 1131  
E-Mail: [iris.filbrich@dfs.de](mailto:iris.filbrich@dfs.de)

### Anschrift der Redaktion:

DFS Deutsche Flugsicherung GmbH  
Redaktion Innovation im Fokus  
Am DFS-Campus 5  
63225 Langen  
E-Mail: [forschung@dfs.de](mailto:forschung@dfs.de)

**Nachdruck nur mit Genehmigung.**

