Ausgabe 1 – 2026

Innovation im Fokus

Informationen zu Forschung, Entwicklung und Validierung



Themenübersicht

- Flowman
- Obelisk
- Blueprint Trajectory Prediction
- Drohnenbasiertes Messsystem
- Studentische Abschlussarbeiten

DFS Deutsche Flugsicherung

Liebe Leserinnen und Leser,

Innovation in der Flugsicherung landet selten sofort. Sie geht erst einmal ins Holding: fertig gedacht, freigegeben — und dann Warteschleife. Aus gutem Grund: Ein hochvernetztes System, das in jeder Lage zu hundert Prozent funktionieren muss, verlangt Abstimmung. Viel Abstimmung. Aber kein Flugzeug kreist ewig — irgendwann wird der Sprit knapp. An Ideen fehlt es nicht, sondern am Anflugverfahren, das sie sicher herunterbringt. Der Engpass ist der Transfer.
Und doch macht mir gerade die ATM Transformation Conference in Brüssel im vergangenen Jahr Mut. *„There is no speed"* — so nüchtern klang der Befund, aber nicht resigniert. Der Wille, schneller zu werden, war mit Händen zu greifen. Diese Chance haben wir gemeinsam in der ganzen Community.
Unsere Antwort heißt Fokus. Weniger Themen, klareres Bekenntnis — und die ehrliche Frage, welches Thema wir mit welchem Einsatz verfolgen. Höhere Reifegrade, und die Disziplin, sie bis zum Aufsetzen zu begleiten. Denn technische Reife ist nur die halbe Miete. Die andere ist organisatorisch: Verfahren, Ausbildung, die Menschen an den Arbeitsplätzen. Technology Readiness Level 9 nützt nichts, wenn die Organisation nicht mitkommt.
Die vier Beiträge dieser Ausgabe zeigen dieses Spektrum — bewusst unterschiedlich in Reife und Zeithorizont.
„A Blueprint for a Trajectory Prediction Evaluation" (Andrea Bach & Thomas Pütz) klingt technisch, ist aber Fundament. Eine Trajektorienvorhersage sagt, wo ein Flugzeug in den nächsten Minuten sein wird — Grundlage der Konflikterkennung im Flugdatenverarbeitungssystem und Voraussetzung für Trajectory Based Operations. Wie gut sie wirklich ist, muss man messen können; dafür liefert der Beitrag den Bauplan. Unspektakulär, hochreif, einsatznah.
FlowMan (Daniel Seidel & Thomas Pütz) steuert den Verkehrsfluss von An- und Abflügen — greifbar, kurzfristig, schnell wirksam.
Die ILS-„Mini-Approaches" mit der Messdrohne in Frankfurt (Uwe Buchheim & Tobias Hebgen) zeigen: Gute Innovation muss nicht groß sein — kompakt, elegant, mit unmittelbarem operativem Ertrag.
Obelisk (Andreas Udovic) steht für die frühe Frage: die Integration von Stratosphärenplattformen — vereinfacht: Ballons — in unseren Luftraum, gefördert im Luftfahrtforschungsprogramm (LuFo) mit externen Partnern. Nicht der ferne Horizont ist der Punkt, sondern das rechtzeitige Einordnen. Solche Themen rücken näher, als viele denken; wer sie zu spät sortiert, entscheidet zu spät. Also fragen wir früh — wie viel Zeit und Commitment ist uns was wert?
Diese Ausgabe ist ein Abschluss: „Innovation im Fokus" erscheint zum letzten Mal in dieser Form. Was folgt, ist kein Ende, sondern eine Schärfung — neuer Name, englisch, jährlich, mit größerer digitaler Reichweite. Fokus, auch hier.
Dank an die Autorinnen, Autoren und die Redaktion. Viel Freude bei der Lektüre.



Dr. Gerolf Ziegenhain
Director Innovation and Planning · TI

Inhaltsverzeichnis

FlowMan - Ein Tool zur Verkehrsflusssteuerung von An- und Abflügen 8
Daniel Seidel & Thomas Pütz

Obelisk – Operationelles Betriebskonzept zur sicheren und effizienten Luftraumintegration von Stratosphärenplattformen....18
Andreas Udovic, Katharina Leikard & Jürgen Vielhauer

A Blueprint for a Trajectory Prediction Validation 24
Andrea Bach & Thomas Pütz

Drohnenbasiertes Messsystem zur Analyse von HF-Signalen an Instrumentenlandesystemen (ILS)....34
Uwe Buchheim

Studentische Abschlussarbeiten....42
DFS Dual Studierende & in DFS Fachbereichen betreute Studierende

Impressum....55

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

Daniel Seidel & Thomas Pütz: FlowMan – Ein Tool zur Verkehrsflusssteuerung von An- und Abflügen – Mit dem Tool FlowMan wurde ein innovativer Ansatz zur kooperativen Planung von Flugbewegungen an großen Flughäfen entwickelt. Ziel ist es, den stetig wachsenden Luftverkehr effizienter zu steuern, Verspätungen zu reduzieren und vorhandene Kapazitäten besser auszunutzen. FlowMan verknüpft bestehende Systeme für An- und Abflugmanagement und ermöglicht eine gemeinsame, vorausschauende Planung aller Beteiligten (z.B. Tower, Center, Flughafenbetreiber). Dadurch entsteht ein einheitliches Lagebild der Verkehrssituation in Luft und am Boden. Das Tool analysiert unterschiedliche Szenarien der Bahnnutzung und zeigt deren Auswirkungen auf Verkehrsfluss und Verzögerungen. So können frühzeitig Engpässe erkannt und passende Strategien zur optimalen Nutzung der Start- und Landebahnen entwickelt werden. Insgesamt trägt FlowMan dazu bei, die Effizienz, Planbarkeit und Zusammenarbeit im Flughafenbetrieb nachhaltig zu verbessern.

Andreas Udovic, Katharina Leikard & Jürgen Vielhauer: Obelisk – Operationelles Betriebskonzept zur sicheren und effizienten Luftraumintegration von Stratosphärenplattformen – Das Projekt Obelisk wurde durch das Luftfahrtforschungsprogramm gefördert und von 2020 bis Ende 2024 durchgeführt. Es wurde eine mögliche Integration von High Altitude Platform Systems (HPAS) in den kontrollierten Luftraum untersucht. Diese HAPS zeichnen sich durch eine sehr geringe Flugleistung aus, mit einer Geschwindigkeit bis zu 25kn und einer Steig- und Sinkleistung von ca. 100ft pro Minute. Für den Aufstieg in Missionshöhen zwischen FL 600 und FL 750 benötigen sie ca. 6 bis 8 Stunden. Ziel des Projekts war es ein operationelles Konzept zu entwickeln und dieses mittels einer Realzeitsimulation zu überprüfen. In diesem Artikel werden die Herausforderungen bei der Integration von HAPS für die Flugsicherung aufgezeigt, das Konzept vorgestellt und die Ergebnisse der Realzeitsimulation berichtet. Neben der DFS waren an diesem Projekt die Firmen Leichtwerk AG und Unisphäre, der Deutsche Wetterdienst mit Meteo Solutions als Unterauftragnehmer, sowie die TU Braunschweig beteiligt.

Andrea Bach & Thomas Pütz: A Blueprint for a Trajectory Prediction Evaluation – Eine validierte Trajektorienvorhersage (TP) ist entscheidend für das Luftverkehrsmanagement und dessen Kernkomponente, das Flugdatenverarbeitungssystem (FDPS), insbesondere für die Konflikterkennung und -lösung. Dieser Artikel bietet einen Bauplan für eine detaillierte Validierung im Rahmen von detaillierten operationellen Anforderungen und technischen Spezifikationen. Da reale Flüge von zahlreichen Faktoren wie Wind, Wetter, ATC-Beschränkungen und Pilotenverhalten beeinflusst werden, stellt sich die Frage: Wie lässt sich die Genauigkeit einer Trajektorienvorhersage am besten bewerten? Beobachtete Flugspuren im realen Betrieb können unbekannte Wetterbedingungen oder unterschiedliche operationelle Verfahren aufweisen. Um die Testszenarien zur Validierung der Trajektorienvorhersage an ein spezifisches Anforderungsprofil anzupassen, eignen sich deshalb Full-Flight-Simulationen (FFS) besonders gut. Spezielle Full-Flight-Simulatoren, die für die Pilotenausbildung zugelassen sind, bieten ein hohes Maß an Realismus und ermöglichen eine vollständige Kontrolle über die äußeren Flugbedingungen.

Uwe Buchheim: Drohnenbasiertes Messsystem zur Analyse von HF-Signalen an Instrumentenlandesystemen (ILS) – Der Beitrag der „Innovation im Fokus“ von Uwe Buchheim (TO/NT), beschreibt die Nutzung eines drohnenbasiertes Messsystem der DFS zur Analyse von HF-Signalen an Instrumentenlandesystemen (ILS). Damit können Messungen durchgeführt werden, die bisher nur mit spezialisierten Messflugzeugen oder aufwendigen bodengestützten Verfahren möglich waren. Ziel ist es, bestehende Messverfahren bei Bodenkontrollen, Inbetriebnahmen und bei Teilen der Flugvermessung effizient zu ergänzen. Für die DFS eröffnet dies die Perspektive, die Qualität von Messungen weiter zu steigern, Inbetriebnahmen neuer ILS Anlagen zu beschleunigen und

den Aufwand bei ausgewählten Vermessungsaufgaben deutlich zu reduzieren. Erste Validierungen wurden erfolgreich durchgeführt und das Potenzial drohnengestützter Messungen für mehr Effizienz und Qualität belegt. In dem Artikel werden die technischen und betrieblichen Hintergründe beschrieben sowie Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes beleuchtet und die Herausforderung vor einem Routineeinsatz dargelegt.

Studentische Abschlussarbeiten – In dieser Rubrik listen wir die Titel und Autoren von studentischen Abschlussarbeiten. Diese sind in der Zusammenarbeit der DFS mit Hochschulen und Universitäten entstanden und wurden in der Zeit seit der letzten Ausgabe abgeschlossen. Da einige Arbeiten einen Sperrvermerk enthalten wurden die akademischen Ansprechpartner ergänzt. Zu jeder Arbeit finden sich weitere Angaben, u.a. auch ein kurzes Abstract in deutscher Sprache.

FlowMan - Ein Tool zur Verkehrsflusssteuerung von An- und Abflügen

Daniel Seidel & Thomas Pütz

Einleitung

Vor dem Hintergrund einer ständig wachsenden Zahl von Flugbewegungen stehen Flughafenbetreiber und Flugsicherung vor der schwierigen Aufgabe, die zunehmende Verkehrsdichte zu bewältigen und den Flugverkehr weiterhin sicher und wirtschaftlich abzuwickeln. Viele stark frequentierte Flughäfen stoßen bereits an ihre Grenzen. Warteschleifen und Verspätungen bei der Landung und beim Start gehören längst zum Flugalltag und verursachen Kosten in Millionenhöhe. Nur deutliche Kapazitätssteigerungen durch eine optimierte Nutzung des Bahnsystems werden hier auf Dauer Abhilfe schaffen können.

Um die an einem Großflughafen verfügbaren Kapazitäten optimal auszunutzen, wurden in der Vergangenheit bereits An- und Abflugplanungssysteme entwickelt, die die Lotsen bei der Zuflusssteuerung des Verkehrs auf die Start- und Landebahnen unterstützen sollen [1]. So sind in der Strecken- und Anflugkontrolle verschiedener europäischer Großflughäfen seit einigen Jahren Arrival Manager (AMAN) in Betrieb, die Anflugsequenzen und Zielzeiten für die Übergabepunkte in den Terminalbereich (Metering-Fixe) und die Landebahnschwelle vorgeben. Handelt es sich um ein adaptives Anflugplanungssystem wie den 4D-Planer [2], wird eine nicht planmäßige Führung des Anflugverkehrs gegenüber der AMAN-Sequenz automatisch erkannt und die Reihenfolge und die Zielzeiten werden an die neue Verkehrssituation angepasst. Auf der Abflugseite wird an vielen Flughäfen Airport Collaborative Decision Making (A-CDM) verwendet, dass die Zusammenarbeit und den Informationsaustausch zwischen allen wichtigen Partnern eines Flughafens verbessern soll. Ziel ist es, die Effizienz und Pünktlichkeit des Flughafenbetriebs zu steigern.

Der FlowMan (Flow Manager) ist ein Tool zur kooperativen An- und Abflugplanung, durch das mit Hilfe bestehender AMAN und A-CDM Systeme eine kooperative Planung für den gesamten startenden und landenden Verkehr an einem Großflughafen realisiert werden kann. Das Tool bietet die Möglichkeit, dass alle Beteiligten in Center und Tower ein Bild von der zu erwartenden Verkehrssituation auf dem Boden und in der Luft erhalten und eine geeignete Bahnnutzungsstrategie koordinieren können. Sie erhalten durch den FlowMan Informationen mit welchen Bahnkonfigurationsparametern der Verkehr gemäß einer kooperativen Planung abgewickelt werden kann und diese können dann in den AMAN und den A-CDM Pre-Departure Sequencer (PDS) eingegeben werden. Der A-CDM PDS berechnet eine optimale Abflugreihenfolge, um Rollzeiten zu verkürzen, Staus vor der Startbahn zu vermeiden und die Vorhersagbarkeit der Abflugzeiten zu erhöhen.

Hintergrund und Validierung

Als Vorläufer des FlowMan-Systems dienten die Arbeiten im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms zum Projekt K-ATM [3] sowie zum CMAN (Center Manager[1]) [4] im Kontext des europäischen Forschungsprogramms SESAR (Single European Sky ATM Research). Aufbauend darauf wurden im Projekt „Advanced CMAN“ [5] erste Funktionalitäten – wie etwa das Sektorlastdisplay (Sector/Traffic Load Display, siehe Abbildung 1) – im Rahmen von SESAR 2020 Wave 1 entwickelt. Neben dem CMAN waren auch die Lösungen E-AMAN/XMAN aus SESAR1 [6] und FABEC von Bedeutung. Das A-CMAN-Konzept wurde erfolgreich im Rahmen einer zehntägigen Validierungskampagne mit Real-Time-Simulationen (RTS) unter Beteiligung von Fluglotsen getestet und validiert (Reifegrad V2). Die neuen Funktionen ermöglichten es den Lotsen, die Sektorlast in der E-TMA (Extended Terminal Manoeuvring Area) unter

[1] Der Center Manager untersuchte die Steuerung des Verkehrs im Bereich der TMA/E-TMA unter Nutzung prognostizierter Nachfragedaten, die von lokalen An- und Abflugmanagementsystemen bereitgestellt werden, um Überlastungen in Sektoren oder auf Routen zu erkennen, zusätzliche Kapazitäten zu identifizieren und die Sektor-/Flusslast auszugleichen.

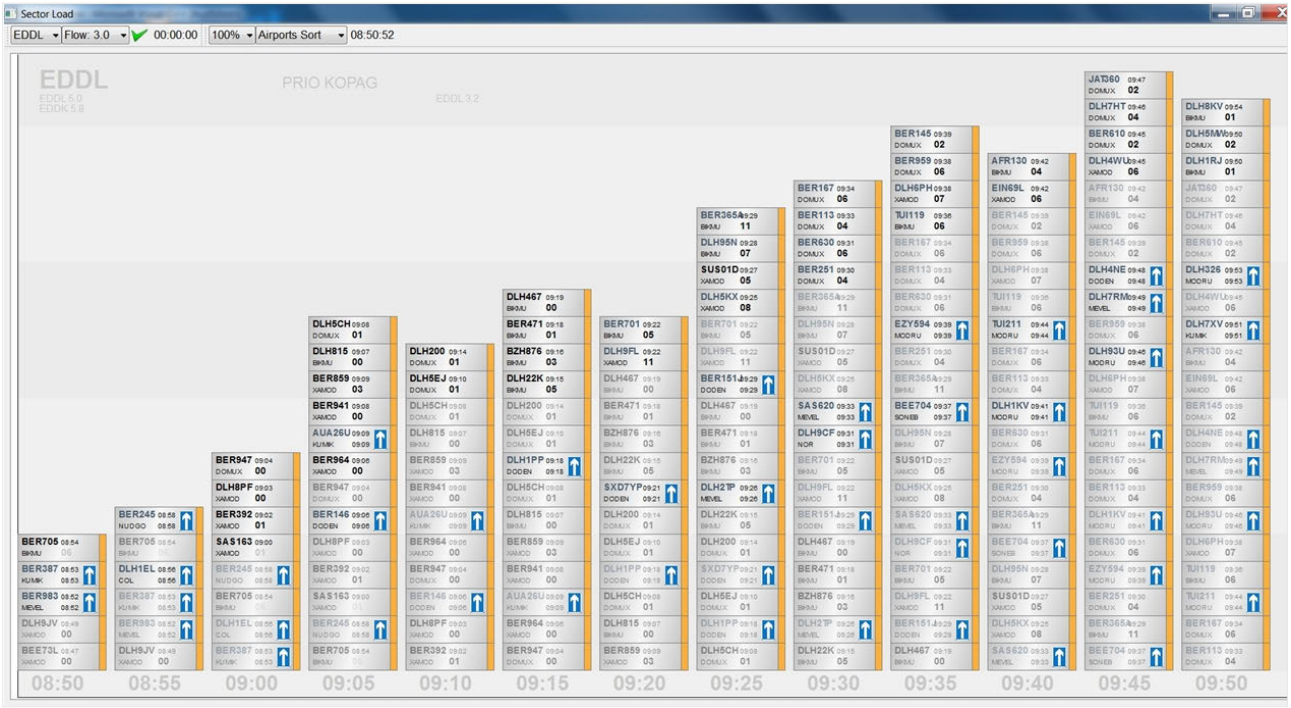

Abbildung 1: CMAN Sektorlast Display für Düsseldorf Approach (EDDL APP). Es zeigt die erwarteten Starts- und Landungen je 10 Minuten Intervall für die nächsten 60 Minuten. Dabei werden Abflüge durch einen weißen Pfeil im blauen Rechteck dargestellt. Luftfahrzeuge für die noch keine Radardaten vorliegen werden ausgegraut dargestellt.

Berücksichtigung verschiedener Eingabedaten effektiv auszugleichen.

In Wave 2 des SESAR 2020 Programms wurde das Konzept weiterentwickelt und auf die Nutzung der Start- und Landebahnen ausgeweitet [7]. Der Validierungsprozess wurde bis zum Reifegrad V3[2] [8] fortgeführt. Die weiterentwickelte Version des Werkzeugs führte zum neuen FlowMan-Tool, das in der Lage ist, ein Gleichgewicht zwischen Bahn- und Luftraumnutzung (Ankünfte und Abflüge) herzustellen und die Entscheidungsfindung von Tower (TWR) und Anflugkontrolle (APP) zu unterstützen – ein bislang nicht werkzeuggestützter Prozess. Die Betrachtung der Sektorlast trat dabei in den Hintergrund und wurde im neuen Tool nicht weiterverfolgt.

Parallel zu den SESAR-Aktivitäten wurde DFS-intern die An- und Abflugsteuerung an Flughäfen thematisiert. Dabei wurden unter Einbeziehung der operativen Bereiche Vorschläge für einen optimierten Betriebsablauf erarbeitet. Im Rahmen des Projekts „Epic iRUN“ wurde dieses Konzept weiterentwickelt und in konkrete Umsetzungsschritte überführt [9]. iRUN unterscheidet zwischen einer kurzfristigen AMAN/DMAN-Integration (Kurzfrist-Tool) und einer mengenbasierten mittelfristigen Betrachtung der An- und Abflüge. Für den mittelfristigen Bereich wurden auf Basis der DFS-Anforderungen Prototypen aus dem SESAR-Projekt weiterentwickelt und in Feldtests im operativen Umfeld erprobt. Ein Teil dieser Tests wurde als V3-Validierungsübung im Rahmen eines Shadow Mode Trials (SMT) im Jahr 2023 durchgeführt – an den DFS-Standorten Düsseldorf Tower und Langen ACC.

Die klassische AMAN-DMAN-Kopplung erfordert präzise Daten für eine integrierte Sequenz. Der Planungshorizont ist dabei auf den AMAN-Horizont beschränkt. „What-if“- oder Analysefunktionen sind nicht vorgesehen. Eine gekoppelte AMAN-DMAN-Planung beginnt in der Regel 15–30 Minuten vor der Landung – ein zu kurzer Zeitraum, um bei dynamischen Bedingungen (z. B. Bahnkonfiguration, Wetter) effizient planen zu können. Der FlowMan hingegen erlaubt einen erweiterten Planungshorizont mit einem mengenbasierten Ansatz, bei dem Abflüge noch nicht fest zugewiesen sind.

[2] E-OCVM-Reifegrad (E-OCVM Maturity) ist die Lebenszyklusstufe eines operativen Konzepts im Validierungsprozess des europäischen ATM. Reifegrad V2 ist dabei die Machbarkeit (Feasibility), V3 ist die vor-operationelle Entwicklung und Integration (Pre-Industrial Development & Integration) und V4 die Industrialisierung.

Der kurzfristige Bereich wird dabei bewusst nicht betrachtet. Alle verfügbaren Parameter können – abhängig von der Datenqualität – mit einem Horizont von bis zu 4 Stunden analysiert werden.

Im Zuge der Durchführungsverordnung (EU) 2021/116 (CP1) [10], die eine AMAN-/DMAN-Integration als ATM-Unterfunktion vorschreibt, lag ein besonderer Fokus der FlowMan-Entwicklung auf den Tower-Standorten Düsseldorf und Berlin, für die eine Integration bis spätestens 31.12.2027 verpflichtend ist. Ursprünglich war der FlowMan nicht darauf ausgelegt, die CP1-Anforderungen zu erfüllen. Nach eingehender Prüfung durch den SESAR Deployment Manager wurde jedoch festgestellt, dass die Lösung die Anforderungen des CP1-Mandats unterstützt und somit als zulässige Implementierungsoption anerkannt werden kann. Auf Grundlage des operationellen Feedbacks konnte zudem auf eine Center-Lösung verzichtet und eine reine Tower-Implementierung angestrebt werden.

Funktionen und Eingangsdaten

Ziel der FlowMan-Entwicklung war es, ein Tool für die Verkehrsflusssteuerung von An- und Abflügen an Großflughäfen zu entwickeln, um dem Tower die Möglichkeit einer gemeinsamen vorausschauenden Planung zu geben. Mit dem FlowMan können unterschiedlicher Bahnnutzungsstrategien bezüglich ihrer Auswirkungen auf den Flow und Delay untersucht werden. Der Flow ist die Anzahl der An- und Abflüge pro 10 Minuten Intervall aufgrund der eingestellten Bahnparameter und der Delay ergibt sich aus der Differenz der geplanten Zeit und der frühesten Lande- bzw. Startzeit. Dabei können alle relevanten Parameter für die Nutzung des Bahnsystems verändert werden:

- Arrival Flow
- Departure Intervall
- Kapazität der Bahn bei kombinierter Nutzung
- Mischungsverhältnis von An- und Abflügen
- Verteilungsstrategie für An- und Abflüge

Bei Veränderung der obigen Parameter werden die Auswirkungen auf den Flow und Delay dem Benutzer in Grafiken dargestellt. Damit können frühzeitig Überlastsituationen erkannt werden, und durch die geeignete Wahl einer Bahn-Nutzungsstrategie vermieden oder verringert werden.

Außerdem ist auch der direkte Vergleich zweier unterschiedlicher Varianten von Bahnnutzungsstrategien möglich, wodurch die Bestimmung einer geeigneten Nutzungsstrategie vereinfacht wird. Darüber hinaus wurde ein zentraler Ansatz für das System gewählt, das heißt, für den Testbetrieb wurde der FlowMan zentral durch das Lage und Informationszentrum (LIZ) der DFS mit den Eingangsdaten versorgt. Es gibt aktuell FlowMan-Testversionen für die Flughäfen Düsseldorf, Berlin und München, die sich aber noch nicht in der operationellen Nutzung befinden. Die endgültige Architektur wird vom Vorhaben FlowMan festgelegt werden.

Für die Berechnung von Demand, Flow und Delay benötigt der FlowMan Daten der An- und Abflüge eines Flughafens. Die Daten der Abflüge werden durch die Systeme TFDPS (Tower Flight Data Processing System) und A-CDM (Airport Collaborative Decision Making) geliefert und diese werden dann vom LIZ an den FlowMan weitergeleitet. Für die Anflüge gibt es zwei Datenquellen, zum einen das LIZ mit den ETFMS (Enhanced Tactical Flow Management System) -Daten und den AMAN. Befinden sich die Anflüge außerhalb des AMAN-Planungshorizonts, werden die ETFMS-Daten verwendet, ansonsten die AMAN-Daten.

TFDPS- und A-CDM-Daten

A-CDM (Airport Collaborative Decision Making) ist ein Konzept, welches bei Aircraft Operators (AO), Ground Handling Agents (GH), Air Traffic Control (ATC) und des Network Manager Operations Centre (NMOC) zu einem effizienteren und transparenteren Zusammenarbeiten führt, um den Verkehrsfluss und das Kapazitätsmanagement an einem Flughafen zu verbessern. STANLY_CDM (Statistics and Analysis System and Airport Collaborative Decision Making) dient bei der Deutschen Flugsicherung als Data Hub zum Datenaustausch zwischen EUROCONTROL (NMOC), den Flughäfen, den Fluglinien sowie der Deutschen Flugsicherung über unterschiedlichste Schnittstellen. Über eine Schnittstelle liefert das System TFPDS-Daten zu:

- Flugereignissen (EVENT)
- Departure Planning Information (DPI)
- Sequenzmeldungen (SEQU)
- Bahnzustände (RIU)
- Zielzeiten für Flugpläne (TTIME)

Über eine weitere Schnittstelle erhält TFDPS auch Daten in Form von Flight Update Messages (FUM) aus STANLY_CDM.

Das TFDPS stellt in EVENT- und DPI-Meldungen detaillierte Planungsinformationen für die Abflüge zur Verfügung. Weitere Informationen zum Format der Meldungen sind in dem Dokument [11] zu finden.

Es werden die folgenden Daten für die Planung der Abflüge genutzt:

- TOBT (Target Off-Block Time)
- TSAT (Target Startup Approval Time)
- AOBT (Actual Off-Block Time)
- TAXITIME (Taxi Time)
- CTOT (Calculated Take-Off Time)
- ATOT (Actual Take-Off Time)

ETFMS-Daten

Die Flight Update Messages werden ebenfalls von STANLY_CDM bereitgestellt. Für Anflüge außerhalb des AMAN-Planungshorizonts werden folgende ETFMS-Daten für die Planung der Anflüge verwendet:

- ELDT (Estimated Landing Time)
- ALDT (Actual Landing Time)
- STAR (Standard Arrival Route)
- RWY (Arrival Runway)
- PARK (Arrival Parking Position)

AMAN-Daten

Der AMAN liefert für die Anflüge in seinem Erfassungshorizont (ca. 200NM um die Metering Fixe) genaue Informationen über die früheste Landezeit und die Sequenz. Das System ist dabei adaptiv ausgelegt und passt die Planung automatisch an eine veränderte Führung durch die Lotsen an. Aus diesem Grund ist die Qualität der Daten deutlich besser als die der-ETFMS Daten, da es immer die aktuelle Verkehrssituation widerspiegelt. Es werden die folgenden Daten für die Planung der Anflüge genutzt:

- EETA (Earliest Estimated Time of Arrival)
- Sequenznummer
- Wirbelschleppenkategorie
- ALDT (Actual Landing Time)

Berechnung der Landezeiten

Bei den Anflügen wird die Zielzeit für die Landebahn-Schwelle STA (Scheduled Time of Arrival) berechnet.

$$STA \geq EETA$$

Diese Zeit ist so zu bestimmen, dass kein Luftfahrzeug vor seine EETA geplant werden kann. Das heißt, es gilt die oben genannte Ungleichung.

Die Planzeiten eines Luftfahrzeugs ergeben sich in der Regel aus der Planzeit und Gewichtsklasse des Vorgängers in der Gesamtreihenfolge. Die Wirbelschleppenstaffelung (Wake Vortex Separation) definiert Mindestabstände die zwischen nachfolgenden Flugzeugen eingehalten werden müssen, um die gefährlichen, hinter einem Flugzeug entstehenden Luftwirbel (Wirbelschleppen) zu vermeiden, wobei die Staffelung von Gewicht und Typ des führenden Flugzeugs abhängt [12]. Durch die sogenannte Separationsmatrix ist die Separation in Nautischen Meilen von Luftfahrzeugen unterschiedlicher Gewichtsklassen beschrieben. Mit der Matrix in Tabelle 1 können die Separationen der Luftfahrzeuge in den vier Kategorien Heavy, Medium, Light und Super berechnet werden:

Tabelle 1: Berechnungsmatrix für Separationen.

Lead/Trail	Heavy	Medium	Light	Juliet
Heavy	3.0	3.0	3.0	6.0
Medium	4.0	3.0	3.0	7.0
Light	6.0	5.0	4.0	8.0
Super	3.0	3.0	3.0	3.0

Die Separationen ergeben sich aus der Wirbelschleppenkategorie des Vorgängers (in der Tabelle 1 sind dies die Spalten) und der Gewichtsklasse des Nachfolgers (diese werden in den Zeilen dargestellt). Die Separationen sind dabei in Nautischen Meilen angegeben. Bei der Zielzeitberechnung müssen diese Separationen in Zeiten umgerechnet werden. Dies geschieht dadurch, dass man die räumlichen Separationen durch die angenommene Geschwindigkeit der Luftfahrzeuge an der Landebahnschwelle dividiert und so die zeitlichen Separationen erhält. Mit einer angenommenen Durchschnittsgeschwindigkeit an der Schwelle von 145 Kts ergibt sich die in Tabelle 2 dargestellte zeitliche Separationsmatrix in Sekunden.

Tabelle 2: Berechnungsmatrix für Separationen bei Durchschnittsgeschwindigkeit von 145 Kts.

Lead/Trail	Heavy	Medium	Light	Juliet
Heavy	74	74	74	149
Medium	99	74	74	174
Light	149	124	99	199
Super	74	74	74	74

Die Berechnung der Zielzeiten soll nun für den Fall erläutert werden, dass die Zielzeit für Luftfahrzeug *k* bereits bestimmt wurde und die Zielzeit für Luftfahrzeug *k+1* berechnet werden soll. Es gelte für Luftfahrzeug *k* die Planzeit STA_k und für seine Gewichtsklasse (Wake Vortex Category) $WVC_k \in \{H,M,L,J\}$ mit H=Heavy, M=Medium, L=Light, J=Super. Für das Luftfahrzeug *k+1* gelte ebenfalls $WVC_{k+1} \in \{H,M,L,J\}$. Dann berechnet sich die frühste mögliche Zielzeit von Luftfahrzeug *k+1* wie folgt:

$$STA_{k+1} = STA_k + Sep(WVC_k, WVC_{k+1})$$

Die Funktion *Sep* liefert die zeitlichen Separationen gemäß der obigen Tabelle 2. WVC_k und WVC_{k+1} bezeichnen die Spalte und Zeile die aus der Tabelle zu verwenden ist. Der hier beschriebene Fall entspricht einer Flow Einstellung von 3 NM. Da in der Separationsmatrix alle nicht wirbelschleppenrelevanten Kombinationen den Wert 3 NM haben. Unter Berücksichtigung eines Flow-Wertes ergibt sich die folgende Separationsfunktion:

$$Sep^{I}(WVC_k, WVC_{k+1}) = \max(Flow, Sep(WVC_k, WVC_{k+1}))$$

Dabei muß die veränderte Separationsmatrix in Tabelle 3 verwendet werden:

Tabelle 3: Veränderte Separationsmatrix.

Lead/Trail	Heavy	Medium	Light	Juliet
Heavy	1.0	1.0	1.0	6.0
Medium	4.0	1.0	1.0	7.0
Light	6.0	5.0	4.0	8.0
Juliet	1.0	1.0	1.0	1.0

In dieser Matrix haben alle nicht wirbelschleppenrelevanten Kombinationen den Wert 1. Möchte man auch noch mehrere verschiedene Flow-Werte zu unterschiedlichen Zeiten berücksichtigen können, ergibt sich die folgende Formel:

$$Sep^{II}(WVC_k, WVC_{k+1}, T) = \max(Flow(T), Sep(WVC_k, WVC_{k+1}))$$

Jetzt kann auch noch der Zeitpunkt *T* für verschiedene Flow-Werte berücksichtigt werden. Als Wert für *T* wird dabei immer die Planzeit STA_k verwendet. Damit ergibt sich die folgende Formel zur Berechnung der Separationen unter Berücksichtigung zeitlich veränderlicher Flow-Werte:

$$STA_{k+1} = STA_k + \max(Flow(STA_k), Sep(WVC_k, WVC_{k+1}))$$

Betrachtet man nun noch die *EETA* so erhält man die folgende Formel zur Berechnung der *STA*:

$$STA_{k+1} = \max(EETA_{k+1}, STA_k + \max(Flow(STA_k), Sep(WVC_k, WVC_{k+1})))$$

Berechnung der Startzeiten

Bei der Startzeitenberechnung sind 3 unterschiedliche Fälle für jedes LFZ ohne ***CTOT*** zu berücksichtigen:

1. ***TOBT*** liegt nicht vor, dann wird mit der ***EOBT*** gerechnet
2. ***TOBT*** liegt vor, aber keine ***AOBT***
3. ***AOBT*** liegt vor

Es soll hier zunächst der 2. Fall bei Verwendung der ***TOBT*** betrachtet werden.

Startzeiten Berechnung mit TOBT

Die ***RTOT*** (Requested Take-Off-Time) für Luftfahrzeug k berechnet sich aus der ***TOBT*** (Target Off-Block Time) und der ***TAXI***-Zeit (Taxi Time):

$$RTOT_k = TOBT_k + TAXI_k$$

Die Sequenz aller startenden LFZ ergibt sich nach dem Sortieren aller LFZ nach der ***RTOT***.

$$Seq_dep = \{LFZ_1, LFZ_2, ..., LFZ_n\}$$

Es gelte für Luftfahrzeug *k* die Startzeit $STOBT(TOBT)_k$, dann berechnet sich die früheste mögliche Startzeit von Luftfahrzeug *k+1* wie folgt:

$$STOT(TOBT)_{k+1} = STOT(TOBT)_k + DPI(LFZ_k, LFZ_{k+1})$$

Dabei wird für das Departure Intervall ***DPI*** ein Wert von 60–300 Sekunden verwendet. Betrachtet man nun noch die früheste Startzeit von Luftfahrzeug *k+1*, so ergibt sich die folgende Formel zur Berechnung der Startzeit ***STOBT(TOBT)***:

$$STOT(TOBT)_{k+1} = \max(RTOT_{k+1}, STOT(TOBT)_k + DPI(LFZ_k, LFZ_{k+1}))$$

Der Delay mit ***STOB(TOBT)*** ist dann

$$Delay(TOBT, LFZ_i) = STOT(TOBT)_i - RTOT_i$$

Dies ist die Startzeitenberechnung bei unabhängiger Nutzung einer Bahn. Für den Fall der kombinierten Nutzung, ergibt sich eine weitere Einschränkung bezüglich der Anzahl an Abflügen pro 10-Minuten-Intervall.

Startzeiten Berechnung mit AOBT

Die *OTOT* (Offblock Take-Off-Time) für Luftfahrzeug k berechnet sich aus der ***AOBT*** (Actual Off-Block Time) und der ***TAXI***-Zeit (Taxi Time):

$$OTOT_k = AOBT_k + TAXI_k$$

Damit ergibt sich dann die folgende Formel zur Berechnung der Startzeit ***STOT(AOBT)*** :

$$STOT(AOBT)_{k+1} = \max(OTOT_{k+1}, STOT(AOBT)_k + DPI(LFZ_k, LFZ_{k+1}))$$

Planungsanzeigen

Mit den im vorigen Abschnitt beschriebenen Eingangsdaten werden im FlowMan der Demand, Flow und Delay aller An- und Abflüge mit einem Zeithorizont bis zu 4 Stunden in der Zukunft berechnet.

Dabei können die folgenden Parameter der Start- und Landebahn verändert werden:

- Arrival Flow
- Departure-Intervall
- Kapazität der Bahn bei kombinierter Nutzung
- Mischungsverhältnis von An- und Abflügen
- Verteilungsstrategie für An- und Abflüge

Das Display ist in 4 Blöcke geteilt (von links nach rechts):

- Toolbar zur Veränderung der Start- und Landebahn Parameter
- Grafiken der aktiven Variante mit Demand, Flow und Delay
- Grafiken mit Demand, Flow und Delay der abgespeicherten Variante
- Stunden Diagramme für Demand, Flow und Delay von aktiver und abgespeicherter Variante

In Abbildung 2 ist der FlowMan für Düsseldorf dargestellt. Die Anflüge werden in blau oberhalb der X-Achse angezeigt und die Abflüge in grün unterhalb der X-Achse. Der Demand wird dargestellt durch eine blaue und grüne Linie und zeigt die Menge von An- und Abflügen, die in den einzelnen 10-Minuten-

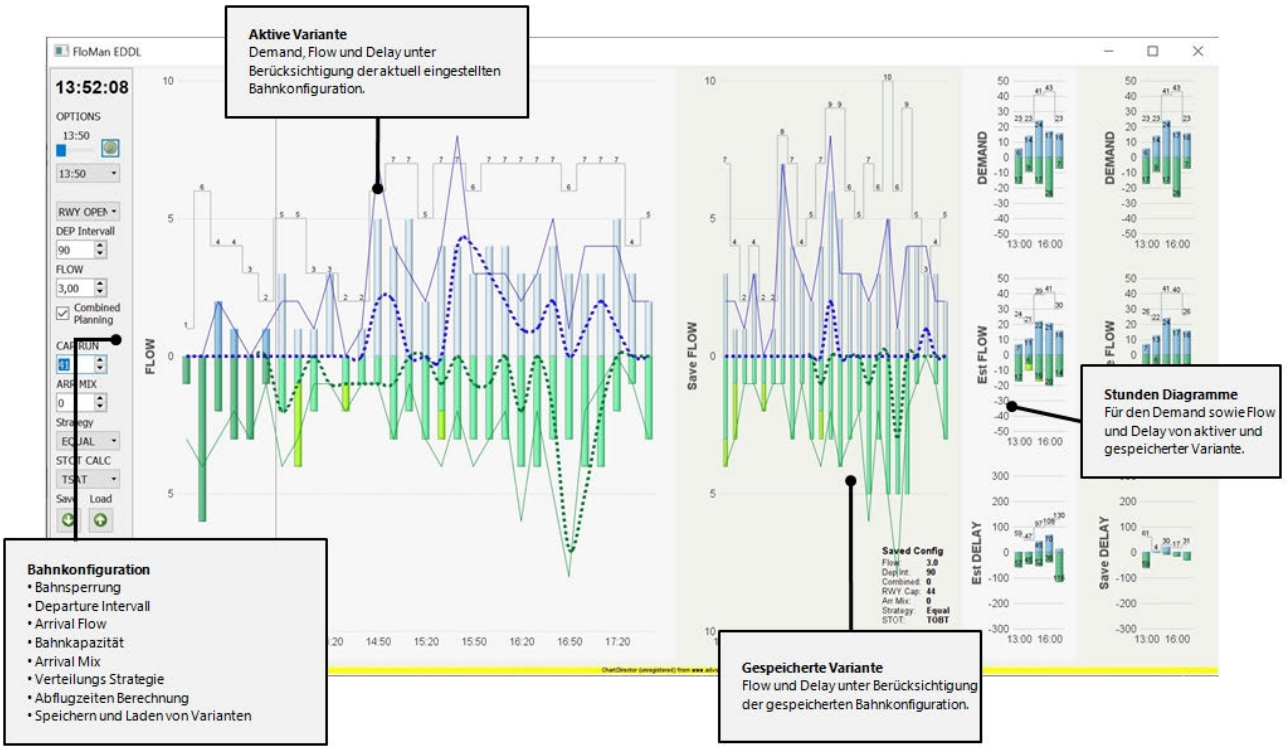

Abbildung 2: FlowMan Düsseldorf mit Zeithorizont von 4 Stunden.

Intervallen des Zeithorizonts starten und landen möchten. Flüge werden entsprechend ihrer EETA (frühestmögliche Landezeit) und RTOT (frühestmögliche Startzeit) in die Intervalle einsortiert. Der Flow wird durch die blauen und grünen Balkendiagramme dargestellt und zeigt die unter Berücksichtigung von Flow, DEP-Intervall oder Combined Planning tatsächlich mögliche Menge von An- und Abflügen in den einzelnen 10-Minuten-Intervallen an. Flüge, deren frühestmögliche Lande- oder Startzeiten zu dicht beieinander liegen, werden entzerrt und auf die geplanten Zeiten verschoben. Regulierte Abflüge werden in gelbgrün dargestellt. Die Summe der An- und Abflüge wird durch eine graue Linie dargestellt. Der Delay wird durch die gepunkteten blauen und grünen Linien dargestellt und zeigt die Anzahl von Flügen, die aufgrund der eingestellten Konfiguration gegenüber dem Demand in das nächste 10–Minuten-Intervall verschoben werden müssen.

Es können zwei Bahnnutzungsvarianten mit unterschiedlichen Parametern direkt miteinander verglichen werden. Die Unterschiede im Flow und Delay der Varianten werden in einer separaten Grafik dargestellt. Außerdem ist es möglich, Varianten zu speichern und zu laden.

In diesem Beispiel ist die aktive Variante mit kombinierter Planung von An- und Abflügen und einer Bahnkapazität von 41 (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4). Die gespeicherte Variante ist ohne kombinierte Planung. Mit der Toolbar (siehe Abbildung 5) können die Bahnparameter verändert werden.

Options ermöglicht die Eingabe von Bahnkonfigurationen in der Zukunft. Mit dem Slider kann ein Startzeitpunkt bestimmt werden. Durch Klicken des Buttons wird die eingestellte Bahnkonfiguration abgespeichert und in der Drop Down Box mit dem Zeitstempel eingetragen. Die abgespeicherten Konfigurationen können dann durch Klicken auf die Zeit aktiviert werden. Durch Eingabe einer Konfiguration mit einem früheren Startzeitpunkt werden alle dahinterliegenden Konfigurationen gelöscht.

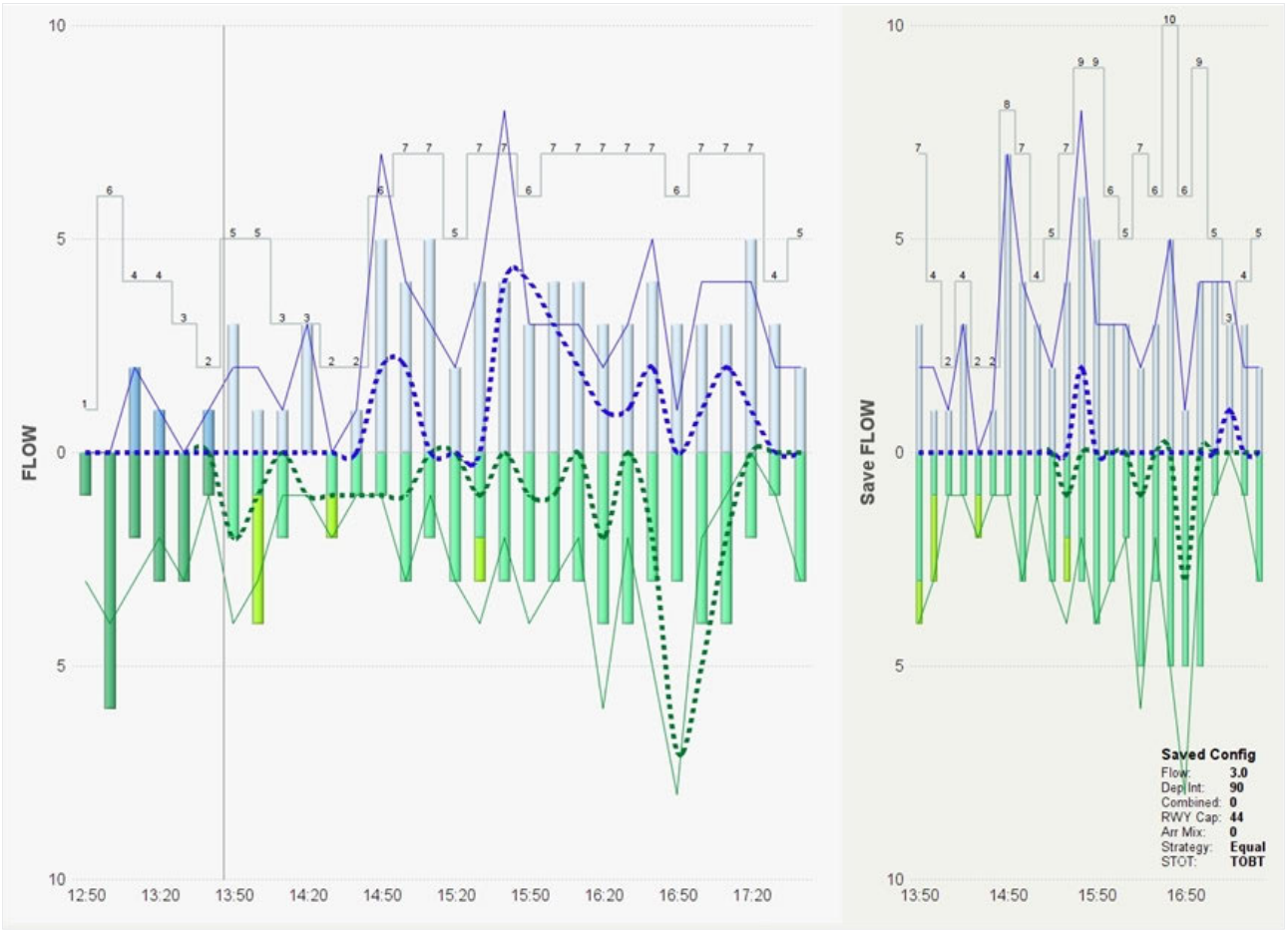

Abbildung 3:Links: *Flow*-Anzeige mit *Delay* aufgrund der *Bahnkapazität 41 der aktiven Konfiguration*; *Rechts*: G*espeicherte Konfiguration ohne kombinierte Planung* mit der *Bahnkapazität 44.*

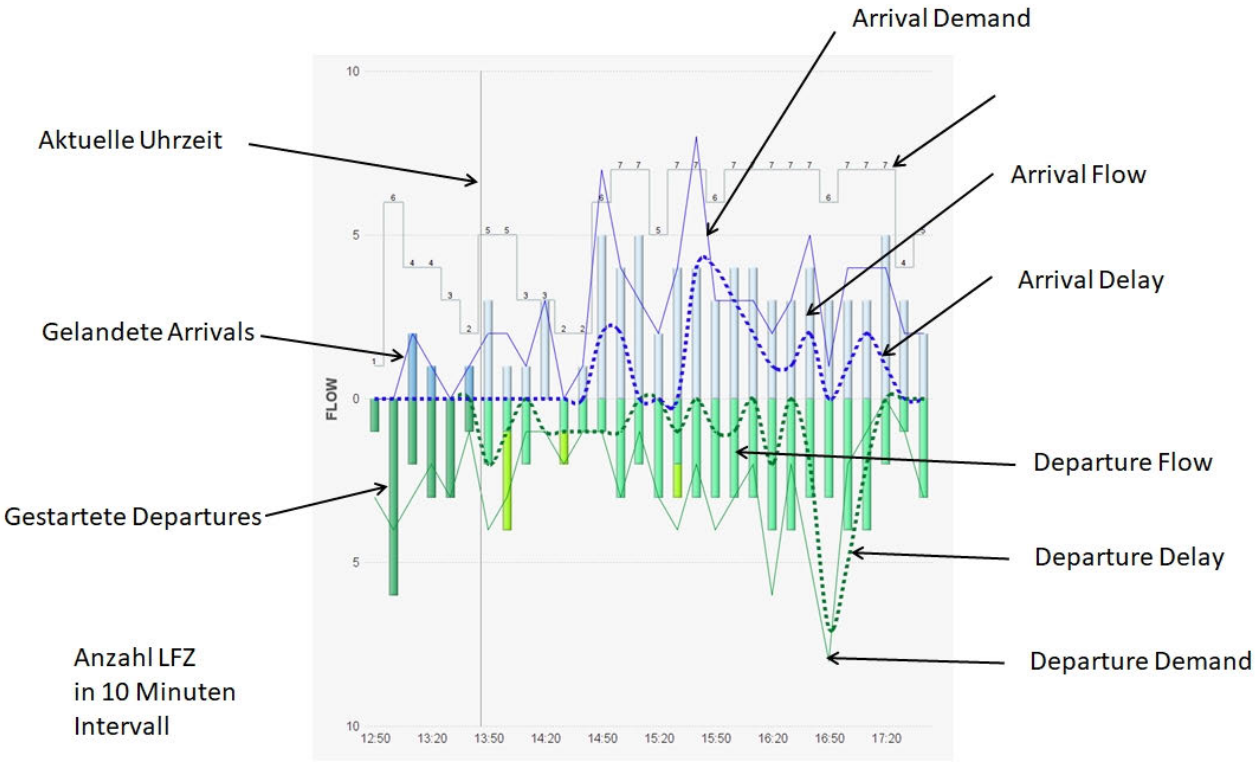

Abbildung 4: Beschreibung der Demand, Flow und Delay Grafiken für An- und Abflüge.

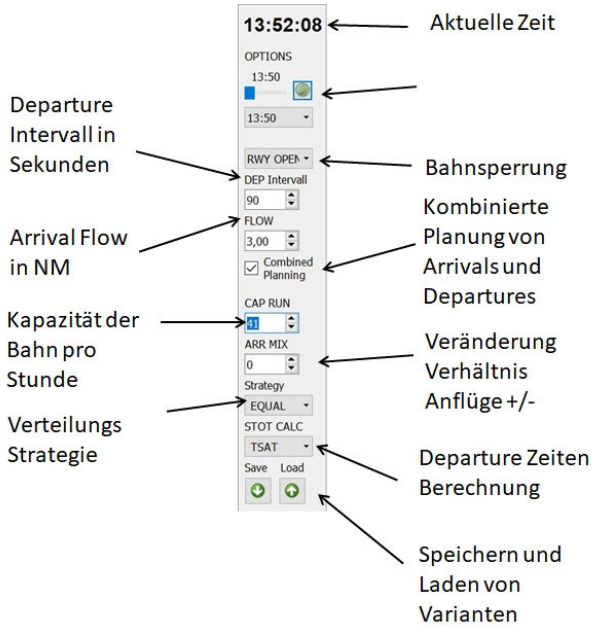

Abbildung 5: FlowMan Toolbar.

Runway Open/Close über das Drop Down Menü kann die Bahn geöffnet oder geschlossen werden. DEP Intervall entzerrt die Abflüge untereinander und entspricht den gewünschten Abständen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Abflügen in Sekunden. Diese Einstellung ist gleichbedeutend zur Abflugkapazität im Pre-Departure Sequencer.

FLOW entzerrt die Anflüge untereinander und entspricht den gewünschten Abständen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Anflügen in Nautischen Meilen. Diese Einstellung ist gleichbedeutend zum Flow im Arrival Manager.

Wird die Checkbox **Combined Planning** aktiviert, werden An- und Abflüge auf derselben Piste integriert geplant. Dabei wird zur Berechnung des FLOWs der Wert CAP RUN als Pistenkapazität im Mixed Mode, unter Berücksichtigung von ARR MIX und Strategy verwendet.

CAP RUN ist die im Mixed Mode mögliche Pistenkapazität.

ARR MIX ermöglicht es, den Anteil von Anflügen im Combined Planning manuell zu verringern (negative Werte) oder zu erhöhen (positive Werte). Beispielsweise würde ein Wert von 1 bei entsprechendem Demand dafür sorgen, dass pro 10-Minuten-Intervall ein Anflug mehr und dafür ein Abflug weniger eingeplant wird.

Alternativ dazu kann mit **Strategy** pauschal eingestellt werden, in welchem Verhältnis An- und Abflüge in den 10-Minuten-Intervallen eingeplant werden.

- An- und Abflüge gleichmäßig (EQUAL),
- Anflüge möglichst früh (ARR PRIO)
- Abflüge möglichst früh (DEP PRIO)
- Anflüge 2/3, Abflüge 1/3
- Anflüge 1/3, Abflüge 2/3

STOT Calculation steuert die Berechnungsart der Abflugzeiten und Sequenzen, entweder wird die TTOT oder die TSAT verwendet. Die Auswahl erfolgt über ein Drop Down Menü.

Save speichert das aktuell dargestellte Szenario in der rechten Fensterhälfte. Werden danach links Änderungen der Einstellungen durchgeführt, bleibt rechts das gespeicherte Szenario zum Vergleich erhalten. Mit **Load** werden die Einstellungen des gespeicherten Szenarios wiederhergestellt.

Range legt den Zeithorizont fest, der angezeigt werden soll. Eine Einstellung von 0 (Standard) bedeutet jeweils eine Stunde in die Vergangenheit und in die Zukunft, höhere Werte fügen jeweils eine weitere Stunde in der Zukunft hinzu.

Zusammenfassung

Mit dem FlowMan wurde ein neues Tool zur kooperativen An- und Abflugplanung vorgestellt. Es ermöglicht, unter Nutzung bestehender AMAN- und A-CDM-Systeme, eine abgestimmte Planung für den gesamten startenden und landenden Verkehr an einem Großflughafen. Dadurch erhalten alle Beteiligten in Center und Tower ein gemeinsames Lagebild sowohl der Boden- als auch der Luftverkehrssituation und können eine passende Bahnnutzungsstrategie koordinieren. Zusätzlich liefert das Tool Informationen zu den Bahnkonfigurationsparametern, mit denen der Verkehr gemäß der kooperativen Planung abgewickelt werden kann. Diese Parameter lassen sich anschließend in den AMAN und den A-CDM Pre-Departure Sequencer übernehmen.

Abkürzungsverzeichnis

A-CDM	Airport Collaborative Decision Making
ALDT	Actual Landing Time
ALDT	Actual Landing Time
AMAN	Arrival Manager
AO	Airport Operators
AOBT	Actual Off-Block Time
ATC	Air Traffic Control
ATOT	Actual Take-Off Time
CTOT	Calculated Take-Off Time
DMAN	Departure Manager
DPI	Departure Planning Information
DPI	Departure Invervall
EETA	Earliest Estimated Time of Arrival
ELDT	Estimated Landing Time
ETFMS	Enhanced tactical flow management system
FUM	Flight Update Messages
GH	Ground Handling Agents
LIZ	Lage und Informationszentrum
NMOC	Network Manager Operations Centre
OTOT	Offblock Take-Off-Time
PARK	Arrival Parking Position
PDS	Pre-Departure Sequencer
RIU	Bahnzustände
RTOT	Requested Take-Off-Time
RWY	Arrival Runway
SEQU	Sequenzmeldungen
STA	Scheduled Time of Arrival
STANLY	Statistics and Analysis System
STANLY_CDM	Statistics and Analysis System
STAR	Standard Arrival Route
STOT	Scheduled Take-Off-Time
TFDPS	Tower Flight Data Processing System
TOBT	Target Off-Block Time
TSAT	Target Startup Approval Time
WVC	Wake Vortex Category

Referenzen

[1] Daniel Seidel, Dr. Rainer Kaufhold: Kopplung von Arrival- und Departure-Manager im Rahmen des Projektes K-ATM, TE im Fokus 2/06 (2006).

[2] Wilfried Gerling, Daniel Seidel: Project 4D-Planner. in Scientific Seminar 2002 „The Challenges of Integration". Braunschweig, Germany: Institute of Flight Guidance, German Aerospace Center (DLR) (2002).

[3] Verbundvorhaben K-ATM – Kooperatives Flugplanungs- und Führungsverfahren – Schlussbericht des DLR e.V., Institut für Flugführung.

[4] SESAR1: SPR & INTEROP – 05.04.02-D05 Edition 00.01.03, 28. Juni 2016.

[5] SESAR2020: D2.1.010 – SESAR Solution PJ01–02 V2 SPR-INTEROP/OSED – Part I, Edition 00.02.00, 24. Juli 2019.

[6] SESAR1: Update of 5.6.4 OSED – Step 1 (Solution #05 – E-AMAN), Edition 01.01, 2015.

[7] SESAR2020: D2.1.100 – PJ.01-W2–08A1_08A2 V3 OSED-SPR-INTEROP – Part I, Edition 01.00.01, 18. Mai 2023.

[8] SESAR2020: D2.1.400 – SESAR Solution PJ.01-W2–08A1 and 08A2 Validation Report (VALR) for V3 and V2, Edition 00.02.02, Mai 2023.

[9] Epic iRUN: iRUN-Konzept, Epic Integrierte Runway Steuerung – iRUN, Vision und Strategie, Version 1.0.

[10] EU: Commission Implementing Regulation (EU) 2021/116 of 1 February 2021 on the establishment of the Common Project One supporting the implementation of the European Air Traffic Management Master Plan provided for in Regulation (EC) No 550/2004 of the European Parliament and of the Council, Official Journal of the European Union, 01. Februar 2021.

[11] DFS: STANLY_CDM Schnittstelle zu TFDPS, 2011.

[12] ICAO: Procedures for Air Navigation Services — Air Traffic Management (PANS-ATM, Doc 4444).

Obelisk – Operationelles Betriebskonzept zur sicheren und effizienten Luftraumintegration von Stratosphärenplattformen

Andreas Udovic, Katharina Leikard & Jürgen Vielhauer

Einleitung

Das Projekt „Obelisk – Operationelles Betriebskonzept zur sicheren und effizienten Luftraumintegration von Stratosphärenplattformen“ wurde von Juli 2020 bis Ende 2024 im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms durchgeführt.

Neben der DFS Deutschen Flugsicherung GmbH (DFS) waren der Deutsche Wetterdienst (DWD), die Technischen Universität Braunschweig (TUBS), sowie die Firmen Unisphäre und Leichtwerk AG am Projekt beteiligt. Geführt wurde das Konsortium von der Firma Leichtwerk. Als Unterauftragnehmer vom DWD nahm die Firma Meteo Solutions ebenfalls am Projekt teil.

Ziel war es, die mögliche Integration von High Altitude Platform Systems (HAPS) oder auch Stratosphärenplattformen zu untersuchen und ein mögliches Betriebskonzept zu entwickeln. Eine attraktive Anwendung von HAPS ist die flächendeckende Bereitstellung für den zukünftigen Mobilfunkstandard 6G. Bei der Entwicklung des Betriebskonzepts sollten sowohl die Flugsicherungsbelange berücksichtigt werden, aber auch die spezifischen Besonderheiten von HAPS und deren Betriebsbedingungen, insbesondere Einflüsse durch Wetter.

High Altitude Platform Systems (HAPS)

HAPS zeichnen sich dadurch aus, dass sie dazu konstruiert werden, möglichst lange in sehr großen Höhen zu operieren. Die Betriebshöhe von HAPS liegt zwischen FL600 und FL750. Je nach HAPS kann diese auch noch darüber liegen. HAPS können in vier Kategorien unterschieden werden:

1. Luftfahrzeuge schwerer als Luft. Dazu gehören motorgetriebene Geräte, die entweder elektrisch durch Batterien angetrieben werden, die mittels Solarenergie aufgeladen werden oder die per Wasserstoffantrieb fliegen.
2. Luftgeräte leichter als Luft, die nicht über einen eigenen Antrieb verfügen und nicht gesteuert werden können. Dies sind Freiluftballons.
3. Luftgeräte leichter als Luft, die nicht über einen eigenen Antrieb verfügen, allerdings gesteuert werden. Dies geschieht durch aufsteigen und absinken, um durch den Wind manövriert zu werden.
4. Luftfahrzeuge leichter als Luft, die über einen Antrieb verfügen, z.B. Prallluftschiffe, Zeppeline.

Abbildung 1 zeigt ein schwerer als Luft HAPS, den solargetriebenen Zephyr der Firma AALTO.

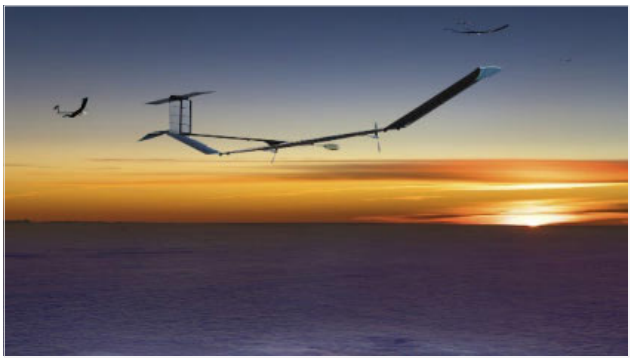

Abbildung 1: AALTO Zephyr.

Im Projekt war die Firma Leichtwerk als Industriepartner vertreten, die an einem Wasserstoff-getriebenem HAPS arbeiten. Abbildung 2 zeigt die Stratosphärenplattform der Firma Leichtwerk, welche im Rahmen des Projekts als Beispiel für ein HAPS genutzt worden ist.



Abbildung 2: Stratosphärenplattform der Firma Leichtwerk.

Kennzeichen der HAPS, insbesondere der schwerer als Luft Fahrzeuge, ist die geringe Leistung. Die HAPS sind auf lange Flugdauern ausgelegt und sind, um Energie zu sparen mit sehr guten Segelflugeigenschaften ausgestattet. Für den Zephyr oder den Stratosphärenflieger von Leichtwerk bedeutet dies eine maximale Geschwindigkeit von 25 Knoten und Steig- und Sinkraten zwischen 100 und 200ft pro Minute. Der Auf- und Abstieg dauert daher bis zu sechs Stunden.

Diese geringe Leistung stellt zum einen besondere Bedingungen hinsichtlich des Wetters, bei denen diese Geräte operieren können, zum anderen aber auch an die Flugsicherung, die diese Geräte durch den kontrollierten Luftraum auf die Missionshöhe lotsen muss.

Herausforderung für die Flugsicherung

Die Flugleistungen von HAPS sind wie oben beschrieben sehr gering. Gerade im Verhältnis zu Flugzeugen, die den oberen Luftraum nutzen sind die Unterschiede erheblich. Dies bedeutet eine große Herausforderung für die Flugsicherung, die diese Systeme durch den kontrollierten Luftraum auf die Missionshöhe führen müssen. In Deutschland geschieht dies zudem in einem der komplexesten und am dichtesten beflogenen Lufträume der Welt. Für eine flächenendeckende Mobilfunkanbietung in Deutschland müssen zudem eine hohe Anzahl von HAPS (ca. 30) zur selben Zeit in der Missionshöhe operieren. Diese Berechnung ergab sich durch eine Abdeckung von 120nm Radius pro HAPS. Dies bedeutet aber auch, dass je nach Standzeit der HAPS in der Missionshöhe ständig HAPS auf- und absteigen müssen, um die flächendeckende Versorgung sicherzustellen. Dies erschwert die Arbeit der Flugsicherung enorm. Zudem ist momentan unklar, wer in der Missionshöhe über FL 660 für die Kontrolle der HAPS zuständig ist. In Deutschland ist bis FL 660 die Luftraumklasse C ausgewiesen. Die DFS hat die Aufgabe in dieser Luftraumklasse Flugsicherungsdienstleistungen anzubieten. Über FL660 ist seit 2024 die Luftraumklasse G durch das Bundesministerium für Verkehr festgelegt worden. Bisher sind Flüge in diesen Höhen auf militärische Anwendungen oder Wetterballons und Raketenstarts begrenzt. In dieser Luftraumklasse gilt für Flüge das Prinzip der Eigenverantwortung für die Sicherheit des Fluges auf der Basis „See and Avoid“. Mit zunehmendem Verkehr über FL 600 wird sich ggf. die Luftraumklasse ändern müssen, um dort ebenfalls Flugsicherungsservice anbieten zu können oder es müssen andere Lösungen für einen sicheren Betrieb gefunden werden.

Ziel der DFS im Projekt Obelisk

Zentrales Ziel der DFS war es, die Auswirkungen der Integration von HAPS zu untersuchen und ein Betriebskonzept zu entwickeln, welches die Integration ermöglicht. Insbesondere sollten die Effekte des Auf- und Abstieges von HAPS auf die Flugsicherung durch den kontrollierten Luftraum C untersucht werden. Aber auch die Flugplanung und der Austausch von Trajektorien zwischen dem HAPS Betreiber und der Flugsicherung waren Teil der Untersuchung. Dabei sollte der Effekt auf die heutige Luftfahrt minimiert werden, so dass Kapazitätseinschränkungen für diese minimiert bzw. möglichst vermieden werden.

Um dies zu gewährleisten, wurde der gesamte Prozess eines HAPS Fluges von der Flugplanung, über die Flugplanaufgabe bis hin zum Flug selbst untersucht. Dabei wurden Bedingungen, wie zum Beispiel die Wetterabhängigkeit von HAPS mitberücksichtigt. Auch notwendige Notverfahren wurden betrachtet.

Ablauf des Projektes

Um die genannten Ziele zu erreichen, wurden im Projekt fünf Arbeitspakete definiert. Das erste Arbeitspaket umfasst die Anforderungsanalyse. Basierend auf einer Stakeholder Analyse wurden Use Cases abgeleitet, die die HAPS Anforderungen und Bedingungen definierten. Basierend auf diesen Use Cases wurde dann eine Analyse der aktuellen Flugsicherungskonzepte durchgeführt, so dass Anforderungen an die Flugsicherung hinsichtlich der Integration von HAPS abgeleitet werden konnten. Zusammen mit den meteorologischen Ergebnissen dieses Arbeitspaketes wurden dann Demonstrationsszenarien abgeleitet.

In Arbeitspaket 2 wurde dann das Betriebskonzept entwickelt. Zentrales Element war die Untersuchung der Flugplanverhandlung und die Auswirkungen auf die DFS. Dabei wurden die Auswirkungen auf den Lotsenarbeitsplatz und die Flowmanagement Position untersucht. Des Weiteren wurde eine mögliche Automatisierung der Betriebsverfahren betrachtet.

Arbeitspaket 3 beinhaltet die Analyse der Mensch-Maschine Schnittstelle. Im Fokus der DFS stand hier die Arbeitsposition des Flowmanagers, welcher die Kapazität in den Sektoren und die zu erwartende Verkehrsmenge analysiert. Bei einer Überschreitung der Kapazität in Sektoren greift diese Position steuernd in den Verkehrsfluss ein. Geplant waren

mögliche Schnittstellen zum HAPS Operator bereitzustellen und ggf. zu verbessern.

Im Arbeitspaket 4 wurde die Simulationsumgebung bereitgestellt. Der DFS Realzeitsimulator AFS (Advanced Functions Simulator) wurde durch die Integration eines HAPS Modells, basierend auf den Leistungsdaten von Leichtwerk, angepasst. Ebenso wurden Sektor- und Verkehrsdaten aus der Niederlassung Bremen bereitgestellt. Basierend auf den Ergebnissen des Arbeitspaketes 2 wurden Winddaten definiert und im Simulator bereitgestellt. Neben der Integration eines HAPS Modells im Simulator wurde eine Kopplung mit dem HAPS Simulator der Firma Leichtwerk realisiert. Dadurch war eine realistische Simulation möglich.

Im fünften Arbeitspaket wurden zwei Simulationskampagnen durchgeführt, an denen eine aktive Lotsin und zwei ehemalige Lotsen der DFS teilnahmen. In der erste Kampagne wurden der Auf- und Abstieg von HAPS untersucht. Die Ergebnisse wurden durch Anpassungen in der zweiten Kampagne verifiziert.

Die Ergebnisse wurden ausgewertet und werden im nachfolgenden dargestellt.

Ergebnisse des Projektes

Im Rahmen des Projekts hatte die DFS die Aufgabe ein Betriebskonzept für die Integration von HAPS in den Luftraum zu entwickeln. Dabei sollten folgende Elemente berücksichtigt werden:

- Die geringen Leistungsparameter von HAPS hinsichtlich der Geschwindigkeit und der Steig- und Sinkrate.
- Alle Flugphasen vom Start, über die Transitionsphase durch den kontrollierten Luftraum bis ins Missionsgebiet.
- Berücksichtigung des Wettereinflusses auf die HAPS-Operation.
- Notfallverfahren für HAPS.
- Auswirkungen auf die Arbeitspositionen in den Kontrollzentralen der DFS.
- Anpassung der operativen Technik und Arbeitsplätze insbesondere der Flow Management Position durch Flugplanverhandlung mit dem HAPS-Operator.
- Validierung des Betriebskonzepts mittels Realzeitsimulation.

Zusammen mit den Projektpartnern wurde dieses Betriebskonzept entwickelt. Durch die Analyse des Flugplanungsprozesses und in Diskussion mit dem Eurocontrol Network Manager, der in Zentraleuropa für die Flugplanung und Verkehrsanalyse zuständig ist, konnte der Einfluss dieses Prozesses auf die DFS untersucht werden. Dabei ergab sich, dass eine Anpassung der Arbeitsplätze im Bereich Flow Management der DFS nicht notwendig ist. Die notwendige Flugplanverhandlung und Aktualisierung wird zwischen Eurocontrol Network Manager und HAPS-Operator durchgeführt. Die DFS bekommt dann die aktualisierten Flugpläne, um die HAPS-Flüge sicher kontrollieren zu können. Daher wurde dieser Punkt des Betriebskonzepts angepasst und die ursprünglich geplanten Arbeiten im Projekt (Anpassung des Flow Management Arbeitsplatzes, Simulation) mussten nicht ausgeführt werden. Das freiwerdende Budget konnten dem Projektpartner Leichtwerk für Flugversuche mit einem HAPS-Modell zur Verfügung gestellt werden.

Die anderen Punkte des Betriebskonzepts konnten mit Hilfe der Projektpartner bearbeitet werden. So wurden durch Meteo Solutions, im Auftrag des DWD, mögliche Start- und Landeflugplätze für HAPS auf ihre ganzjährliche Verfügbarkeit hinsichtlich Wetterbedingung untersucht.

Die DFS analysierte das Flugverhalten der HAPS und untersuchte mögliche Auf- und Abstiegsgebiete für die Transition und den Weiterflug in die Missionsgebiete über FL660. Ebenfalls wurden die Notverfahren für HAPS mit den bestehenden Verfahren abgeglichen. Diese Ergebnisse wurden in der Realzeitsimulation mit eingeplant.

Basierend auf dem entwickelten Betriebskonzept wurde eine Realzeitsimulation durchgeführt. Dabei wurde der Umfang aus den oben beschriebenen Gründen deutlich reduziert: Eine neue Abseitsposition musste nicht aufgebaut werden und daher konnte auch der Simulationsumfang reduziert werden. Bedingt durch den Verkehrsanstieg nach der Coronapandemie war auch der Einsatz von aktiven Fluglosten nur bedingt möglich. Daher wurden zwei vormalige Lotsen der DFS für die Simulation eingesetzt, sowie teilweise eine aktive Lotsin. Allerdings ergab sich nach der ersten Simulation die Möglichkeit in einer zweiten Simulationskampagne die erzielten Ergebnisse der ersten Simulation zu festigen und zu vertiefen.

Um die Simulation durchführen zu können, wurde ein Verkehrsszenario des unteren Luftraum Bremens genutzt. Simuliert wurde der Börde Sektor westlich

von Berlin, der durch Abflüge von Berlin durchflogen wird. Er geht vom Boden bis Flugfläche 245 (ca. 7,5km). Abbildung 3 zeigt den Sektor mit dem Aufstiegsbereich für die HAPS.

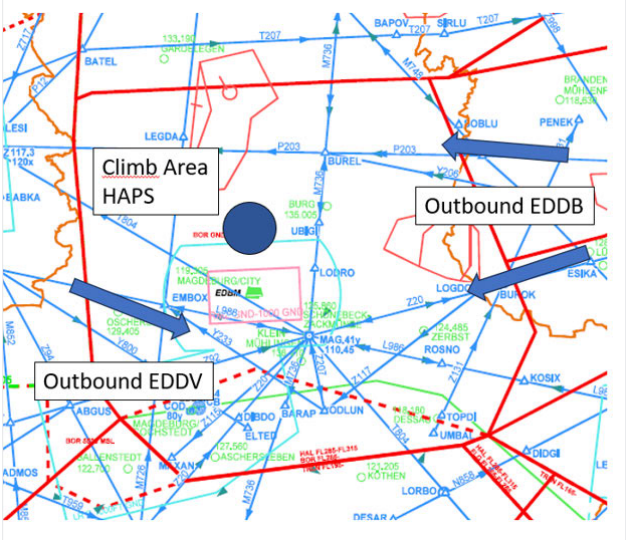

Abbildung 3: Simulationsgebiet Börde Sektor.

Um die Simulation realistisch durchführen zu können wurden der HAPS-Simulator der Firma Leichtwerk mit dem ATC-Simulator der DFS verbunden. Zudem wurde ein HAPS-Model im ATC-Simulator integriert, so dass mehrere HAPS zur selben Zeit im Szenario fliegen konnten.

Abbildung 4 zeigt HAPS auf dem Radarbildschirm des Fluglotsen. In diesem Szenario befinden sich drei HAPS auf dem Rückflug zum Flugplatz Cochstedt (EDBC).

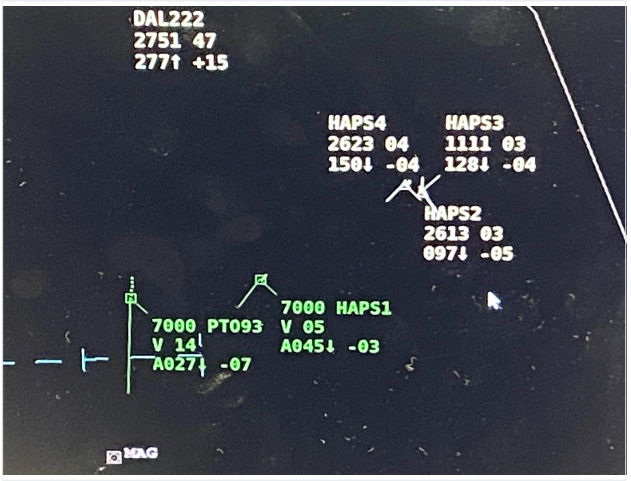

Abbildung 4: Ausschnitt des Radarbildschirm des Lotsen.

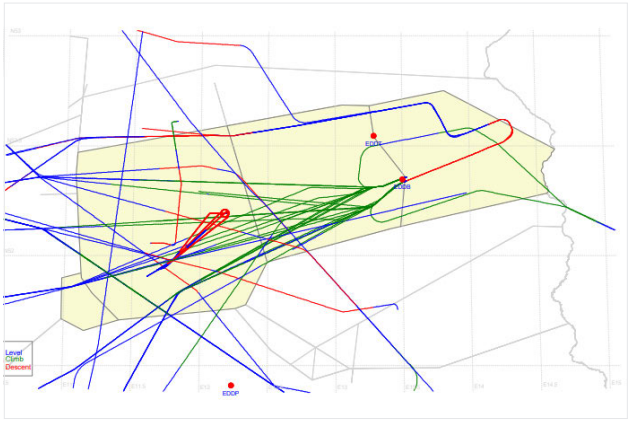

Abbildung 5: Verkehrsspuren eines Simulationsruns.

Abbildung 5 zeigt die Flugspuren eines Simulationsruns. Die HAPS sinken in der Descent Area bis sie diese verlassen und den Anflug auf den Zielflughafen starten und dort dann landen (vom roten Kreis ausgehend nach Cochstedt, blauer Kreis). Die anderen Flugspuren sind der kreuzende Verkehr, den der Fluglotse zu berücksichtigen hat und den er konfliktfrei von den HAPS halten muss.

Die Simulationskampagnen wurden vom 30. Januar bis zum 2. Februar 2024, sowie am 26. und 27. November 2024 durchgeführt.

Folgende Daten wurden erhoben:

- Aufzeichnung der Simulation und Auswertung der Flugspuren (Anzahl der Lfz im Sektor, Flugdauer im Sektor, Unterschreiten der Separation, etc.)
- Erfassung der Arbeitslast während des Simulationsruns alle 10 Minuten.
- Debriefing nach jedem Simulationsrun (Arbeitslast, Verhalten der HAPS, Integration der HAPS in dem Verkehrsfluss, Auffälligkeiten im Run, etc.)

Die Ergebnisse der beiden Kampagnen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

<u>Arbeitslast des Fluglotsen</u>

- Durch die Integration der HAPS wurde die Arbeitslast des Fluglotsen stark gesteigert.
- Da die HAPS unter der Kontrolle des Fluglotsen operierten, musste er ihnen Anweisungen zum Steigen, Sinken oder Steuerkurse per Funk geben.
- Zudem musste er den kreuzenden Verkehr durch Umleiten der Flugzeuge vom Flugweg der

HAPS freihalten. Insbesondere das Umfliegen der Steig- und Sinkgebiete erhöhte die Arbeitslast der Lotsen stark.

- Bei starkem Wind drifteten die HAPS für den Lotsen unkontrolliert. Dies erhöhte ebenfalls die Arbeitslast stark, in einem Fall driftete das HAPS direkt in den Abflugstrom aus Berlin.

Safety

- Durch die Erhöhung der Arbeitslast war auch die Sicherheit betroffen. Insgesamt konnten drei Unterschreitungen des Mindestsicherheitsabstandes registriert werden.
- In der Befragung berichteten die Lotsen, dass sie sich unsicher aufgrund der hohen Arbeitslast durch die HAPS fühlten.
- Durch die niedrige Performance der HAPS konnte nur der konventionelle Verkehr genutzt werden, um die Staffelung zu gewährleisten. Dies schränkt die Arbeitsmöglichkeiten des Lotsen ein, Konflikte zu lösen.

Verhalten der HAPS

- Die niedrige Leistung der HAPS reduziert die Möglichkeit, diese aktiv zu kontrollieren auf ein Minimum.
- HAPS können nur beobachtet werden, ohne dass man in den Flugweg eingreifen kann. Nur “stop climb/descent” sind mögliche Interventionen.

Integration in das ATM

- Eine vollständige Integration von HAPS in das Air Traffic Management mit einer aktiven Kontrolle durch den Fluglotsen ist aufgrund der Arbeitslast problematisch.
- Der Ort für den Auf- und Abstieg von HAPS sollte so ausgewählt werden, dass er den normalen Verkehrsfluss nicht oder nur sehr geringfügig stört. So können negative Effekte auf die Kapazität minimiert oder vermieden werden.
- Das Auf- und Abstiegsgebiet sollte sich nahe des Start- und Landeflugplatzes des HAPS befinden. Dies vermeidet lange Flüge zum Steig- und Sinkgebiet.
- Die Flugplanung ist ein kritischer Teil der HAPS-Flüge. Um Driften durch Wind oder kritische Situationen wie z.B. durch Eisansatz zu vermeiden, sind diese Bedingungen zu vermeiden. Dies bedeutet eine intensive Koordination durch den HAPS-Operator mit den Wetterdiensten und dem Eurocontrol Network Manager.
- Um die negativen Effekte der HAPS zu vermeiden, ist eine volle Integration mit voller Kontrolle durch den Fluglotsen nicht ratsam. Daher empfiehlt es sich Flugbeschränkungsgebiete zu nutzen, um die Steig- und Sinkgebiete einplanen zu können. Diese können klein sein und ggf. sich mit den HAPS bewegen, um die Kapazität nur geringfügig einzuschränken, z.B. 4D Operational Zones (siehe [1]).

Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Artikel stellt die wesentlichen Ergebnisse des Projekts „Obelisk“ aus Sicht der DFS dar. Wesentliche Erkenntnisse wurden aus der Entwicklung eines Betriebskonzepts gewonnen, welches beginnend bei dem Flugplanungsprozess über die Flugplanverhandlung bis hin zur Flugdurchführung alle Aspekte eines HAPS Fluges beinhaltete. Die Herausforderung für die Flugsicherung ist dabei die geringe Leistungsfähigkeit von HAPS, die sich mit einer Geschwindigkeit von ca. 25kn pro Stunde bewegen und eine Steig- und Sinkrate von ca. 100ft pro Minute besitzen. Diese geringen Flugleistungen stellen ein Problem bei der Integration in den kontrollierten Luftraum dar, insbesondere da HAPS aufgrund ihrer Missionshöhe über FL 660 vom Boden bis an die obere Grenze des kontrollierten Luftraums geführt werden müssen.

Die Validierung mittel Realzeitsimulation zeigte deutlich den erhöhten Arbeitsaufwand der beteiligten Fluglotsen durch die Kontrolle der HAPS: Zum einen wurde die Sprechfunkbelastung erhöht, da den HAPS Freigaben zum Steigen oder Sinken gegeben werden mussten. Zum anderen konnten HAPS bei einem potenziellen Konflikt mit anderen konventionellen Luftfahrzeugen aufgrund der geringen Leistungsparameter nicht in die Konfliktlösung einbezogen werden. Dies führte auch zu einem erhöhten Gefühl der Unsicherheit.

Die DFS arbeitet weiter an der sicheren Integration von HAPS, insbesondere während der Auf- und Abstiegsphase zu und von der Missionshöhe. Gleichzeitig werden die Auswirkungen auf die Kapazität mit betrachtet. Die Arbeiten aus Obelisk finden ihre Fortsetzung im durch das SESAR Joint Undertaking geförderten Projekt ECHO 2 [2][2] an dem sich die DFS im Arbeitspaket 2 „HAPS integration into European Airspace“ beteiligt.

Abkürzungsverzeichnis

ATM	Air Traffic Management
HAPS	High Altitude Platform Systems

Referenzen

[1] EUROCONTROL. (2022, 16. Dezember). European concept for higher airspace operation: Concept of operations (Version 1.0; Deliverable No. D4.3) [PDF]. SESAR Joint Undertaking. URL abgerufen am 22.10.2025: https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/D4.3_ConOps_1.0_public.pdf

[2] SESAR Joint Undertaking. (2023). ECHO 2 – European Concept for Higher Altitude Operations Phase 2: Towards the integration between Air Traffic Management and Higher Altitude Operations [Projektbeschreibung]. SESAR Joint Undertaking. URL abgerufen am 22.10.2025: https://www.sesarju.eu/projects/ECHO2

A Blueprint for a Trajectory Prediction Validation

Andrea Bach & Thomas Pütz

Deutsche Zusammenfassung

Eine validierte Trajektorienvorhersage (TP) ist entscheidend für das Luftverkehrsmanagement und dessen Kernkomponente, das Flugdatenverarbeitungssystem (FDPS), insbesondere für die Konflikterkennung und -lösung. Dieser Artikel bietet einen Bauplan für eine detaillierte Validierung im Rahmen von detailierten operationellen Anforderungen und technischen Spezifikationen.

Da reale Flüge von zahlreichen Faktoren wie Wind, Wetter, ATC-Beschränkungen und Pilotenverhalten beeinflusst werden, stellt sich die Frage: Wie lässt sich die Genauigkeit einer Trajektorienvorhersage am besten bewerten? Beobachtete Flugspuren im realen Betrieb können unbekannte Wetterbedingungen oder unterschiedliche operationelle Verfahren aufweisen. Um die Testszenarien zur Validierung der Trajektorienvorhersage an ein spezifisches Anforderungsprofil anzupassen, eignen sich deshalb Full-Flight-Simulationen (FFS) besonders gut. Spezielle Full-Flight-Simulatoren, die für die Pilotenausbildung zugelassen sind, bieten ein hohes Maß an Realismus und ermöglichen eine vollständige Kontrolle über die äußeren Flugbedingungen.

Abstract

A validated trajectory prediction (TP) is crucial for air traffic management and its core component, the flight data processing system (FDPS), particularly for conflict detection and resolution. This article provides a blueprint for a detailed validation in the context of a defined set of operational requirements and technical specifications framework. Given that real flights are influenced by numerous factors such as wind, weather, ATC constraints, and pilot interactions, the question arises: what is the best way to assess the accuracy of a trajectory prediction? Observed flight traces in real operations may have unknown weather conditions or varying operational procedures. To fit the test scenarios for trajectory prediction validation to a specific set of requirements, Full Flight Simulations (FFS) are perfectly suited. Specific Full Flight Simulators, which are qualified for pilot training, provide a high degree of realism and the external conditions for the flight can be fully controlled.

Introduction

Trajectory prediction, i.e. the predicted calculated flight path of an aircraft, plays an important role in air traffic control and Air Traffic Flow Management. Aircraft tracking, in contrast, describes the measurement of the flown flight path of an aircraft, which is equally important, and challenging in terms of accuracy and validity. If – in this article – we use the term aircraft traces we refer to a generic expression of an aircraft's flight path, either flown or predicted. In the following, we are expanding on the challenges of validating[1] trajectory prediction calculations.

For operational requirements and technical specifications there is no rationalized definition on how and when an implemented trajectory prediction application fits the technical needs necessary for those requirements. In contrast, there is an established tracker validation process installed for securing and safeguarding the operations. The importance of tracker validation is acknowledged in general because the surveillance of air traffic depends heavily on the accurate functioning of the tracking algorithms involved.

Trajectory prediction is as important for trajectory-based operations (TBO) as tracking because it is the basis of conflict detection and resolution as it was described in [1] and [2]. Also, the ATC-controllers need the best estimate of where and when a waypoint, top of climb or descent is reached. There-

[1] The term "validation" refers to the process of testing and verifying that an actual software implementation and its system design fulfil the operational user requirements and technical specifications.

fore, a trajectory prediction validation is necessary.

This article proposes an approach for trajectory prediction validation based solely on recorded aircraft traces. Traces can be anything that reports a flight path of an aircraft: it can be a simple sequence of geolocations (flight route) either recorded after the flight has been flown, or planned before takeoff, or it can be a recorded estimated track, a simulated flight path, or anything else that contains geolocation or height information from a specific flight. The traces used in this article are recorded from Full Flight Simulations (see figure 1) but any recorded trace (Mode-S track, Flight Management System (FMS) emulations, Quick Access Recordings (QAR), or smoothed FANAMOS traces) could serve as a basis for that kind of validation described within this article.



Figure 1: Operation of the LAT Full Flight Simulator of an Embraer E190.

All the methods explained were implemented with the RStudio framework (see [3]) – a programming environment for statistical computing and data visualization – and the results are presented at the end. As a conclusion the methods described herein are suitable for validating operational trajectory predictions based on operational and technical requirements.

Trajectory Prediction

Operational Requirements

A validation of the trajectory prediction depends on the requirements that the prediction must fulfill. Those requirements depend on the operational needs. From these needs the technical specifications are derived. And from those specifications the test cases are identified that have to be verified and evaluated.

These test cases can involve dependencies of the trajectory prediction on:

- initial gross weight
- route specification, calculated distances between waypoints
- ground speed
- horizontal wind
- atmospheric model
- turns based on standard or controlled bank angles and wind
- height profiles based on cruising level, cruising speed, and climb/descent CAS (speed schedules)
- height profiles influenced by vertical wind gradients
- trade-offs between prediction accuracy and computing time for the prediction calculation

Depending on the targeted operational use cases, the requirements can be fundamentally different. For instance, for tactical trajectory prediction the complete route specification is not required. Only an offset position and height and the next direct (way point) are considered. Also, in this case, consideration of turns is not necessary, but of course the horizontal wind has an impact. In contrast, for a Medium-Term Conflict Detection (MTCD) that is used during the planning phase the complete planned route must be considered.

In any case, the goal is to feature a predicted 4D aircraft trace (named trajectory) that predicts the future aircraft position and height in time. Also, fuel consumption and track angles may be required. Depending on the computing resources mathematical algorithms must be chosen to reflect the trade-off between those computing resources and the accuracy needed for the calculated trajectory.

Technical Specifications

Depending on operational requirements the technical specifications may vary. For simple calculations known ground speeds and climb and descent rates can be used. In that case a constant average wind must be considered otherwise the time of flight cannot match.

For more fine-grained calculations a three degrees of freedom point mass model for the position (including height) must be integrated for the trajectory prediction.

In those cases, the initial gross weight has to be known or estimated beforehand, and also a realistic flight model (like for instance BADA, see [4]) is needed for the calculation of the dynamic parameters thrust, drag (resulting in force), instantaneous bank angle (resulting in a rate of turn), and local vertical wind gradient (influencing the vertical rate).

A detailed description of those technical specifications is beyond the scope of this article, see [4], [2] and [5] for more details on this topic. Here the focus is on how one can test that an implemented trajectory prediction fulfills its specifications.

Validation Design Conditions

For a validation of the trajectory prediction implementation, well defined test cases are needed that reflect the technical specifications implemented: For a trajectory prediction for which it is neither required to consider wind nor to control bank angles it does not make sense to compare it against a real aircraft trace like Mode-S, ADS-B, or FANAMOS where real atmospheric conditions and FMS control functions are implicitly contained.

In such a context, synthetic scenarios from Full Flight Simulations and other performance tools can be considered as input data for the validation. Within a Full Flight Simulation, the atmospheric conditions as well as the FMS control functions can be completely controlled and switched to standard values. Wind can be omitted or put to a constant strength. So, the flight can be performed according to the parameters the trajectory prediction is capable of taking into account.

Of course, it is an implicit operational requirement that the trajectory prediction considers all real influences and parameters and can incorporate them into the resulting 4D trajectory. The calculation of such a prediction is time consuming especially when wind and atmospheric conditions vary with time and area range. But the advantage of such a trajectory prediction is, that real traces from Mode-S, ADS-B, or FANAMOS can be used for an evaluation.

Another implicit operational requirement is the consideration of speed constraints and fixed rate of descent when a SID or STAR is flown after takeoff or before landing. In reality, those constraints are always in effect. But unfortunately, the operational conditions are not known in advance. Therefore, synthetic scenarios are suitable to test those constraints as well. In case the constraints are known for real Mode-S, ADS-B or FANAMOS traces, those traces are also suitable for an evaluation of a trajectory prediction with full blown technical specifications that cover all FMS controls, air traffic constraints and atmospheric conditions.

For the evaluations, the simulated 4D trace with certain parameters including the position, height, and time is taken. From that trace all the parameters needed for the trajectory prediction under test are retrieved and used. When the trajectory prediction has computed its trace, it is compared to the simulated trace and analyzed.

So, the simulated trace must contain all information needed for the retrieved parameters that are used by the trajectory prediction. For instance, in case the trajectory prediction is considering wind, the wind must be recorded in the simulated trace or equivalently the true airspeed vector together with the ground airspeed vector must be recorded.

Within a trace of a Full Flight Simulation almost every imaginable parameter can be recorded which makes this kind of trace specifically suitable for trajectory validations.

Validation Blueprint

Two conceptual approaches are considered as blueprints for validating trajectory prediction (TP) in air traffic management (ATM) systems or tools.

1. Validation via Full Flight Simulator (FFS) Runs

Without relying on additional technical tools, parameters of a series of qualified Full Flight Simulator runs can serve as input for TP validation. These runs must meet specific criteria to remain within an acceptable range of the BADA model for the corresponding aircraft type. If the output trajectory generated by the ATM system or tool aligns with the FFS profile, the TP can be considered successfully validated. To ensure robustness, the validation must cover various aircraft types and operational conditions.

2. Validation via an Offline TP Predictor

An alternative approach involves developing an offline TP predictor as a standalone reference tool. This predictor must first be validated under the same conditions using Full Flight Simulator data as described under 1. Once validated, it can serve as a benchmark for assessing other TP implementations.

For a meaningful comparison, both the TP under validation and the reference predictor must use identical input data and environmental settings. A close match between their outputs indicates a valid TP.

Since perfect alignment between trajectories is unlikely, any deviations must be evaluated from an operational perspective. The key question is whether the observed differences are acceptable within the operational context. Ideally, suitable performance requirements have been defined for the validation.

For proof of concept during the award-winning SESAR PJ18 (see [6]) and the still ongoing ATC-TBO validation activities we developed an offline usable trajectory prediction application in order to compare it to the implemented FDPS-TP. This application was enhanced considering all technical specifications for a realistic 4D trace except for a fixed rate of descent. A fixed rate of descent has not been implemented yet because of the handling of multiple constraints that are postponed for future enhancements. This offline usable trajectory prediction application was used in the validation blueprint described in this article, i.e. approach 1. was used in this investigation. The technical specifications include:

- Numerical integration of a dynamical state that contains latitude, longitude, air distance, ground distance, true airspeed, ground speed, true heading, true track, mass, fuel consumption, pressure height, geopotential height.
- Wind can be configured as horizontally constant wind layers with different vertical wind gradients.
- Atmospheric conditions like high or low pressure and high or low temperatures can be configured.
- Weather files in GRIB1 or GRIB2 format that can be used for arbitrary atmospheric conditions including horizontally changing winds, temperatures, and pressure.
- FMS control functions like constant CAS/Mach procedures are implemented and use speed schedules that can be configured by the user.
- Initial mass can be changed.
- BADA model parameters like thrust, drag, and bank angle are computed either by the BADA model (thrust, drag, energy share factor) or by maintaining a precomputed turn rate (control of the bank angle during turns).
- Published operational speed constraints are considered.

According to those requirements the Full Flight Simulator scenarios were flown with varying routes, initial gross weights, aircraft types, cost index, different speed or level constraints, fixed rate of descent, and horizontally and vertically varying winds.

Also, the Full Flight Simulator scenarios include segments with fixed rate of descent during approach. Due to the complexity of multiple constraints that are defined during approach, the scenario traces were cut at the last point of the continuous descent.

Limitation of the three degrees of freedom approach within the trajectory prediction

The FFS scenarios sometimes also include wind gusts that can produce discontinuities within the integration algorithm. Wind gusts are usually regulated by the physical properties of the aircraft, and their treatment cannot be implemented within a three degrees of freedom model (only position without attitude) by the trajectory prediction. Those wind gusts are in such cases the reason for some discrepancies between the simulated trace and the trajectory prediction trace even when all parameters for the trajectory prediction are correctly determined.

Limitation of the constant CAS/Mach algorithms within the trajectory prediction

The control algorithms used inside the trajectory prediction for maintaining the speeds are assuming a laterally constant atmosphere. Those algorithms and formulas are not strictly valid for a laterally changing atmosphere – for instance when a flight goes from high pressure to low pressure areas or from cold to warm areas.

Limitation of the Full Flight Simulator scenarios used

The scenarios used do not vary the temperature or the pressure of the atmosphere, instead a standard atmosphere is always assumed. Full Flight Simulations can vary those parameters as well. But for simplicity reasons and because the trajectory prediction application was already validated concerning the non-standard atmosphere conditions, it was decided to skip the variation of temperatures and pressure.

Also, the aircraft engine cannot be chosen separately. There are situations where the engine or thrust model within BADA differs from the simulated engine and thrust. These simulations can be identified only after the data evaluation and must be rejected.

Determination of Input Parameters

The determination of the input parameters for the trajectory prediction is done with standard machine learning (ML) algorithms like linear and non-linear regression, histograms and boosted forests.

The FFS scenario data of the trace involved consist of

- aircraft type
- date and time in seconds since midnight UTC
- latitude and longitude in degrees WGS84
- calibrated airspeed in knots
- total vertical aircraft rate in feet per second along the vertical pointing toward ground
- true heading in radians from true north
- gross weight in pounds (lb)
- true airspeed in Mach and in knots
- pressure altitude in feet
- track angle in degrees from true north
- wind speed in knots
- wind direction in degrees from true north

Standard atmosphere conditions are applied for the FFS scenarios.

From that data the following input data had to be retrieved for the trajectory prediction:

- start time of the flight (date and time) in UTC
- aircraft type
- initial gross weight in kg
- waypoints for the route including position (latitude and longitude), time over (in seconds since the start of the flight), and pressure level (in feet)
- speed schedule for the flight phases climb, cruise, and descent as CAS or Mach number.
- speed constraints – for instance: fly 250 knots or less when the level is below 10000 feet.
- generated GRIB files including the 3D wind.

Prior to the retrieval of the speed schedule the single flight phases and the phases of acceleration and deceleration had to be identified. Also, for the GRIB files -- containing a wind field covering the complete region -- a regression for the wind model based on the FFS scenario data had to be calculated beforehand.

For the detection of cruise, the absolute value of the vertical rate had to be under a threshold of +/-5 feet per second.

For the detection of acceleration and deceleration the derivatives of the CAS and Mach number were computed. In case the flight was below 20000 feet, and the acceleration or deceleration of the CAS was smaller than 0.1 knots per second the flight was marked as constant CAS. In case the flight had a high altitude (pressure altitude bigger than 20000 feet) and acceleration or deceleration of the Mach number was smaller than 0.0001 the flight was marked as constant Mach. In all other cases the flight was marked as accelerated. Figure 2 shows some resulting flight and speed phases.

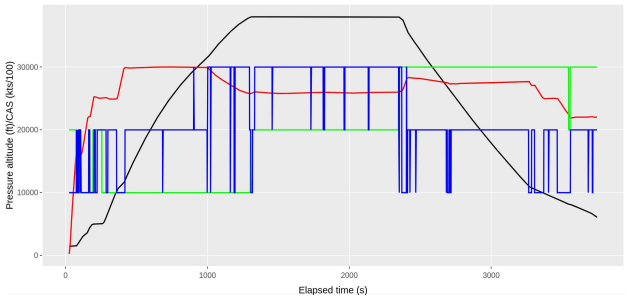

Figure 2: Determination of flight phases climb, cruise, descent in green, and speed phases accelerated, constant CAS/ Mach in blue. The pressure altitude is shown in black, and the scaled CAS is shown in red.

For all the flight phases cruise, climb and descent, a decision model based on boosted forests was trained (using the RStudio package “gbm”) for detection of the control CAS and Mach number used (see figure 3, figure 4, and figure 5). Those models were classified in histogram bags for the CAS and the Mach regression separately. The bags’ size for the CAS was 10 knots and for the Mach number it was 0.01. The bag containing the maximum number of values was then used to fill in the speed schedule for the corresponding phase. The other bags containing enough values (more than 10 values) were used for filling in the speed constraints.

For the determination of the waypoints the derivative of the track angle was computed to get the turn rate in degrees per second. Then the parts of the trace were determined where the absolute value of the turn rate was above a certain dynamically adjusted threshold and from that, begin, middle and end of turns were determined. The threshold was set dynamically to 1.5%, or up to 10% of the maximum turn rate (as it was encountered in the analyzed trace)

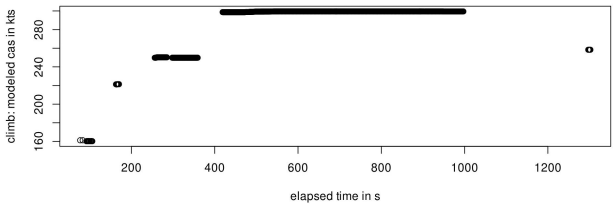

Figure 3: Model for the climb CAS in knots over time (seconds since start of flight) determined for the speed schedule and the speed constraints.

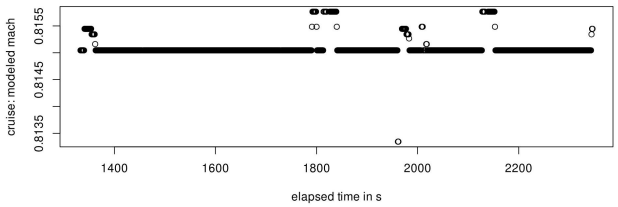

Figure 4: Model for the cruise Mach number over time (in seconds since start of flight) determined for the speed schedule.

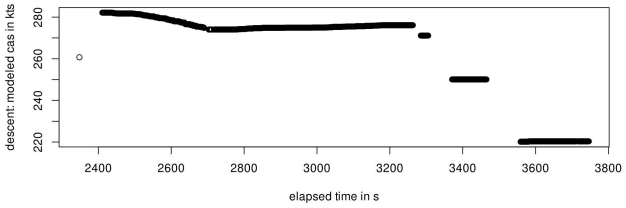

Figure 5: Model for the descent CAS in knots over time (seconds since start of flight) determined for the speed schedule and the speed constraints.

but was also restricted to 0.1 degree per second. From the begin, middle and end of turns and the beginning and ending of the trace the route segments were geometrically computed and the resulting waypoints retrieved. The begin and end of the cruise segments were added to the route as well, see figure 6 for an example.

For the wind models it is known that the wind model inside the Full Flight Simulators is linear (in absence of wind gusts). Therefore, a lower, middle, and higher wind model is calculated with a linear regression (RStudio package “lm”). The limit between the lower and the middle model was 10000 feet; between the middle and upper model it was at 36000 feet.

Figure 7 shows such an inferred linear wind model. Because some scenarios contained wind gusts also a non-linear decision model based on boosted forests (RStudio package “gbm”) was trained.

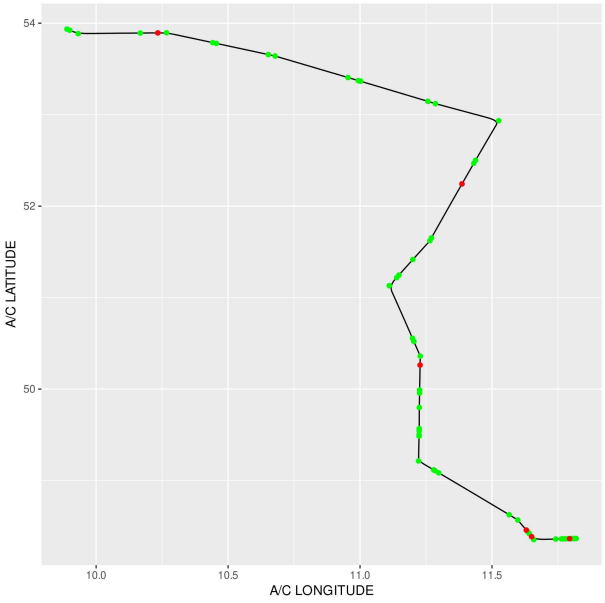

Figure 6: Determination of waypoints (green) and start and end of level segments (red).

This non-linear model is continuous – so the residuals at wind gusts become large. The model with the least mean residual was then selected for the generation of the GRIB-files.

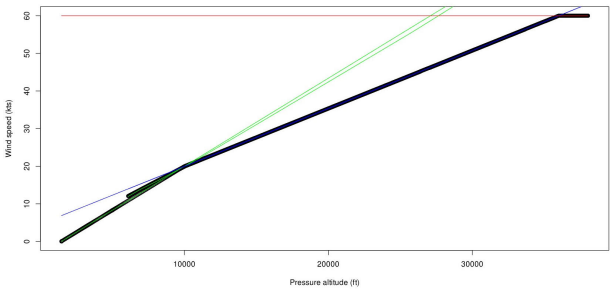

Figure 7: Inferred wind speed model for GRIB, the lower wind layer is shown in green, the middle in blue and the higher layer is shown in red.

Generation of Predicted Traces

The generation of the predicted trajectories from the determined parameters is straight forward after all needed input data has been generated. The generation of the configuration file in JavaScript Object Notation format (JSON) was straight forward. The generation of the GRIB-files can be off-putting, and a specific effort was needed for this. It was implemented in Java with an equidistant latitude-longitude grid where the v- and w-coordinates of the wind were recorded per pressure level and time.

For these coordinates all the GRIB templates had to be filled with correct values including bitmaps and scanning mode (see [7]).

Comparison of Simulated and Predicted Traces

With the generated configuration and GRIB-files the trajectory prediction could produce traces that could be compared to the simulated traces the input parameters were retrieved from.

Methods and First Results

In total, twelve full Flight Simulations have been used for the validation blueprint. The aircraft types involved were:

- A320 (2x)
- A319 (2x)
- A346 (1x)
- A330 (4x)
- B748 (1x)
- E190 (1x)
- A359 (1x)

The flights took routes between the departure airport Munich (EDDM) to the arrival airport Hamburg (EDDH). One A330 flight was from Zurich (LSZH) to Frankfurt (EDDF). The initial total gross weights were modified and may differ from the weights used in day-to-day operations by a noticeable amount.

From the route the parts of the non-continuous descent were removed. Then the predicted trace was compared to the simulated track according to the following criteria:

- time difference at the last top of climb
- time difference at the first top of descent
- difference in distance at the last top of climb
- difference in distance at the first top of descent
- difference in total time of the flight
- time lag of the maximum cross-correlation between the simulated and predicted trace
- presence of wind (yes or no)
- the mean difference in wind velocity
- presence of wind gusts (yes or no)
- the mean difference in total thrust
- the mean difference in fuel consumption

Table 1: List of Full Flight Scenarios used.

Scenario No.	Aircraft Type	Initial Gross Weight (kg)	Departure Airport - Arrival Airport	Wind present	Wind Gusts present	Total Flown Distance (km)
1	A319	57500	EDDM - EDDH	Yes	yes	593
2	A319	57037	EDDM - EDDH	Yes	yes	592
3	A346	255000	EDDM - EDDH	Yes	yes	592
4	A330	180000	LSZH - EDDF	No	no	247
5	A330	180000	EDDM - EDDH	Yes	yes	597
6	A330	180000	EDDM - EDDH	Yes	no	592
7	A330	180000	EDDM - EDDH	Yes	no	589
8	B748	314000	EDDM - EDDH	No	no	592
9	E190	45000	EDDM - EDDH	No	no	500
10	A359	206000	EDDM - EDDH	Yes	no	592
11	A320	66880	EDDM - EDDH	Yes	no	589
12	A320	66780	EDDM - EDDH	Yes	no	589

Results and Conclusion

The results are summarized in tables 1 and 2. The differences of the predicted values to the simulated values are given (negative differences refer to predicted less than simulated and positive differences refer to predicted greater than the simulated values).

The predicted speeds and vertical rates match well, also the time and distance at the top of climb, and the top of descent. The total time differences are small. In cases where there are larger differences (see test case 10) these could be explained by a mismatch in the thrust settings during some part of the Full Flight Simulation. So, the BADA model (here 3.15. is used) for thrust has certain limitations and in those cases where the BADA model differs too much from the Full Flight Simulation engine model the scenario could not be used for the validation.

As a conclusion, the approach for trajectory prediction validation based on Full Flight Simulation runs has been successfully demonstrated and validated. All the required steps for data extraction and preparation from the FFS runs could be implemented and led to a meaningful construction of trajectories by the developed TP application.

This trajectory prediction is an offline tool that can calculate individualn results. The differences of the prediction relative to the simulation are shown. 4D traces based on the BADA model. It includes a wind model calculation. Overall, it can predict trajectories considering different state-of-the-art weather forecast model results. Furthermore, new requirements to enhance the TP by additional parameters or algorithms can be considered here as well. It may be regarded as a prototype to support a TP validation concept for the future according to the 2. approach of a TP validation process: the direct benchmarking and comparison to any other TP application.

This work is particularly important, since validated trajectory prediction applications will be needed for many ATFM and ATC operational applications, especially for the enhancement of operational conflict detection and resolution as stated in [1] and [2].

Future Prospects

Continuous climb and descent operations matched well in the validation here. But most of the descent operations are not continuous and therefore have to be implemented additionally inside an operational trajectory prediction. This should be a straightforward task to do because a trajectory can be predicted with known speed and vertical rate (that is restricted during a fixed rate of descent) where a model of the dynamical control parameters is not needed (see [5] for details).

It is also possible to add to the list of determined parameters the initial gross weight like it was described in [8]. This gives the possibility of analyzing traces where no direct mass information is available.

Table 2: List of trajectory prediction evaluation results. The differences of the prediction relative to the simulation are shown.

Scenario No.	Time Delta at TOC (s)	Time Delta at TOD (s)	Distance Delta at TOC (m)	Distance Delta at TOD (m)	Total Time Difference (s)	Time Shift of max. Cross-Correlation (s)	Mean Difference in Wind (kts)	Rel. Mean Difference in Thrust (%)	Rel. Mean Difference in Fuel Cons. (%)
1	-49	28	-4350	-293	-21	0	8	14	-4
2	-6	12	741	4204	-18	0	11	17	-3
3	-48	50	10718	14738	7	0	6	21	-4
4	55	2	19677	6075	-52	0	n/a	19	-5
5	77	22	23438	9172	-7	0	3	17	-6
6	38	42	16861	16278	-12	0	3	16	-6
7	39	51	12145	10464	-6	0	0.4	15	-5
8	-135	77	-23607	25572	-39	0	n/a	31	-3
9	-101	20	13073	9933	-56	0	n/a	-2	-20
10	-307	-30	-71716	5175	-68	0	3	29	0.2
11	-23	17	-1449	7132	-9	0	2	23	-3
12	45	22	14502	9493	-15	0	<1	19	-4

Abbreviations

ADS-B	Automatic Dependent Surveillance Broadcast
ATC-TBO	Air Traffic Control, Trajectory Based Operations
BADA	Base of Aircraft Data
CAS	Calibrated Air Speed
FANAMOS	Flight Track and Aircraft Noise Monitoring System
FDPS	Flight Data Processing System
FFS	Full Flight Simulator
FMS	Flight Management System
GRIB	Gridded Binary
JSON	JavaScript Object Notation
LAT	Lufthansa Aviation Training
ML	Machine Learning
MTCD	Medium Term Conflict Detection
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PJ18	Project 18
QAR	Quick Access Recording
SESAR	Single European Sky ATM Research
TBO	Trajectory Based Operations
TP	Trajectory Prediction
UTC	Coordinated Universal Time
WGS84	World Geodetic System 84

References

[1] Raquel Gallego, Angel Olbés, Thomas Pütz, Thomas, Damm, Ana Beroiz, Christopher Adams, Noud de Lang, Tomas, Zmuda, Federico Ferrari, Mohammed Zakariyya, Preetam S. Heerarum: Technical Validation Report of PJ18 4DTM, 2020.

[2] EUROCONTROL, PANSA, DFS, INDRA, SKYGUIDE, BULATSA, AIRBUS, INTEGRA, DEEPBLUE, EGIS GROUP: SESAR Solution 53B VALR for V3, for PJ18W2–4DSkyways, 2023.

[3] The R Project for Statistical Computing, https://www.r-project.org/ (retrieved 2025/24/06).

[4] The BADA Project Team at EUROCONTROL: Concept Document for the Base of Aircraft Data Family 4, 2012.

[5] A. Nuic: User Manual for the Base of Aircraft Data Revision 3.13, EUROCONTROL, 2015.

[6] ISOBAR and 4DSkyways projects win at the Digital European Sky Awards, https://www.eurocontrol.int/news/isobar-and-4dskyways-projects-win-digital-european-sky-awards (retrieved 2025/24/06).

[7] NCEP GRIB2 Documentation, https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/docs/grib2/grib2_doc/ (retrieved 2024/23/10).

[8] Matthias Poppe, Thomas Pütz, Andrea Bach, Longbiao Ma, Wei-Yu Jiang, Yang Zhang, Yun-Gang Tian, Ying-Chao Xiao: Mass Estimation of Climbing Aircraft, in: Innovation im Fokus, Volume 1, 2022.

Drohnenbasiertes Messsystem zur Analyse von HF-Signalen an Instrumentenlandesystemen (ILS)

Uwe Buchheim

Nav-Drohnen – cleared for ILS

Die Einsatzmöglichkeiten von Drohnen wachsen rasant – auch dort, wo höchste Präzision und Sicherheit zählen. Inzwischen nutzt die DFS Deutsche Flugsicherung Drohnen gezielt für HF-Messungen an terrestrischen Navigationsanlagen, insbesondere am Instrumentenlandesystem (ILS). Doch die eigentliche Innovation liegt nicht in der Drohne selbst. Entscheidend ist die Kombination aus einer hochpräzisen Drohnenplattform, moderner HF-Messtechnik, zentimetergenauer Positionsbestimmung und einer eigens entwickelten Echtzeit-Auswertesoftware. Damit können Messungen durchgeführt werden, die bisher nur mit spezialisierten Messflugzeugen oder aufwendigen bodengestützten Verfahren möglich waren. Für die DFS eröffnet dies die Perspektive, die Qualität von Messungen weiter zu steigern, Inbetriebnahmen neuer ILS-Anlagen zu beschleunigen und den Aufwand bei ausgewählten Vermessungsaufgaben deutlich zu reduzieren. Die Entwicklung hat dabei die reine Konzeptphase bereits verlassen: Erste Validierungen wurden erfolgreich durchgeführt und die Einführung drohnengestützter Messverfahren wird innerhalb der DFS bereits vorbereitet.

Das Produktmanagement ILS wird vom Team TO/NT (Terrestrische Navigationsdienste) verantwortet. Dort kümmert man sich momentan um die Einführung einer ILS-Messdrohne in den Navigationsteams der TO-Niederlassungen Nord, Ost, Süd, West und Mitte. Hier verfolgt die DFS das Ziel, die durch das Projekt „Navaid-Drohne“ eingeführte drohnengestützte Bodenmessung am ILS-Gleitweg zukünftig im Eigenbetrieb durch das ILS-Systemmanagement durchzuführen und im nächsten Schritt auf Localiser-Messungen auszuweiten. Perspektivisch sollen auch Messaufgaben der heutigen Flugvermessung teilweise in Form sogenannter „Mini-Approaches“ mit Drohnen abgebildet werden.

Zugleich wird vom Produktmanagement (PdM) aus marktverfügbaren Hardwarekomponenten ein drohnenbasiertes Messsystem speziell für Aufgaben des Produktmanagements, beispielsweise bei der Inbetriebnahme von ILS oder bei komplexen Entstörungen, entwickelt. Ein Schlüsselbaustein der sog. ILS-PdM-Drohne (siehe Abbildung 1) ist eine eigens programmierte Software, welche die ILS-Messdaten in Echtzeit verarbeitet und übersichtlich darstellt.



Abbildung 1: DJI Matrice 350 RTK mit EVSD1000 Messempfänger.

Mit ihren Drohnenaktivitäten ist die DFS nicht allein: Die im Nachbarland Schweiz tätige Skyguide ist den oben beschriebenen Weg bereits gegangen und erzielt damit sowohl aus technischer als auch wirtschaftlicher Sicht sehr gute Ergebnisse. Empfehlungen zum Einsatz von Drohnen in der Flugvermessung sind Gegenstand von Diskussionen im Navigation Systems Panel der ICAO und haben bereits Niederschlag gefunden im ICAO Doc 8071 Volume I.

Warum ILS-HF-Signale so anspruchsvoll sind

Bei Inbetriebnahme und Instandhaltung eines ILS ist die korrekte Generierung und Kontrolle der HF-Wellenformen eine der größten Herausforderungen. Die Navigationsinformation wird per Radiowellen übertragen – entscheidend ist dabei

nicht nur, dass das Signal das Flugzeug erreicht, sondern in welcher räumlichen Ausprägung es ankommt. Um diese Signalform zuverlässig zu beurteilen, sind viele kleinteilige Messungen an unterschiedlichen Positionen im Abstrahlbereich der Antennen erforderlich.

Der Messraum ist groß: Er reicht von wenigen hundert Metern bis zur Reichweitengrenze des ILS – 25 NM beim Landekurssender (Loc) und typischerweise 10 NM beim Gleitwegsender (GP) (in Einzelfällen bis 15 NM). Einige Prüfpunkte lassen sich nur aus der Luft erfassen. Diese Aufgaben übernimmt regelmäßig das DFS-Tochterunternehmen Flight Calibration Services (FCS) aus Braunschweig: Jedes ILS wird alle sechs Monate umfassend per Flugvermessung überprüft.

Wo Drohnenmessungen konkret helfen können

Aus heutiger Sicht ergeben sich drei besonders relevante Einsatzfelder für drohnenbasierte ILS-Messungen:

1. **Bodenkontrollmessungen** zur Überwachung und Wartung bestehender ILS-Anlagen
2. **Ersteinstellung und Kalibrierung** bei (Ersatz-)Neubauten
3. **Teilweiser Ersatz** bestimmter Messprofile der Flugvermessung, die bisher typischerweise mit Messflugzeugen geflogen werden

Im Folgenden wird deutlich, warum sich gerade in diesen Bereichen Effizienz- und Qualitätsgewinne ergeben – ohne die etablierten Verfahren vorschnell zu ersetzen.

Bodenkontrollmessungen: Mehr Reichweite, weniger Aufwand

Bei bestehenden ILS-Anlagen sind regelmäßig Kontrollmessungen erforderlich (beispielsweise monatlich). Bisher finden diese überwiegend am Boden statt, wobei sich der Aufwand je nach ILS-Komponente stark unterscheidet.

Landekurs: Messfahrzeug – aber mit Grenzen

Beim Landekurs kommen spezielle Messfahrzeuge (siehe unten Abbildung 6) zum Einsatz. Sie fahren entlang der Runway-Centerline und prüfen mit Dachantennen die Lage und Stabilität der ILS-Signale. Zusätzlich werden häufig Kreismessungen auf einem Segment in etwa 200 m Entfernung zur Landekurs-Antenne durchgeführt – allerdings nur, wenn dort überhaupt ein Fahrweg vorhanden ist.

Hier eröffnet die Drohne gleich zwei Vorteile:

- **Infrastruktur optimieren:** Wenn auf den baulichen Fahrweg am Kreissegment verzichtet werden kann, sind laut interner Betrachtung **Einsparungen bis zu 300.000 Euro pro ILS** möglich.
- **Messpunkte flexibler gestalten:** Kreismessungen im Fernfeld in **Entfernungen > 200 m** oder an anderen Positionen im Abstrahlbereich sind möglich, ohne dass ein Fahrzeug dorthin gelangen muss.

Gleitweg: Hubmast war gut – Drohne ist besser

Beim Gleitweg ist die klassische Fahrzeugmessung nur eingeschränkt möglich, da das Nutzsignal ab der Antenne in einem Winkel von etwa 3° nach oben abstrahlt. In der Vergangenheit wurden deshalb Pneumatik-/Hubmasten auf Anhängern genutzt, die auf der Landeschwelle positioniert werden und Messhöhen bis ungefähr 22 m erreichen. Das ist hilfreich zur Erkennung technischer Probleme – aber analytisch bleibt vieles offen.

Zwei Nachteile sind besonders relevant:

- **Organisation & Betrieb:** Einen Anhänger in den Sicherheitsbereich und auf die Start- und Landebahn zu bringen, verursacht hohe Abstimmungs- und Freigabeaufwände.
- **Messphysik (Nahfeld):** In Antennennähe sind HF-Wellen oft noch nicht vollständig ausgebildet. Verlässliche Messbedingungen entstehen typischerweise erst im **Fernfeld**, das sich grob ab einer Entfernung von etwa **100× Wellenlänge** stabilisiert. Beim Gleitweg liegt man damit im Bereich um **~100 m**, während klassische Hubmastanhänger oft noch relativ nah an der Antenne operieren (ca. **200–300 m**) – also in einem grenzwertigen Übergang.

Die Drohne verschiebt den Messpunkt gezielt in einen besseren Bereich: Sie wird möglichst bei ca. 1.000 m vor der Landeschwelle eingesetzt. Das bedeutet robuste Fernfeldbedingungen und stabilere Werte – gleichzeitig aber auch größere Messhöhen (über 100 m), die praktisch nur mit Drohnen erreichbar sind. Und: Liegt der Messbereich außer-

halb des Flughafengeländes, erübrigt sich der Kontrollzugang zum Flughafen. Übrig bleibt im Wesentlichen die abgestimmte Koordination des Drohnenaufstiegs mit dem Flugbetriebsdienst.

Ersatzneubau: Drohnen als Beschleuniger in der Inbetriebnahme

Besonders groß ist das Potenzial bei (Ersatz-)Neubauten. Die Inbetriebnahme neuer ILS-Anlagen ist deutlich anspruchsvoller als die Überwachung bestehender Systeme: Während im Betrieb meist der Ist-Zustand geprüft wird, steht beim Neubau zu Beginn oft ein „weißes Blatt". Selbst wenn Antennenstände an identischer Position wieder aufgebaut werden, verhält sich das neue Signal in der Praxis nie exakt wie das alte – eine typische, oft frustrierende Besonderheit hochfrequenter Systeme.

Genau hier setzt die entwickelte „ILS-Produktmanagement-Drohne" an: Je präziser sich eine Anlage im Vorfeld mit geeigneten Messungen einstellen lässt, desto weniger Iterationen sind später bei der Erstflugvermessung mit dem Messflugzeug erforderlich. Mit punktuellen Bodenmessungen „von Hand" wird häufig nur indirekt auf die relevanten Parameter geschlossen. Eine Drohne kann dagegen Anflugprofile eines Messflugzeugs annähernd nachbilden und die entscheidenden Größen direkt messen.

Ein zusätzlicher Vorteil: Drohnen können ortsfest in der Luft stehen. Diese Fähigkeit ermöglicht Analysen – etwa das gezielte „Einfrieren" eines Messpunkts –, die mit Flugzeug- oder Fahrzeugmessungen so nicht erreichbar sind. Im Ergebnis lassen sich Flugstunden mit dem Messflugzeug bei der Erstinbetriebnahme reduzieren.

Flugvermessungen: Was Drohnen langfristig ersetzen könnten – und was nicht

Die regelmäßige Flugvermessung bleibt ein zentraler Baustein: Alle sechs Monate wird jedes ILS in der Luft überprüft, eine solche Vermessung besteht typischerweise aus rund 20 Messprofilen und dauert bis zu 4 Stunden. Üblicherweise erfolgt das mit Flugzeugen des Typs King Air B350 (siehe Abbildung 2). Studien deuten darauf hin, dass mittelfristig bis zu 80 % dieser Messprofile durch Drohnenmessungen ersetzbar sein könnten – zumindest perspektivisch. Da Drohnen in der Regel in Sichtweite des Piloten betrieben werden, sind dafür jedoch verkürzte Messstrecken erforderlich. Ein Ansatz sind sogenannte „Mini-Approaches" im Bereich des Middle Markers, also etwa 1.000 m vor der Schwelle.



Abbildung 2: FCS Messflugzeug (King Air B350).

Gleichzeitig gilt: Bis Drohnen Flugvermessungen vollständig ersetzen, ist es ein weiter Weg. Das ILS unterliegt außergewöhnlich hohen Anforderungen an Genauigkeit, Integrität und Zuverlässigkeit. Wer eine Landung unter CAT-III-Bedingungen erlebt hat, weiß, warum. Drohnen sind deshalb derzeit vor allem Ergänzung und Effizienzhebel – nicht der vollständige Ersatz.

Das Drohnenmesssystem: Hardware, Datenfluss und Echtzeit-Auswertung

Das System der ILS-PdM-Drohne basiert auf einer **DJI Matrice 350 RTK** als Trägerplattform. Als Messempfänger kommt ein **Rohde & Schwarz R&S® EVSD1000 VHF/UHF Nav/Drone Analyser** zum Einsatz.

Ein zentrales Element ist die im Rahmen einer Bachelorarbeit [1] entwickelte Auswertesoftware: Tobias Hebgen programmierte eine Anwendung, die die per Funk übertragenen Rohdaten des Messempfängers in Echtzeit (10 Hz) verarbeitet und sowohl grafisch als auch alphanumerisch auf einer PC-Oberfläche darstellt (siehe Abbildung 3). Die Oberfläche ist auf die schnelle Analyse von Landekurs- und Gleitwegsignalen optimiert. Parallel werden die Daten aufgezeichnet, sodass sich Messflüge später jederzeit erneut visualisieren und auswerten lassen.

Zentimetergenaue Position: Warum DGPS und Koordinatentransformation entscheidend sind

Damit nach einer Messung die charakteristischen ILS-Kenngrößen wie Gleitwinkel, Kurslage (Centerline Angle) und Breite (Sector Width) berechnet werden können, muss die Position der Drohne relativ zu den ILS-Antennen sehr genau bekannt sein – im Zentimeterbereich.

Dafür nutzt das System Differential-GPS, das eine Synchronisierung von Positions- und ILS-Messdaten in Echtzeit ermöglicht. Die geodätischen Koordinaten

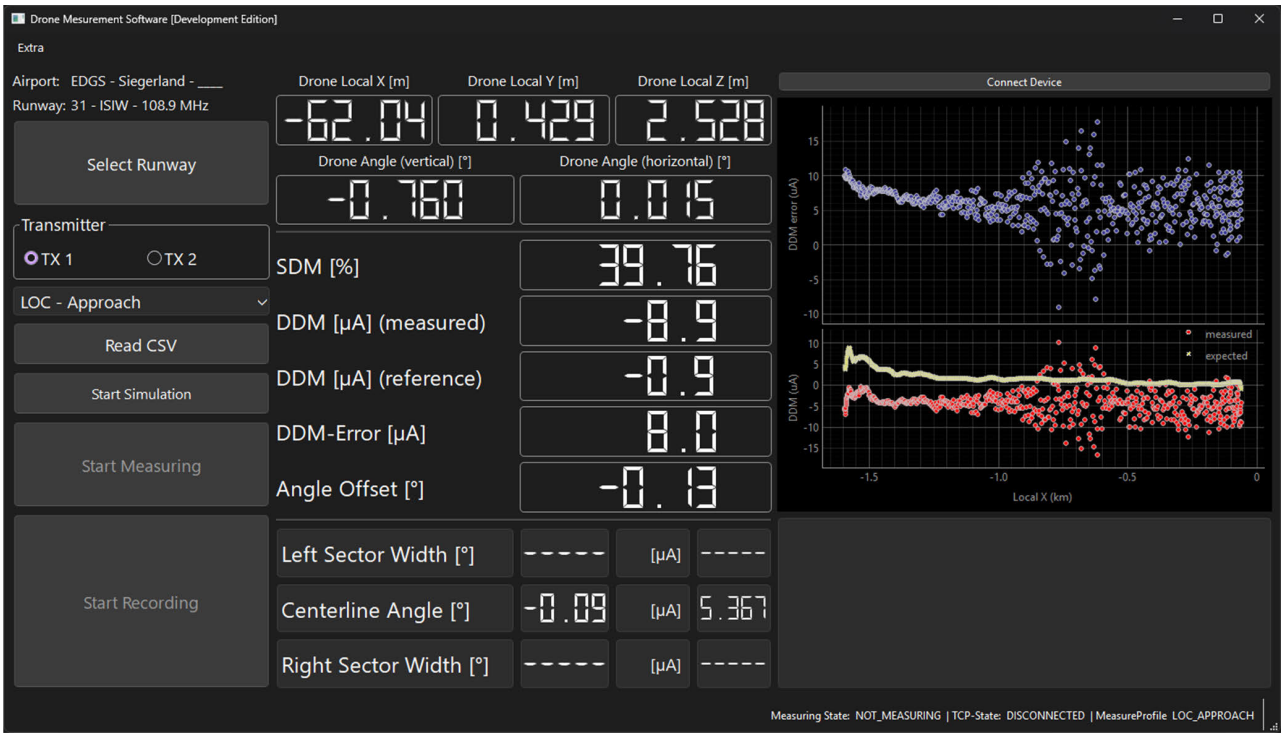

Abbildung 3: Hauptfenster der Software.

aus WGS84 werden zunächst in das geozentrische ECEF-System (Earth-Centered, Earth-Fixed) transformiert und anschließend in ein lokales kartesisches Koordinatensystem überführt, dessen Ursprung an der Schwelle liegt. Aus diesen Daten werden die entscheidenden horizontalen und vertikalen Winkel Alpha (siehe Abbildung 4) berechnet, aus denen sich die ILS-Kenngrößen ableiten lassen.

Softwareentwicklung: Iterativ, nutzerzentriert und gut wartbar

Die Software entstand iterativ im Sinne agiler Entwicklung: Regelmäßige Abstimmungen sorgten dafür, dass früh eine lauffähige Anwendung verfügbar war und flexibel an Anforderungen (siehe Abbildung 5) angepasst werden konnte. Ziel war eine funktional vollständige und zugleich nutzerfreundliche Oberfläche – bei gleichzeitig klarer Code-Struktur, damit spätere Weiterentwicklungen auch durch andere Personen als den Autor möglich sind. Implementiert wurde die Anwendung in Python unter Verwendung von Qt mit der Python-Bindung PySide. Der Ansatz priorisiert eine schnelle Entwicklung gegenüber einer potenziell leistungsfähigeren, aber aufwendigeren Umsetzung in C++. Für die grafische Darstellung kamen Qt-Widgets und zusätzliche Bibliotheken (z.B. zur Graphenanzeige) zum Einsatz.

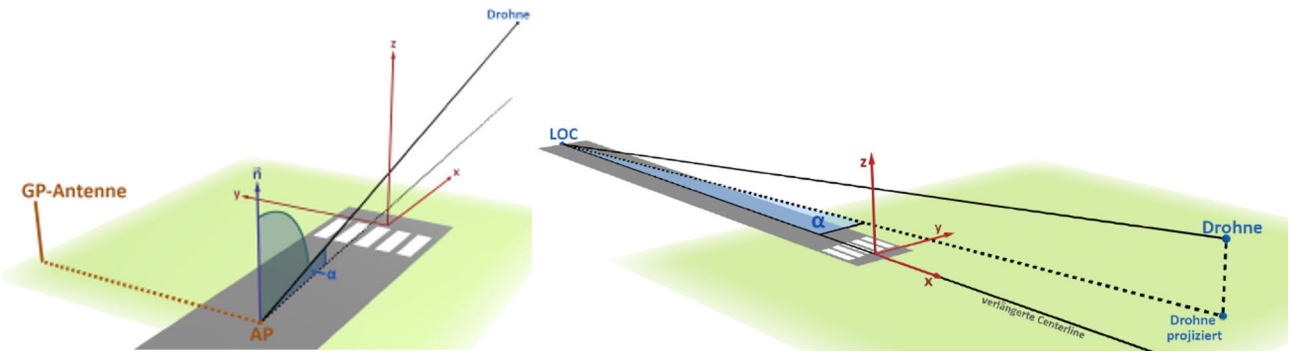

Abbildung 4: Vertikaler und horizontaler Winkel Alpha.

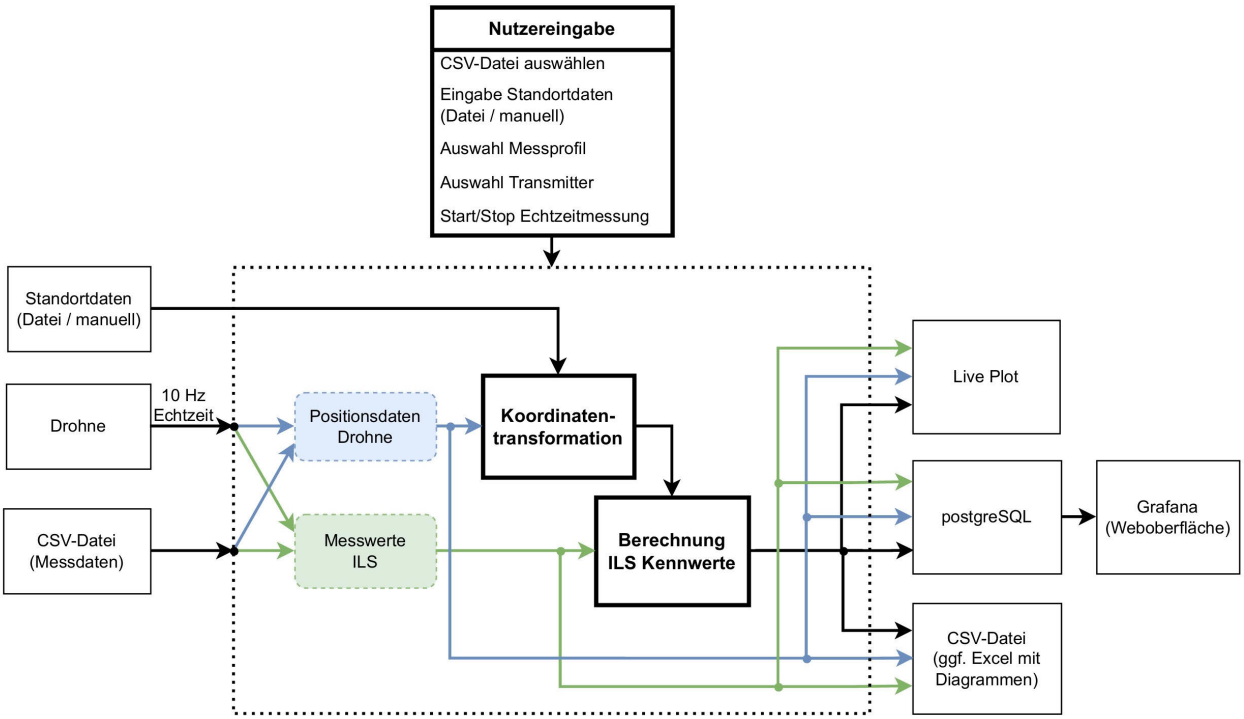

Abbildung 5: Grundgerüst Softwarefunktionalität.

Erprobung: Praxisnahe Tests trotz Genehmigungshürden

Ein vollständiger Test unter realen Einsatzbedingungen – also Drohnenflug mit Messempfänger in direkter Flughafennähe – erfordert aufgrund der europäischen Drohnenverordnung eine Betriebsgenehmigung in der sogenannten „Speziellen Kategorie“. Die Betriebsgenehmigung wird in Deutschland durch die zuständige Landesluftfahrtbehörde ausgestellt. Innerhalb des zeitlichen Rahmens der Arbeit war eine echte Drohnenmessung daher aufgrund des hohen organisatorischen Koordinationsaufwands nicht umsetzbar.

Um dennoch praxisnah zu validieren, wurden Messfahrten mit einem Messbus der DFS (siehe Abbildudung 6) an einem Regionalflughafen mit bestehendem ILS durchgeführt (Flughafen Siegerland).

Der Landekurs wurde dabei mit zehn Bahnfahrten entlang der Centerline sowie zehn Kreisfahrten vermessen. Zusätzlich wurden absichtlich Fahrten seitlich versetzt und in schlangenförmigen Kurven (siehe Abbildung 7) über die Bahnbreite durchgeführt, um zwei Punkte zu prüfen:

- Liefert das System bei unterschiedlicher Fahrzeugposition reproduzierbare Ergebnisse?
- Ist die Synchronisation zwischen GPS und Messdaten korrekt, oder besteht ein zeitlicher Versatz (GPS-Delay)?

Die Messkette umfasste dabei auch die Zufuhr von DGPS-Korrekturen (u.a. über eine Internetverbindung für Korrekturdaten SAPOS) sowie die WLAN-Kommunikation zwischen Laptop und EVSD-Data-Link-Modul.

Auswertung: Plausible Ergebnisse und gute Reproduzierbarkeit

Die Auswertung zeigte, dass die Messungen bei unterschiedlicher Mess-Position in erster Näherung identische Resultate liefern – zufällige, durch das Messsystem verursachte Fehler in relevanter Größenordnung traten nicht auf. Kleinere Schwankungen (typisch im Bereich −10 µA bis +15 µA) ließen sich plausibel durch Reflexionen und Umgebungsbedingungen erklären.

Abbildung 8 zeigt den gemessenen DDM-Fehler des Landekurs in Abhängigkeit der lokalen x-Koordinate des Messgeräts im relevanten Bereich. Hierbei sind in der unteren Abbildung die Ergebnisse aller zehn Bahnfahrten visualisiert, während in der oberen nur die sieben Fahrten möglichst exakt entlang der Centerline dargestellt sind



Abbildung 6: Versuchsaufbau.



Abbildung 7: Bahnfahrten in schlangenförmigen Kurven.

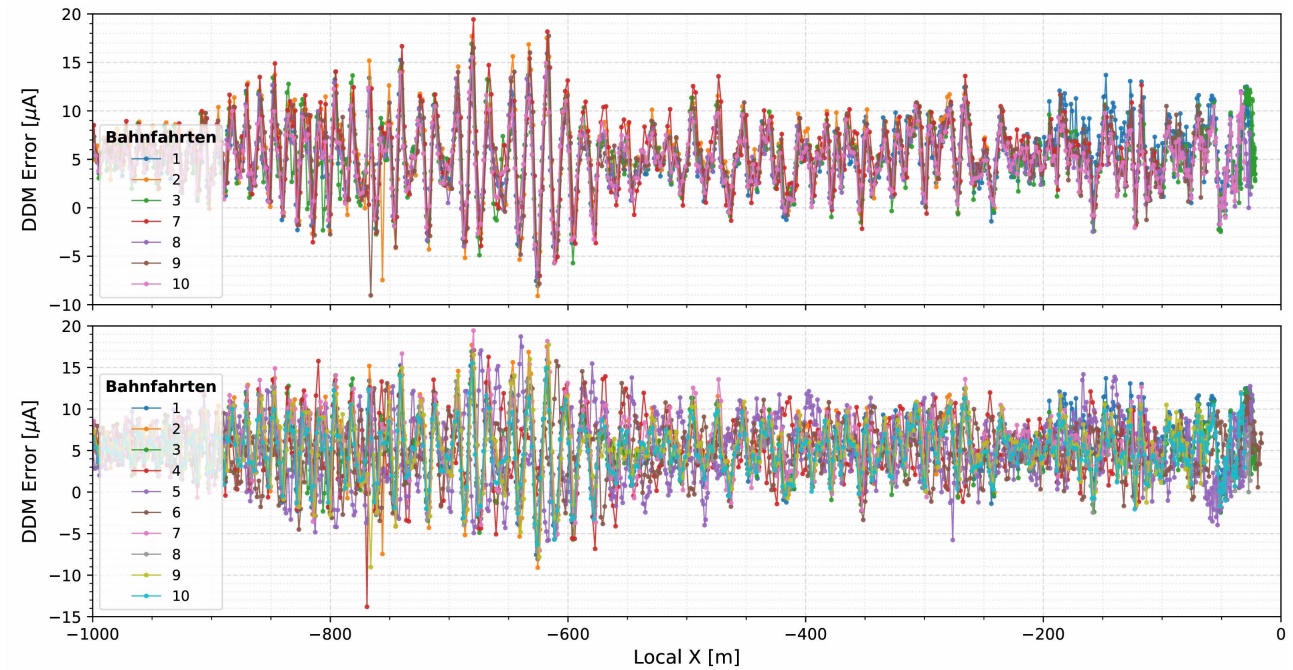

Abbildung 8: Gemessene DDM-Fehler Bahnfahrten.

Auch die „Kurvenfahrten“ und die seitlich versetzte Fahrt lagen im gleichen Wertebereich wie die Centerline-Fahrten. Das stützt die Annahme, dass die Messdaten konsistent sind und die Positionsdaten korrekt zugeordnet werden. Zusätzlich lagen Vergleichswerte aus der letzten Flugvermessung in einer ähnlichen Größenordnung – trotz eingeschränkter direkter Vergleichbarkeit aufgrund unterschiedlicher Messbereiche.

Die von der Software berechneten Mittelwerte des DDM-Fehlers sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Standardabweichung aller 10 Messungen beträgt hier nur 0,3 µA, was ein hervorragender Wert ist.

Tabelle 1: Mittlerer Fehler der Bahnfahrten.

Messung	Mittlerer Fehler [µA]
1	5,456
2	5,553
3	5,110
4	5,169
5	5,944
6	4,978
7	5,658
8	4,995
9	5,367
10	4,949
Mittelwert	5,3179
s	0,3343

Tabelle 2: Mittlerer Fehler der Viertelsektorbreiten.

Messung	Viertelsektorbreite [µA]
11	76,41
12	75,47
13	77,15
14	74,41
15	76,12
16	74,36
17	76,50
18	75,42
19	78,40
20	75,09
Mittelwert	75,94
s	1,24

Für die Kreisfahrten wurden außerdem die Viertelsektorbreiten (Tabelle 2) ermittelt, mit einem Mittelwert von x = 75,94 µA und einer daraus resultierenden Standardabweichung von s = 1,24 µA. Die Messwerte der letzten Flugvermessung ergaben einen mittleren DDM-Fehler von 75,1 µA für die Viertelsektorbreite und liegen damit ebenfalls in der gleichen Größenordnung. Als Konsequenz aus der Erprobung ergaben sich bereits Erweiterungsideen für die Software, etwa eine Statusanzeige, die die aktuelle GPS-Genauigkeit für die Messung transparent macht.

Fazit und Ausblick

Mit dem Projekt ist ein wichtiger Schritt gelungen: Eine Software wurde entwickelt, die drohnengestützte Vermessungen am ILS in Kombination mit dem R&S® EVSD1000 Empfänger ermöglicht. Die Architektur trennt Benutzeroberfläche und Programmlogik klar voneinander, der modulare Aufbau erleichtert Anpassungen und zukünftige Erweiterungen. Damit bleibt die Lösung langfristig anschlussfähig an den weiter zunehmenden Drohneneinsatz für die Vermessung flugsicherungstechnischer Anlagen.

Die erste Validierung über Messfahrten am Landekurs zeigte überzeugende Ergebnisse. Gleichzeitig eignet sich die Software prinzipiell als Basis, um künftig auch andere Anlagen – beispielsweise DVORs – einzubinden, sofern UI und Auswertefunktionen entsprechend erweitert werden.

Vor dem Routineeinsatz stehen jedoch klare Schritte: Zunächst ist gemäß europäischer Drohnenverordnung eine Betriebsgenehmigung für die ILS-PDM-Drohne in der „Speziellen Kategorie“ erforderlich. Danach müssen Vergleichsmessungen an allen ca. 50 ILS-Systemen mit den heute standardisierten Verfahren (Messbus-Bodenmessung und Flugvermessung) folgen, um eine belastbare Korrelation und damit die notwendige Vertrauenstiefe in die Messergebnisse sicherzustellen.

Abkürzungsverzeichnis

CAT III	Instrumentenlandekategorie III (Präzisionsanflugverfahren)
DFS	Deutsche Flugsicherung
DGPS	Differential Global Positioning System
DDM	Difference in Depth of Modulation
DJI	Herstellername der Drohnenplattform
DVOR	Doppler VHF Omnidirectional Radio Range
ECEF	Earth-Centered, Earth-Fixed
EVSD1000	Rohde & Schwarz EVSD1000 Nav/Drone Analyser
FCS	Flight Calibration Services
GP	Glide Path / Gleitweg
GPS	Global Positioning System
HF	Hochfrequenz
Hz	Hertz
ICAO	International Civil Aviation Organization
ILS	Instrument Landing System (Instrumentenlandesystem)
Loc	Localizer (Landekurssender)
LuFo	Luftfahrtforschungsprogramm
NM	Nautische Meile(n)
PdM	Produktmanagement
PySide	Python-Bindung für Qt
Qt	Software-Framework Qt
R&S	Rohde & Schwarz
RTK	Real-Time Kinematic
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
TO	Technical Operations (DFS-Bereich)
TO/NT	Technical Operations / Terrestrische Navigationsdienste
UHF	Ultra High Frequency
UI	User Interface
µA	Mikroampere
VHF	Very High Frequency
WLAN	Wireless Local Area Network
WGS84	World Geodetic System 1984

Referenzen

[1] Hebgen, T. (2026). *Entwicklung und Erprobung einer echtzeitfähigen Messdatenverarbeitung zur drohnengestützten Vermessung des Instrumentenlandesystems*. Bachelorarbeit. Hochschule Darmstadt – University of Applied Sciences, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik.

Studentische Abschlussarbeiten

DFS Dual Studierende & in DFS Fachbereichen betreute Studierende

Die im Folgenden nach Autoren in alphabetischer Reihenfolge gelisteten studentischen Abschlussarbeiten sind in der Zusammenarbeit der DFS mit Hochschulen und Universitäten entstanden und wurden seit der letzten Ausgabe abgeschlossen. Einige der Arbeiten enthalten einen Sperrvermerk, sodass eine Veröffentlichung der gesamten Arbeit nicht möglich ist. Die akademischen Ansprechpartner wurden daher, soweit bekannt, ergänzt. Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit!

Integration automatisierter Black-Box-HMI-Tests am Flugsicherungssystem PHOENIX

Yannis Ahlbach

Bachlorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Informationstechnik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 20.03.2025, Prof. Dr. Reiner Wichert

Die sichere Koordination des Luftverkehrs an Deutschlands internationalen Flughäfen erfordert präzise und verlässliche Systeme. Für die sichere und flüssige Abwicklung des Flugverkehrs sorgen dabei die Fluglotsen der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS). PHOENIX, ein Radardatenverarbeitungssystem der DFS, ist dabei ein zentrales Instrument für die Fluglotsen, um den Überblick über die Luftverkehrslage zu behalten. Für den sicheren Einsatz von PHOENIX an allen internationalen deutschen Flughäfen muss die Software vor jeder neuen Softwareversion umfassend auf Fehler und Zuverlässigkeit geprüft werden. Während die Automatisierung dieser Softwaretests für interne Komponenten bereits erfolgreich automatisiert werden konnte, gestaltet sich das automatisierte Testen der grafischen Oberfläche erheblich schwieriger. Diese Arbeit untersucht daher, ob und wie HMI Tests für das System PHOENIX zeit- und kosteneffizient automatisiert werden können. Dazu wird in dieser Arbeit zunächst analysiert, welche aktuellen Herausforderungen beim automatischen Testen des Graphical User Interface (GUI) sowohl bei PHOENIX als auch bei Produkten anderer Unternehmen existieren. Darauf aufbauend wird ein Konzept für die HMI Testautomatisierung bei PHOENIX entwickelt und prototypisch umgesetzt. Dabei wird der Fokus auf die Probleme im Verlauf der praktischen Umsetzung gelegt. In einer Validierungsstudie testeten Experten des Produktmanagements den Ansatz, um dessen Effizienz bewerten zu können. Die Arbeit zeigt dabei vor allem auf, dass es aktuell keine kostengünstige und gleichzeitig effiziente Möglichkeit gibt, die einen Mehrwert durch die Automatisierung generiert. Abschließend beleuchtet die Arbeit, die Gründe des Scheiterns des gewählten Ansatzes und liefert dabei wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Entwicklungen. Trotz der identifizierten Limitationen zeigt die Arbeit, dass gezielte Anpassungen und technologische Weiterentwicklungen langfristig das Potenzial bieten, die Automatisierung von HMI-Tests wirtschaftlicher und effizienter zu gestalten.

Konzept zur Implementierung von Flugvermessungsergebnissen in einem digitalen Zwilling für IFR-Flugverfahren

Avin Ahmad

Bachelorarbeit, TU Darmstadt, Fachbereich: Medizintechnik, Abgabedatum: 04.05.2026, Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Holger Maune, Korreferent: Robin Neuder

Die vorliegende Bachelorarbeit entwickelt ein Konzept zur Integration von Flugvermessungsergebnissen in einen digitalen Zwilling für IFR-Flugverfahren. Ausgangspunkt ist eine strukturelle Einschränkung des CNS-Anlagenarchivs der DFS: Sämtliche Flugvermessungsberichte sind dort zwar revisionssicher abgelegt, können jedoch nicht analytisch genutzt werden, da das Archiv weder eine systematische Auswertung noch einen Vergleich über mehrere Prüfzyklen hinweg unterstützt. Dies gilt unabhängig davon, ob die Berichte als PDF oder als XML vorliegen. Zur Lösung dieser Herausforderung wird eine automatisierte Datenpipeline auf Basis der Medallion-Architektur innerhalb der Microsoft-Fabric-Plattform konzipiert und prototypisch umgesetzt. Der Prototyp konzentriert sich auf die jährlichen Datenbank-Check-Berichte der FCS, deren Inhalte auto-

matisiert extrahiert, normalisiert und mittels einer transparenten, regelbasierten Logik validiert werden. Die Ergebnisse werden in einem interaktiven Power-BI-Dashboard als digitaler Schatten visualisiert, wodurch der Prüfstatus der IFR-Verfahrenslandschaft erstmals in einer maschinenlesbaren und auditierungsfähigen Form verfügbar ist. Ergänzend wurden das Datenmodell und die Schnittstellenanforderungen für alle drei relevanten Berichtstypen des Flugvermessungsmanagements in enger Zusammenarbeit mit einem Kollegen der DFS erarbeitet, was die konzeptionelle Grundlage für eine vollständige Integration in nachfolgenden Entwicklungsphasen bildet. Die Arbeit bietet ein modulares Architekturmodell, das die strukturelle Basis für eine zukünftige Erweiterung zum bidirektionalen digitalen Zwilling legt und auf vergleichbare Qualitätssicherungsprozesse in anderen regulierten Domänen übertragbar ist.

Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur Abschätzung von Kapazitätseinbußen durch die Umfliegung potenziell persistenter Kondensstreifengebiete im oberen Luftraum – Eine Analyse am Beispiel Karlsruhe

Moritz Baral

Masterarbeit, Hochschule Worms, Fachbereich Touristik / Verkehrswesen, Abgabedatum: 14.07.2026, Prof. Dr. Frank Fichert

Ziel dieser Arbeit ist die Quantifizierung der Kapazitätsauswirkung, die durch eine taktische Umfliegung von PPC-Gebieten zu erwarten ist. Bei diesem Verfahren zur Vermeidung des Durchflugs von Gebieten, in denen potenziell persistente Kondensstreifen entstehen können, werden wirksame Maßnahmen zur Verringerung der Klimawirkung erwartet. Dies kann jedoch die Sektorkapazität in der Flugsicherung beeinträchtigen. Auf der Basis der durchgeführten Realzeitsimulation zur taktischen Vermeidung von PPC-Gebieten wird ein Bewertungsmodell entwickelt, in dem der Zeitwert „PPC Suche und Lösung“ als zentraler Parameter verwendet wird. Dieser Parameter wurde als Erweiterung des bestehenden Arbeitslastmodell zur Bewertung der Kapazitätswerten von Sektoren ausgelegt. Mit dieser Methodik lässt sich die Kapazitätsreduktion transparent und nachvollziehbar für unterschiedliche PPC-Ausprägungen und Sektorstrukturen berechnen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich der neue Zeitwert ohne strukturelle Änderungen in das etablierte Arbeitslastmodell der DFS integrieren ließ und eine belastbare Quantifizierung der Kapazitätsauswirkungen ermöglicht. Für das untersuchte Szenario ergibt sich eine Kapazitätsreduktion von 35,4 %, die im Vergleich mit den Ergebnissen der Realzeitsimulation als plausibel eingestuft wird.

Konzeption und Evaluation einer RAG-Anwendung zur Unterstützung der DFS-Cloud Dokumentation

Julian Benner

Bachlorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Informationstechnik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 20.03.2026, Prof. Dr. Gunter Grieser, Prof. Dr. Bernhard G. Humm

Die zunehmende Komplexität moderner IT-Infrastrukturen und deren verteilte Dokumentation stellen hohe Anforderungen an die effiziente Informationsbeschaffung. Frameworks wie Documentation as Code bringen zwar erhebliche Vorteile für die Versionskontrolle und Automatisierung mit sich, bergen jedoch auch Hürden für die zentrale Durchsuchbarkeit und Auffindbarkeit von Informationen. Im Kontext der DFS-Cloud führt die Verteilung von Wissen über eine Vielzahl verteilter Quellen hinweg vermehrt zu Zugänglichkeitshürden und Effizienzverlusten. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, untersucht die vorliegende Arbeit die Konzeption und Evaluation eines zentralen, KI-gestützten Chatbots auf Basis einer RAG-Architektur. Methodisch umfasst die Arbeit die Analyse aktueller Forschungsansätze, die Definition spezifischer Anforderungen für den Einsatz im KRITIS-Umfeld sowie die Entwicklung und prototypische Umsetzung eines entsprechenden Systemdesigns. Die empirische Evaluation belegt, dass die Kombination aus präzisem Chunking, hybriden Retrival-Verfahren und einer zweischrittigen Antwort- sowie Quellverweisgenerierung akkurate und verifizierbare Ergebnisse liefert. Damit zeigt das System das Potenzial, bestehende Informationsbarrieren nachhaltig abzubauen und die Effizienz im Betrieb sowie in der Entwicklung der DFS-Cloud zu steigern. Abschließend werden Handlungsempfehlungen für die weitere Verbesserung sowie die Überführung in den produktiven Betrieb unter Berücksichtigung regulatorischer Rahmenbedingungen wie dem EU AI Act gegeben.

Analyse von CRISP-DM für ML gestützte ATFM-Delay-Prognosen

Marius Damm

Bachlorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Informationstechnik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 24.03.2026, Prof. Dr. Kai Renz

Diese Bachelorarbeit untersucht die Eignung des Cross Industry Standard Process for Data Mining für die Entwicklung von Prognosemodellen im Bereich der Flugsicherung. Im Fokus steht die Fragestellung, inwieweit dieses generische Vorgehensmodell eine strukturierte und prototypische Entwicklung von Machine Learning-gestützten Prognosen für Air Traffic Flow Management-Delays unterstützt. Die Analyse zeigt, dass CRISP-DM durch seine klare Prozessstruktur und die Fail-Fast-Eigenschaft überzeugt, wodurch Dateninkonsistenzen, wie durch die Systemumstellungen am Standort München ausgelöst, frühzeitig identifiziert werden können. Gleichzeitig offenbart die Anwendung deutliche Schwächen für iterative „Proof of Concept"-Projekte: Ein hoher dokumentarischer Overhead führt zu mangelnder Effizienz. Die starre Prozessstruktur behindert die Agilität und erschwert Reaktionen auf neue Erkenntnisse während der Entwicklung. Fehlende explizite Abbruchkriterien und mangelhafte Anleitungen für den negativen Abschluss von Phasen schränken die Flexibilität ein. Als Ergebnis der Arbeit wird festgestellt, dass CRISP-DM zwar einen soliden Rahmen bietet, für die prototypische Entwicklung jedoch durch agilere Ansätze ergänzt werden sollte. Die Arbeit schlägt hierfür die Lean Design Thinking Methodology als passenderes Alternativmodell für explorative Projekte vor.

Reinforcement Learning als Lösungsansatz für die Automatisierung von Aufgaben der Adjacent Position in Flugsicherungs-Realzeitsimulationen

Dominik Dietz

Bachlorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Informationstechnik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 20.03.2025, Prof. Dr. Reiner Wichert

Die vorliegende Arbeit untersucht den Einsatz von Reinforcement Learning (RL) zur Automatisierung von Aufgaben der Adjacent Position in Flugsicherungssimulationen. Konkret geht es um die Steuerungsprobleme Vectoring und Deconflicting. Ziel ist es, mit möglichst wenig Anweisungen auf möglichst kurzem Weg ein vorgegebenes Ziel zu erreichen, ohne dabei vorgegebene Sektorgrenzen zu verlassen und eine Staffelungsunterschreitung zu vermeiden. Die Vorgabe möglichst sparsamer Anweisungen ist eine interessante Einschränkung im Kontext allgemeiner Steuerungsprobleme. Der Anwendungskontext in der Ausbildung von Fluglotsen ist ein Alleinstellungsmerkmal im Kontext verwandter Arbeiten zu Machine Learning in Problemstellungen der Flugverkehrskontrolle. Grundlage dieser Arbeit ist eine umfangreiche Umfeld- und Nutzenanalyse. In einem Konzept wird der Workflow der Adjacent Position erarbeitet und diesem ein Technologiestack zu dessen Automatisierung entgegengestellt. Daraus wird das Problem Vectoring und Deconflicting als Problemstellung dieser Arbeit konzipiert. Zur Lösung dieser Problemstellung wird ein Deep Q-Network (DQN)-Ansatz mit Experience Replay und Epsilon-Greedy Erkundungsstrategie verwendet. Zu dessen Training wird eine eigene Simulation als RL-Environment entwickelt, in derer der Agent das Steuern in der Ebene analog zu einem Verkehrsszenario im oberen Luftraum erlernen kann. Aus dem Kontext der Arbeit ergibt sich die Notwendigkeit, die Simulation und den Agent in Java zu entwickeln. Zur Umsetzung von Reinforcement Learning in Java wird die Deeplearning4j (dl4j) Library verwendet. Der Lösungsansatz wird in zwei Stufen umgesetzt. Dafür wird zunächst ein Vectoring Agent als Grundlage entwickelt, der anschließend zu einem Deconflicting Agent weiterentwickelt wird. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Konzipierung der Reward Funktion, die das Lernen des RL-Agents leitet. Zur Bewertung des Agents werden Metriken aus dem Anwendungskontext abgeleitet. Mit diesem Ansatz wird ein RL-Deconflicting-Agent erzielt, der in einem statischen Environment mit durchschnittlich 3,61 Anweisungen/Episode und einer durchschnittlichen Abweichung von 4,87% vom kürzesten Weg zu 100% das vorgegebene Ziel erreicht und dabei erfolgreich ein Hindernis umsteuert.

Implementation einer Multilateration im VHF-Sprachfunk mittels Software-Defined-Radio

Justin Drabow

Bachlorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 27.03.2026, Prof. Dr. Herbert Krauß, Prof. Dr. Ingo Gaspard

Diese Thesis befasst sich mit der Implementierung einer Multilateration zur Lokalisierung von funkenden Luftfahrzeugen im Very-High-Frequency (VHF)-Sprachfunk mithilfe eines Netzwerks aus Software-Defined Radio (SDR). Das Ziel ist es, Funksprüche

automatisch räumlich zuzuordnen, Fluglotsen bei der Identifikation von Luftfahrzeugen zu unterstützen und damit perspektivisch Kapazitätssteigerungen zu ermöglichen. Hierfür wird zunächst eine technische Grundlage geschaffen, die es erlaubt, Sprachsignale aus mehreren VHF-Kanälen mit hoher Abtastrate zu empfangen, zu filtern und weiterzuverarbeiten. Da bestehende Empfangssysteme der Deutschen Flugsicherung keine geeigneten Rohdaten für eine Multilateration bereitstellen, wird ein Empfangs- und Verarbeitungssystem entwickelt. Dieses basiert auf einer SDR-Hardware und einer dafür entworfenen Field-Programmable Gate Array (FPGA)-Konfiguration zur Echtzeit-Signalverarbeitung. Die Verarbeitung umfasst insbesondere die Kanaltrennung, die Frequenzverschiebung ins Basisband, die Filterung sowie die zeitgenaue Erfassung der Signale. Eine präzise Synchronisation der Empfangsstandorte ist dabei entscheidend, da die Positionsbestimmung auf dem Time Differantial Of Arrival (TDOA)-Verfahren basiert. Durch Kreuzkorrelation der empfangenen Signale werden Zeitdifferenzen bestimmt, aus denen anschließend die Position des Senders berechnet werden kann. Die entwickelte Architektur kombiniert eine FPGA-basierte Vorverarbeitung im Zeitmultiplex mit konstanter Phasenlaufzeit und eine nachgelagerte Central Processing Unit (CPU)-Paketverarbeitung und ermöglicht dadurch die Generierung geeigneter Datensätze zur Durchführung der Multilateration. Erste Tests zeigen die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Systems sowie seine grundsätzliche Eignung zur Positionsbestimmung von Flugzeugen. Die Arbeit legt damit die Grundlage für eine zukünftige Integration in operative Systeme der Flugsicherung. Perspektivisch können darauf aufbauend Decision-Support Systeme entstehen, die die kognitive Belastung von Fluglotsen reduzieren und sowohl Effizienz als auch Sicherheit im Luftverkehr erhöhen. Zusätzlich erlaubt die Generierung geeigneter Datensätze aus einem Sensornetzwerk weitere Entwicklungen, die die Sicherheit und Zukunftsfähigkeit der Flugsicherung weiter steigern können. Diese Thesis ist in Zusammenarbeit mit der Deutschen Flugsicherung in Karlsruhe entstanden und basiert auf einer vorausgegangenen Machbarkeitsstudie, die die Realisierbarkeit sowie die Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Multilateration in Simulationen untersucht und dokumentiert hat.

Störfestigkeit von GNSS in der zivilen Luftfahrt: Messbasierter Vergleich von GPS und Galileo

Aaron Lutz Förster

Bachlorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 23.01.2026, Prof. Dr.-Ing. Michael Kuhn, Prof. Dr. Ingo Gaspard

Zunehmende Störsender im deutschen Luftraum und die kommende Einbindung Galileos in die zivile Luftfahrtnavigation stellen die DFS vor neue Herausforderungen. Um auch in der Zukunft einen reibungslosen Ablauf im Luftraum zu garantieren ist es entscheidend diesen Änderungen nachzugehen, sie zu untersuchen und zu verstehen. In dieser Arbeit wird auf der Basis eines Messaufbaus untersucht, wie sich verschiedene Störsignale auf den Empfang des Galileo-E1-OS- und des GPS-C/A-Signals auswirken. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf dem Robustheitsvergleich der beiden Systeme. Für den Empfang wurde ein GPS-fähiger, lizenzierter Luftempfänger, sowie ein nachgestellter Galileo- und GPS-fähiger Empfänger verwendet. Bewertet werden C/N0-Verhältnisse sowie Tracking- bzw. Akquisitionsverluste. In der Auswertung stellt sich heraus, dass die Ergebnisse von der spektralen Leistungsdichte der Nutz- und Störsignale sowie der Parametrierung der Trackingschleifen im Empfänger abhängen. Grundsätzlich zeigt Galileo für schmalbandige Störer höhere C/N0-Verhältnisse und geringere Trackingverluste als GPS. Demnach kann die Einführung von Galileo in die zivile Luftfahrt gerade unter diesen Messszenarien vorteilhaft sein.

Entwicklung und Erprobung einer echtzeitfähigen Messdatenverarbeitung zur drohnengestützten Vermessung des Instrumentenlandesystems

Tobias Hebgen

Bachelorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Abgabedatum: 28.01.2026, Prof. Dr. Antje Wirth, Prof. Dr. Ingo Gaspard

Für nähere Informationen zur Bachelorthesis, lesen sie den entsprechenden Artikel in dieser Heftausgabe, bzw. wenden Sie sich bitte direkt an den DFS-Betreuer Herrn Uwe Buchheim.

Simulation eines Multilaterationsverfahrens zur Ortung funkender Luftfahrzeuge

Charlotte Henning

Bachlorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 28.03.2025, Prof. Dr.-Ing. Michael Kuhn, Prof. Dr.-Ing. Shun-Ping Chen

Die vorliegende Arbeit untersucht ein Konzept zur Ortung funkender Luftfahrzeuge. Ziel des im Konzept vorgeschlagenen Systems ist die Anzeige des aktuell funkenden Flugzeugs auf dem Bildschirm des Lotsen, um dessen Arbeit zu erleichtern und Fehler zu verhindern. Das Ziel dieser Arbeit ist die Beurteilung des Konzepts auf Umsetzbarkeit. Dafür wurde ein Modell des Systems entwickelt und anschließend ein Simulationsprogramm erstellt, das die Verhaltensweisen einer Multilateration von Flugfunk-Signalen abbildet. Anhand dieses Simulationsprogramms wurden das System und dessen Umgang mit Störfaktoren untersucht, um die Umsetzbarkeit zu beurteilen und erste Aussagen zur erreichbaren Genauigkeit der Ortung zu machen. Die Simulation zeigt vielversprechende Ergebnisse bei einer Ortung in der horizontalen Ebene. Hier ist in der Simulation eine Genauigkeit von unter 3 km, oft sogar unterhalb von 1 km erreichbar. Die vertikale Positionsabweichung der Ortung des Flugzeugs ist meist wesentlich höher. Die Genauigkeit der Ortung ist vor allem auf die Signaleigenschaften, wie Bandbreite und Störabstand des Flugfunk-Signals zurückzuführen. Das System ist nach der entworfenen Simulation umsetzbar, ob die Positionsgenauigkeit erreichbar ist, die für eine Verwendung in der Flugsicherung notwendig ist, muss in umfangreichen Tests der realen Empfänger festgestellt werden.

Konzeption und Analyse von Datenintegrations- und Visualisierungsansätzen zur Auswertung von flugsicherungstechnischen Anlagendaten mit weiteren Datenquellen

Moritz Hildebrand

Masterarbeit, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich: Computational Engineering, Abgabedatum: 31.03.2025

Für nähere Informationen zur Masterthesis, wenden Sie sich bitte direkt an den DFS-Betreuer Herrn Felix Braun.

Konzeptionierung eines Clients für LIZ-Phoenix

Louis Höhnlein

Bachlorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 21.03.2025, Prof. Dr.-Ing. Shun-Ping Chen, Prof. Dr.-Ing. Michael Kuhn

m Lage- und Informationszentrum (LIZ) der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS) wird das System LIZ-Phoenix betrieben, mit dem, vor allem zu Statistik- und Analysezwecken des Flugverkehrs über Deutschland, Positions- und Flugplandaten verarbeitet werden. Aus diesem Datenvorrat wird mit einem zu konzipierenden Client die Live-Darstellung von aktuellen Flügen und damit zusammenhängenden Daten erarbeitet. Auf diesem Weg begegnet man dem Bedarf verschiedener Abteilungen in der DFS nach einer solchen informativen Anzeige. Durch die Erhebung von Anforderungen unterschiedlicher Nutzerprofile konnten wichtige Funktionen zur Implementierung des Clients identifiziert werden. Aus dieser Entwicklungsphase sowie einer Analyse der informationstechnischen Sicherheit von Client und Daten ergab sich der Aufbau zweier Prototypen. Zum einen konnte ein Entwurf aus mehreren Hardwarekomponenten und der Flugsicherungssoftware Phoenix begleitet werden, zum anderen wurde eine Web-basierte Variante entwickelt. Für den Web-Prototypen werden daher die genutzten Software-Bibliotheken und Applikationen vorgestellt und der Programmcode erläutert. Ferner erfolgte eine Betrachtung von Maßnahmen und Ansätzen zur Inbetriebhaltung des konzipierten Systems und des Deployments. Im Vordergrund steht dabei die Verfügbarkeit des Systems durch ein Management von Fehlern, Konfigurationen und Performance. Daran anknüpfend wurde ein möglicher Life Cycle für diesen LIZ-Phoenix-Client entworfen. Die abschließenden Empfehlungen können dazu dienen, den Client weiteren Interessenten anzubieten und sich dabei an konkreten Schritten zur Entwicklung und Umsetzung zu orientieren.

Optimierung eines Algorithmus zur Detektion von Außenlandungen bei bemannten Drehflüglern anhand ihrer Flugtrajektorien

Christina Hofmann

Bachlorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Informationstechnik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 20.03.2026, Prof. Dr. Mathias Schnee

Drohnen spielen in zivilen und militärischen Kontexten eine zentrale Rolle, wobei die sichere Landung, insbesondere bei hochpreisigen Modellen oder kritischen Missionen, ebenso erwünscht ist. Da Personen die Drohnen fliegen, in der von der “Droniq” entwickelten Luftlagedarstellung “TraX”, nur fliegende Drehflügler sehen können, sorgen gelandete Drehflügler für eine Gefahrensituation. Befinden sich diese nicht auf einer ausgeschriebenen Stelle für Landungen, kann eine Person die eine Drohne fliegt nicht hervorsehen wann und wo ein Drehflügler starten könnte. Dies führt zu Kollisionen. Durch eine Erkennung dieser Landungen sollen derartige Kolli-

sionen vermieden werden. Der erste Prototyp bestand bereits vorher und hatte eine Genauigkeit von 76% [Sch25]. Da diese Werte nicht ausschlaggebend genug für eine Live-Implementierung sind, wurde der Algorithmus um Mustererkennung, Change-Point-Analysis und einer Einbeziehung von weiteren Metadaten erweitert. Außerdem wurde die Auswirkung der verschiedenen Parameter nach Relevanz gewichtet. Zuerst werden allgemeine Grundlagen, sowie die betrachteten Algorithmen beschrieben welche zur Auswahl standen und die Entscheidung begründen. Daraufhin wird die Kategorisierung der neuen Daten, sowie die Umsetzung sowie Anpassung des Algorithmus beschrieben. Mit dem neuen Algorithmus wurde bei den alten Daten eine Genauigkeit von 82% erreicht. Somit liegt eine durchaus umfassendere Datengrundlage, sowie eine eindeutige Verbesserung des Algorithmus vor. Durch die Anpassung von der Genauigkeit können entsprechende Ziele bei der Betrachtung verändert werden.

Kommunikation in der Krise – Muster der Krisenkommunikation am Fall des Flugunglücks von Überlingen

Anna-Amalia Jung

Bachelorarbeit, Universität Mannheim, Fachbereich: Germanikstik: Sprache, Literatur, Medien, Abgabedatum: 02.07.2026, Prof. Dr. Marie-Luis Merten

Abstract zur Bachelorarbeit Kommunikation in der Krise. Muster der Krisenkommunikation am Fall des Flugunglücks von Überlingen. Im Falle einer Krise stellt sich die Unternehmenskommunikation als besonders wichtiges Organ zur Bewältigung derselben heraus. Allgemein gilt, dass sich Sprachnutzer bei der Durchführung kommunikativer Aufgaben bekannter und bewährter Muster bedienen – bewusst oder unbewusst. Anhand von text(sorten)linguistischen Ansätzen können derartige Muster in Texterzeugnissen ermittelt und folgerichtig gesellschaftliche und soziale Strukturen aufgezeigt werden. Als Untersuchungsgegenstand dienen hier kurze Notizen (Presseanfragen) sowie Texte, die als Anschreiben konzipiert sind, wobei alle Dokumente den Daten entstammen, die im Rahmen der kommunikativen Bewältigung des Flugunglücks von Überlingen erhoben wurden. Hinsichtlich der Notizen lassen sich drei Zeitebenen unterscheiden. Jede Zeitebene offenbart Musterhaftigkeiten, die dazu beitragen, die Textsorte zu konstituieren und zu definieren. Die Notizen erweisen sich dabei als Schnittstelle zwischen kommunizierenden Akteuren einer DFS-internen Abteilung, kommunizierenden Akteuren mehrerer DFS-internen Abteilungen und einem anfragenden Medienhaus. Die Anschreiben fallen ihrerseits vor allem durch Musterhaftigkeiten an der optisch zu erfassenden Textoberfläche – nämlich ihrer wiederkehrenden Bestandteile – auf. Neben wiederkehrenden thematischen Problemstellungen können Textelemente wie Anrede und Grußformel dabei unteranderem Aufschluss über interpersonale Beziehungen der kommunizierenden Akteure geben. Insgesamt zeigt sich, dass in bestimmten kommunikativen Situationen auf musterhafte Strukturen zurückgegriffen wird, wobei die Einhaltung prototypischer Textmuster unter anderem von der Vertrautheit der Kommunikationspartner und der situativen Einbettung des Kommunikationsvorgangs abhängt.

Konzeption und Validierung einer Testmethodik für Flugsicherungssoftware unter den Vorgaben des SESAR Masterplans 2025 am Beispiel des Arrivalmangers AMAN DCS

Lea Kirchhoff

Bachlorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Informatik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 25.03.2026, Prof. Dr. Klaus Kasper

Im Zuge des SESAR-Masterplans wird der Arrival Manager (AMAN) von einer monolithischen zu einer serviceorientierten Architektur transformiert. Die bisherige End-to-End-Teststrategie ist jedoch nur eingeschränkt auf Microservice-Strukturen übertragbar und entspricht nicht der zukünftigen Level-2-Nachweislogik. Daraus ergibt sich die Forschungsfrage, wie der AMAN während der Transition zuverlässig getestet werden kann, ohne bestehende Test- und Anforderungsstrukturen vollständig neu aufzubauen. Die zugrunde liegende Hypothese dieser Arbeit lautet, dass aufgezeichnete Vergleichsdaten aus bestehenden End-to-End-Tests genutzt werden können, um daraus servicebasierte Tests abzuleiten und so eine temporäre Testlücke während der Migration zu schließen. Hierzu wird der Datenverkehr an zukünftigen Serviceschnittstellen aufgezeichnet und als Referenz zur funktionalen Validierung des cloudbasierten Berechnungsservices verwendet. Die experimentelle Evaluation zeigt, dass sich strukturierte Input-/Output Vergleiche technisch umsetzen lassen und geeignete Metriken zur Bewertung funktionaler Gleichheit definiert werden können. Experteninterviews bestätigen die Praxistauglichkeit des Ansatzes insbesondere in frühen Migrationsphasen. Gleichzeitig wurden Grenzen identifiziert, insbesondere bei funktionalen Erweiterungen und bei zukünftigen Schnittstellenänderungen. Insgesamt belegt die Arbeit, dass der entwickelte Ansatz eine tragfähige, zeitlich begrenzte Übergangslösung zur Absicherung serviceorientierter Architekturen im sicherheitskritischen Umfeld darstellt.

Einsatz von Künstlicher Intelligenz im Qualitätsmanagement/Projekt iCAS der Deutschen Flugsicherung GmbH

Paula Kuhnert

Masterarbeit, Hochschule Darmstadt, Fachbereich: Wirtschaftsingenieurwesen, Schwerpunkt: Maschinenbau, Abgabedatum: 05.05.2025, Referent: Prof. Dr. M. Moneke, Korreferent: Prof. Dr. W. Stork

Für nähere Informationen zur Masterthesis, wenden Sie sich bitte direkt an den DFS-Betreuer Herrn Farshid Arshadi.

Auswahl und Bewertung von Security-by-Design zur Erfüllung von Sicherheitsstandards (ISO 27001, BSI-Grundschutz, etc.) in der Entwicklung von service-orientierten Systemen

Anne Lukas

Masterarbeit, Hochschule RheinMain, Fachbereich: Electrical Engineering, Abgabedatum: 14.04.2025, Referent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Winter, Korreferent: Dr.-Ing. Sascha Müller

Die Masterarbeit beschäftigt sich mit der Identifikation von für die DFS relevanten Security-by-Design-Ansätzen, um diese als Standard in service-orientierten Architekturen der aktuellen Softwareentwicklung etablieren zu können. Dabei konzentriert sie sich insbesondere auf solche Ansätze, die zur Erfüllung einschlägiger Security-Standards wie ISO 27001 und dem BSI-Grundschutz hilfreich sind.

Erprobung und Nachbildung eines Distance Measuring Equipments (DME) auf Basis akustischer Signale in Python für Ausbildungszwecke

Marcel Maier

Bachlorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 24.03.2025, Prof. Dr.-Ing. Antje Wirth, Prof. Dr. Jakob Belschner

Seitens der Flugsicherungsakademie der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS) besteht seit längerer Zeit der Wunsch, neue und interaktive Schulungsunterlagen für die Ausbildung von Flugsicherungsingenieuren zu verwenden. Besonders im Bereich der Radionavigation besteht dabei ein erhöhtes Interesse, die bisherigen theoretischen Grundlagen auch mittels eines praxisnahen Anwendungssystems vermitteln zu können. Konkret steht dabei besonders das sog. Distance Measuring Equipment (DME) im Fokus, welches nachgebildet werden soll. Beim DME handelt es sich um eine weltweit betriebene terrestrische Navigationsanlage, die der Entfernungsbestimmung zwischen Luftfahrzeug und Bodenstation dient. Das Grundprinzip des DME beruht dabei auf einer Laufzeitmessung, wobei anhand bekannter Naturkonstanten und fest definierter Systemverzögerungen die Entfernung zwischen beiden Systemen berechnet werden kann. In Kombination mit anderen Navigationsanlagen (z.B. Drehfunkfeuer) ermöglicht die Anlage somit dem Piloten, seine Position eindeutig auf der Karte zu bestimmen. Im Rahmen dieses Projekts soll daher ein DME auf Basis akustischer Signale erprobt und nachgebildet werden. Das System soll sich dabei verarbeitungstechnisch an das Original anlehnen, sodass es idealerweise nach Projektabschluss innerhalb einer Schulung vorgestellt werden kann. Grundlage dafür bilden neben Lautsprechern und Mikrofonen tragbare Tablets sowie die Programmiersprache Python. Die Arbeit folgt einem systematischen Vorgehen, das dem tatsächlichen Ablauf der Implementierung entspricht. Dabei werden zunächst alle einzelnen erforderlichen Verarbeitungsschritte als eigenständige Teilsysteme konzipiert und getestet, bevor sie zu einem Gesamtsystem zusammengesetzt werden. Intention dieser Kapselung ist es, potenzielle Schwierigkeiten bereits frühzeitig zu identifizieren, bevor sie sich im Gesamtsystem überlagern und nur noch schwer zuzuordnen sind. Die Ergebnisse des zusammengesetzten Gesamtsystems bestätigen dabei eine grundsätzliche Realisierbarkeit einer akustischen Entfernungsbestimmung, allerdings führen physikalische sowie softwarebedingte Probleme zu teilweise erheblichen Einschränkungen des Systems. Vor allem die Stabilität der echtzeitfähigen Signalverarbeitung der Bodenstation erweist sich dabei als wesentliches Hindernis. Trotz erster Korrekturmaßnahmen kommt es langfristig gesehen noch immer zu Abweichungen, welche außerhalb der gewünschten Toleranz liegen. Die aktuell realisierte Lösung stellt daher lediglich einen provisorischen Ansatz dar und sollte daher im Rahmen eines neuen Projekts weiter optimiert und untersucht werden, ehe das System beispielsweise durch eine grafische Benutzeroberfläche erweitert wird.

Entwicklung eines mikrowellenbasierten Instrumentenlandesystems (ILS)

Joshua Maiwald

Bachelorarbeit, Hochschule RheinMain, Fachbereich: Elektro- und Luftfahrttechnik, Abgabedatum: 10.04.2025, Referent: Dr. Frank Schlönhardt, Korreferent: Dipl.-Ing. Roman Raekow

Die Bachelorarbeit „Entwicklung eines mikrowellenbasierten Instrumentenlandesystems (ILS)“ beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Instrumentenlandesystems, das durch die im Mikrowellenbereich liegende Frequenz von 2,4 GHz und die damit einhergehende deutlich kürzere Wellenlänge eine weitaus kleinere Bauform als bei einem echten ILS ermöglicht. Hierfür wird sowohl die Entwicklung der Software als auch der Aufbau der Hardware für den Sender und den Empfänger behandelt. Im Anschluss an den Aufbau des Systems wurden Messungen durchgeführt, die deutlich zeigen, dass das Mikrowellen-ILS die Funktion eines echten ILS widerspiegelt. Dadurch ist das System bestens für den Einsatz in der Lehre – im Speziellen in der Grundausbildung neuer ATSEP (Air Traffic Safety Electronics Personnel) im Bereich Navigation (ATSEP-NAV-Kurs) – geeignet und kann den anfangs theorielastigen Inhalt dieser Ausbildung durch praktische Versuche mit dem Mikrowellen-ILS nochmals vertiefen. Der im Vergleich zu einem echten ILS simple Aufbau des Modells begünstigt hier nochmals das Verständnis des Systems. In der Bachelorarbeit wird der Fokus primär auf den Localizer (LOC) gesetzt, welcher eine der zwei Hauptkomponenten eines ILS darstellt und für die horizontale Führung der Flugzeuge zuständig ist. Doch auch ein funktionierender Glide-Slope (GS), der die vertikale Führung übernimmt, ist ein Ergebnis der Arbeit.

Softwaremodernisierung mit Docker und Kubernetes: Bewertungsansätze und Anwendung auf das PoLo-System

Eric Müller

Bachelorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Informatik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 17.03.2026, Prof. Dr. Kai Renz

Keine Informationen zum Abstract oder DFS-Betreuer verfügbar.

Vorhersage von Windrichtungen an Landebahnen mittels Machine Learning

Jan Neugebauer

Bachelorarbeit, TU Darmstadt, Fachbereich: Wirtschaftsinformatik, Abgabedatum: 17.07.2026, Referent: Prof. Dr. Peter Buxmann Korreferent: Danilo Walenta

Die vorliegende Arbeit untersucht, inwiefern sich die Betriebsrichtung und der Betriebszustand der Startbahn 18 am Flughafen Frankfurt Main prognostizieren lassen. Ausgangspunkt ist ein praktischer Bedarf der Deutschen Flugsicherung, die als Praxispartner und Auftraggeber dieser Arbeit eine frühzeitige Prognose zur Unterstützung zukünftiger Kapazitätsplanungsprozesse nutzen möchte. Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde ein Software-Artefakt basierend auf dem Design Science Research Prozess nach Peffers et al. (2006) entwickelt. Für die Prognose wurden verschiedene Klassifikationsmodelle trainiert und anhand von Bewertungsmetriken evaluiert. Die Evaluation erfolgte dabei getrennt für die beiden Zielvariablen Betriebsrichtung und Betriebszustand der Startbahn 18. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Betriebsrichtung gut prognostiziert werden kann. Die beste Modellleistung erzielt Gradient Boosting. Der Betriebszustand der Startbahn 18 lässt sich ebenfalls gut prognostizieren, allerdings zeigt die Prognoseleistung hier eine stärkere Abhängigkeit vom gewählten Modell. Für diese Zielvariable erzielt Hist-Gradient Boosting die beste Modellleistung. Die Arbeit zeigt damit, dass Machine Learning grundsätzlich zur Vorhersage der betrachteten Zielgrößen geeignet ist und als Grundlage für die Unterstützung der Kapazitätsplanung innerhalb der Deutschen Flugsicherung dienen kann.

Entwicklung und Evaluierung eines Reinforcement-Learning-Agenten zur konfliktfreien Flugzeugsteuerung in einer Luftverkehrssimulation

Lars Przybylek

Bachelorarbeit, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Informatik, Abgabedatum: 02.03.2026, Prof. Dr. Gunter Grieser, Adriatik Gashi

Die Automatisierung der Adjacent-Lotsen-Position in der Flugverkehrskontrolle bietet großes Potenzial, um die Ausbildung von Fluglotsen in den Simulationsumgebungen der Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS) Deutschen Flugsicherung GmbH effizienter zu gestalten. Um dies zu erreichen, wird in der vorliegenden Arbeit ein Ansatz basierend auf Reinforcement Learning (RL) entwickelt. Ein zentrales Problem bestehender RL-Methoden in diesem Bereich ist jedoch ein unruhiges Steuerungsverhalten („Jittering“). Dieses äußert sich in überflüssigen, kleinteiligen Kurskorrekturen, welche die Realitätsnähe und damit die Akzeptanz der automatisierten Lotsen erheblich mindern. Zur Lösung dieses Problems wird ein hybrider Aktionsraum konzipiert. Dieser kombiniert die diskrete Entscheidung, ob überhaupt eingegriffen werden soll (No-Operation), mit kontinuierlichen Steuergrößen für die eigentliche Kursänderung. Die technische Umsetzung erfolgt durch eine gezielte Modifikation des Proximal Policy Optimization (PPO) Algorithmus: Mithilfe von Gradient-Masking wird

sichergestellt, dass der Agent die bedingten Abhängigkeiten innerhalb dieses gemischten Aktionsraums stabil erlernen kann. Die Leistungsfähigkeit und technische Machbarkeit der entwickelten Architektur wurden in mehreren Versuchsreihen evaluiert, die sowohl eine Standardumgebung als auch eine vereinfachte Flugverkehrssimulation umfassten. Die Ergebnisse zeigen, dass der Ansatz zwar nicht den finalen Reward signifikant steigert, dafür aber eine schnellere Konvergenz und eine deutlich bessere Ausnutzung von Nicht-Eingriffen (Noops) erzielt. Die daraus resultierende Reduktion der Eingriffsfrequenz bestätigt das angestrebte ruhigere und effizientere Steuerungsverhalten. Somit liefert diese Arbeit einen erfolgreichen Proof of Concept für den Einsatz gemischter Aktionsräume zur Vermeidung redundanter Steuerbefehle im Flugverkehrsmanagement.

Demand & Capacity Balancing (DCB) in der unterjährigen Kapazitäts- und Personaleinsatzplanung der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH

Jonas Reiter

Masterthesis, Hochschule Konstanz, Fachbereich Maschinenbau, Abgabedatum: 30.06.2026, Prof. Dr. Carsten Schleyer

Für nähere Informationen zur Masterthesis, wenden Sie sich bitte direkt an den DFS-Betreuer Herrn Christoph Czech.

Implementation of Virtual Reality in ATC Workspace Design

Frederik Rubien

Bachelorarbeit, Fontys University of Applied Sciences, Niederlande, Fachbereich: Industrial Design Engineering, Abgabedatum: 31.05.2025, Duncan Hepburn

Topic: The development of an ergonomically optimized workstation for air traffic controllers using 3D modelling and VR prototyping. Investigation: This project focuses on identifying and addressing specific ergonomic challenges faced by air traffic controllers in their work environment. The investigation involves capturing the ATC workflow in a virtual environment, analysing posture, reach, visibility, and lighting, and validating the VR prototype through comparative analysis and user testing. Results: The project did not proceed as planned with VR prototyping, and no model was evaluated in VR by the end. The outcome of the bachelor's thesis is a preparation for the VR environment. With the appropriate hardware, the concepts can be evaluated in the future. Implications: The findings of this project suggest that VR prototyping can be a valuable tool in the design of ergonomic workstations for air traffic controllers. The advantages include the ease of making modifications and the faster validation process. Additionally, it does not interfere with the active work of air traffic controllers and can be conducted at any time. However, VR prototyping cannot entirely replace the traditional concept creation process.

Erstellung einer Metrik zur Bewertung der Sinkanflugeffizienz von Verkehrsflugzeugen und Vergleich mit bereits bestehenden Ansätzen

Felix Sang-Mo Koo

Bachelorarbeit, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Informatik, Abgabedatum: 26.02.2026, Prof. Dr. Michael Massoth, Prof. Dr. Elke Hergenröther

Die Luftfahrtindustrie steht vor der Herausforderung, die Effizienz von Flugoperationen kontinuierlich zu verbessern, um Kosten und Umweltbelastung zu reduzieren. Insbesondere der Sinkflugprozess, der bislang lediglich von Eurocontrol in binärer Form (Sinkflug oder Nicht Sinkflug) bewertet wird, bedarf einer präziseren Bewertungsmethode. Diese Arbeit präsentiert einen neuen, energiebasierten Ansatz zur Bewertung der Sinkflugeffizienz von Verkehrsflugzeugen, der über bestehende Ansätze wie die Eurocontrol-Metrik hinausgeht. Im Gegensatz zu binären Bewertungen ermöglicht der neue Ansatz eine kontinuierliche Bewertung der Effizienz, berücksichtigt eine Vielzahl von Parametern wie Flugzeugtyp, Flugzeugmasse, Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsänderung, Vertikalgeschwindigkeit und Wind und liefert eine präzisere Einschätzung des Sinkflugprofils. Der neue Ansatz wurde unter Berücksichtigung der aktuellen Datenlage entwickelt und durch Sensitivitätsanalysen auf seine Genauigkeit hin validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass bei üblichen Wetterbedingungen eine Genauigkeit von ca. ±20 % erreicht wird. Für eine zukünftige Anwendung mit höherer Datenqualität, insbesondere mit Luftgeschwindigkeiten, ist eine Genauigkeit von ca. ±10 % zu erwarten. Die implementierte Datenpipeline mit Flugdatenmigrierer und Evaluierer ermöglicht eine automatisierte Langzeitanalyse der Sinkflugeffizienz und liefert somit eine solide Datengrundlage zur Bewertung bestehender Verfahren und zur Quantifizierung von Optimierungsmaßnahmen.

Entwicklung eines Software-Werkzeuges unter Linux zur Ermittlung der geringsten Entfernung zwischen Luftfahrzeugen im ATS-System iCAS/Phoenix

Felix Schüßler

Bachelorthesis, , Hochschule Darmstadt, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik, Abgabedatum: 24.03.2026, Prof. Dr.-Ing. Antje Wirth, Prof. Dr.-Ing. Michael Kuhn

Der Inhalt dieser Thesis befasst sich mit der Entwicklung eines Software-Werkzeuges, das bei der Untersuchung einer Staffelungsunterschreitung zur Hilfe genommen werden kann, um den geringsten Abstand zweier Luftfahrzeuge zu ermitteln. Dabei soll es über eine graphische Oberfläche bedient werden und in einem vorgegebenen Zeitraum explizit nach Staffelungsunterschreitungen zwischen zwei Luftfahrzeugen suchen. Es soll die Abstände berechnen und gibt den Zeitpunkt mit dem geringsten horizontalen Abstand ausgeben. Mit diesem Ergebnis ermöglicht das Tool eine zügige Erstanalyse für den Flugverkehrskontrolldienst sowie die schnelle Erstellung einer auf Radardaten basierenden Situationsübersicht mit dem System Phoenix-AWP. Für die Entwicklung der Software wurde die Model-View-Controller Methode verwendet, um das Tool modulweise aufbauen und testen zu können. Die Programmiersprache Python wurde in Verbindung mit dem Framework PyQt für das Programm verwendet, wobei kleine Teile des Programms mit BASH Befehlen arbeiten. Es wurde das Linux Betriebssystem verwendet, welches auf der Ziel-Umgebung für das Tool in Einsatz kommt. Mit den Anforderungen konnte das Software-Werkzeug erfolgreich implementiert werden. Es bietet dem Benutzer die Möglichkeit die vorhandenen Trackdaten zu verwenden, sowie eigene Daten für die Auswertung herzunehmen. Dabei kann der Zeitraum, in dem die Auswertung durchgeführt werden soll, über eine Datums- und Zeitauswahl eingeschränkt werden. Außerdem kann die Datenquelle so angepasst werden, dass nur die Daten ausgewertet werden, die auch der Fluglotse beim Auftreten der Staffelungsunterschreitung verwendet hat. Nach Eingabe der beiden Callsigns der betroffenen Luftfahrzeuge kann der Benutzer die Berechnung über einen Knopf starten und gegebenenfalls abbrechen. Der Fortschritt der Berechnung wird dem Benutzer angezeigt und nach erfolgreicher Auswertung, werden ihm die Ergebnisse auf der graphischen Oberfläche dargestellt. Das Tool unterstützt bei der Untersuchung von Staffelungsunterschreitungen bereits durch das einfache Berechnen des Abstandes. Zudem lässt sich das Programm problemlos erweitern, um weitere Funktionalitäten zu implementieren, welche den Workflow noch effizienter machen können.

Evaluierung von OCR-Tools für Dokumentenmanagementsysteme im Umfeld der Flugsicherung

Anton Schütz

Bachlorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Informationstechnik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 21.03.2025, Prof. Dr. Daniel Burda

Diese Arbeit untersucht verschiedene Optical Character Recognition Systeme hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz in einem Dokumentenmanagementsystem der Flugsicherung. Nach einer Marktanalyse wurden drei vielversprechende Systeme – Tesseract OCR, EasyOCR und PaddleOCR – ausgewählt und anhand zweier Testdatensätze eine umfassende Leistungsmessung durchgeführt. Dabei wurden zentrale Metriken wie Precision, Recall, F1-Score und Word Error Rate gemessen und verglichen. Zudem wurde die Laufzeit jedes Systems erfasst, um ihre Effizienz zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass PaddleOCR die höchste Erkennungsgenauigkeit erzielt, jedoch im Vergleich zu den anderen Systemen eine längere Laufzeit aufweist. Tesseract benötigt – abhängig vom gewählten Sprachmodell – eine ähnlich hohe Laufzeit, erreicht jedoch eine geringere Erkennungsqualität. EasyOCR zeichnet sich durch eine sehr schnelle Verarbeitung der Datensätze aus, zeigt jedoch eine deutlich höhere Fehlerrate. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird PaddleOCR für den Einsatz in Dokumentenmanagementsystemen zur Indexierung digitalisierter Dokumente vorgeschlagen. Zudem werden verschiedene Ansätze vorgestellt, um PaddleOCR effizient in das bestehende Dokumentenmanagementsystem der Flugsicherung zu integrieren und die Auswirkungen der höheren Laufzeit zu minimieren sowie die Verarbeitung mehrerer Sprachen zu ermöglichen.

Konzeption und Entwicklung eines RAG basierten Chatbots auf Grundlage eines lokalen LLM unter der besonderen Herausforderung der Ressourcenlimitierung

Ares Skiadas

Bachelorarbeit, Hochschule Darmstadt, Fachbereich: Informatik, Abgabedatum: 14.11.2025, Referent: Frank Bühler, Korreferent: Peter Muth

Die Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung, wie die Durchführung von Security Risk

Assessments mithilfe von KI-Chatbots vereinfacht werden kann. Dabei wurde versucht, einen solchen Chatbot vollständig lokal auf einfacher Hardware umzusetzen.

Dynamische Geo-Informationen im Web Methoden zur Darstellung bei hoch- und niedrigfrequenten Änderungen

Ansgar Steger

Bachlorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Informationstechnik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 20.03.2026, Prof. Dr. Mathias Schnee

Für die Darstellung von Geo-Informationen in Echtzeit über den Browser gibt es keine einheitliche Lösung. Viele kommerzielle Programme nutzen proprietäre Lösungen mit Vektordaten über WebSocket. In dieser Arbeit wur de für das Tool TraX von der Firma Droniq versucht, eine Lösung für das Problem zu finden, die auch auf älteren Geräten funktioniert und möglichst auf existierenden Lösungen aufbaut. Bei TraX sollen verschiedene Informationen mit verschiedenen Änderungsraten dargestellt werden. Daher werden in dieser Arbeit verschiedene Lösungen für verschiedene Raten an Änderungen vorgestellt. Die Lösungen basieren auf offenen Standards und sind möglichst universell einsetzbar. Für hoch- und niedrigfrequente Änderungen wurden zwei verschiedene Lösungen ausgearbeitet. Die erste Lösung basiert auf Rasterdaten, die über Web Map Service (WMS) geladen werden. Bei dieser Lösung wurden über WMS angeforderte Raster daten durch Nachrichten von einem WebSocket aktualisiert. Bei der zweiten Lösung werden Vektordaten über den WebSocket an den Klienten gesendet. Die Lösungen werden auch untersucht und verglichen, um zu überprüfen, welche wofür geeignet ist. Die Untersuchung hat gezeigt, dass die erste auf Rasterdaten basierende Lösung auch bei älteren Geräten bis zu 100.000 Polygone anzeigen kann. Diese Lösung ist aber nur für eine Rate von einer Änderung pro Sekunde geeignet. Die zweite, auf Vektordaten basierende Lösung kann auf älteren Geräten bis zu 10.000 Polygone darstellen, während eine Rate von 100 Änderungen pro Sekunde möglich war. Basierend auf dieser Auswertung wurden Empfehlungen ausgestellt.

UAV-gestützte Analyse von Flugfunknavigationsanlagen zur Ergänzung von Flugvermessung

Fabio Ramirez Stern

Bachelorarbeit, Hochschule RheinMain, Fachbereich: Elektro- und Luftfahrttechnik, Abgabedatum: 10.06.2026, Referent: Prof. Dr. Matthias Schäfer, Korreferent: Dr. Stefan Müller

In dieser Bachelorarbeit werden Doppler-VOR (DVOR) Navigationsanlagen mit einem selbstgebauten Messsystem analysiert. Dazu wird ein Software Defined Radio (SDR) auf einer Drohne (UAV) montiert und in verschiedenen Flugprofilen IQ-Daten aufgezeichnet. Eine digitale Signalverarbeitung in Python wertet dann die Daten aus. Dabei werden die beiden Seitenbänder der Frequenzmodulation separat analysiert. Dies ermöglicht es Totalausfälle, Dämpfungen und Phasenabweichungen von einzelnen Antennen im Doppler-Ring zu detektieren und zu lokalisieren. Die Messwerte eines EVSG1000-Messgerätes können nachgebildet werden.

Entwicklung eines Belastungskapazitätstests zur Abnahme des Data Link Front Ende Prozessors

Tobias Stieglitz

Bachlorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 21.03.2025, Prof. Dr.-Ing. Michael Kuhn, Prof. Dr.-Ing. Shun-Ping Chen

Der Data Link Front End Prozessor (DL-FEP) ist eines der Kernsysteme der Datalink Ende-zu-Ende Verbindung zwischen dem Lotsen und dem Luftverkehrsteilnehmer. Für diese Applikation übernimmt der DL-FEP das Log-on-Management und die Verarbeitung der Informationen zur korrekten Kommunikationsabwicklung. In der vorliegenden Bachelorthesis werden bereits vorhandene Testverfahren analysiert und weiterentwickelt. Ziel der Arbeit ist es den Kapazitäts- und Langzeittest für den DL-FEP sinnvoll und möglichst realitätsnah zu verknüpfen, um einen solchen Test in künftigen Abnahmeverfahren verwenden zu können.

Analyse übermittelter Flugprofile aus der datenfunkbasierten Flugüberwachung für die nachträgliche Prozessoptimierung im Kontext einer zukünftigen trajektorienbasierten Flugführung

Matthias Tauber

Masterarbeit, TU Darmstadt, Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 26.06.2026, Prof. Dr.-Ing. Jens Schiefele

Für nähere Informationen zur Bachelorarbeit, wenden Sie sich bitte direkt an den DFS-Betreuer Herrn Dr. Thomas Pütz.

Räumliche Darstellung von Flugzeugen und Flugrouten mit dynamischer Beobachterposition in QML

Amelie Terzic

Bachelorarbeit, Hochschule RheinMain, Fachbereich: Informatik, Abgabedatum: 07.04.2026, Prof. Dr. Eva-Maria Iwer

Unter den Systemen, die sich derzeit im operationellen Betrieb oder in der Entwicklung befinden, zählt eine Software, die künftig unmittelbar im Fluglotsenbetrieb in Karlsruhe eingesetzt werden soll. Diese Software enthält unter anderem eine zweidimensionale Darstellung des deutschen Luftverkehrs. Für den Fluglotsen ist es aus funktionaler Sicht jedoch nicht notwendig, dass diese Anzeige dreidimensional ist. Die Motivation hinter diesem Projekt ist die Idee einer dreidimensionalen Ansicht des Flugverkehrs im deutschen Luftraum. Diese Anwendung besitzt keine Relevanz für den Flugverkehrskontroll-Betrieb, sondern dient als reiner Visualisierungsprototyp und kann intern für Darstellungs- und Präsentationszwecke genutzt werden. Da die Anwendung mit demselben GUI-Framework entwickelt wird wie die Software für den Arbeitsplatz der Lotsen, kann zudem die Eignung des Frameworks für dreidimensionale Darstellungen dokumentiert und dessen Möglichkeiten ausgetestet werden. Ziel ist die Entwicklung eines Prototyps, der auf dem DFS-internen Rapid AirTrafficControl Prototyping System (RAPS) aufbaut und anhand gegebener Testdaten Flughäfen, Wegpunkte und Flüge im deutschen Luftraum darstellt. Dabei soll es möglich sein, verschiedene Perspektiven einzunehmen und sich frei in der Szene zu bewegen. Wird ein Flugzeug selektiert, wird dessen jeweilige Route angezeigt.

Simulation einer kompakten P2-ATCAS Trainingsumgebung für Engineer on Duty in der DFS-Kontrollzentrale Bremen

Patrick Thielke

Bachlorthesis, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik, Abgabe- oder Kolloquiumsdatum: 14.03.2025, Prof. Dr.-Ing. Antje Wirth, Prof. Dr.-Ing. Shun-Ping Chen

In dieser Arbeit wird eine virtualisierte Trainingsumgebung für die Ausbildung von EoD in der DFS-Kontrollzentrale Bremen entwickelt. Ziel ist die Bereitstellung einer eigenständigen und kompakten Simulationslösung für das P2-ATCAS, das Kernsystem für die Verarbeitung von Radar- und Flugplandaten in der Flugsicherung. Die Trainingsumgebung ermöglicht es dem Trainee, über die Hauptsteueranzeige von ATCAS (CMD) die Systemzustände zu überwachen und zu interpretieren, während der Trainer die Szenarien zentral über ein Notebook steuert. Die Implementierung basiert auf Proxmox VE als Virtualisierungsplattform und nutzt die bereitgestellte Hardware zur Nachbildung der Systemarchitektur. Durch die Evaluierung konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Umgebung eine realistische Simulation der Betriebsabläufe bietet und eine effiziente Schulung unabhängig von der bestehenden Testumgebung (LSS) ermöglicht. Insbesondere die Flexibilität, Skalierbarkeit und die Möglichkeit zur einfachen Reproduktion von Fehlerszenarien stellen wesentliche Vorteile dar. Im Vergleich zum LSS bietet die virtualisierte Lösung eine deutliche Entlastung der Betriebsumgebung, eine höhere Anpassungsfähigkeit und geringere Ressourcenanforderungen. Langfristig zeigt die Arbeit Potenziale für eine weitergehende Virtualisierung in der Flugsicherung auf. Denkbare Weiterentwicklungen umfassen die Virtualisierung des Systems iCAS sowie den Aufbau eines hybriden Simulators für verschiedene Flugsicherungssysteme.

Erstellung von Infoseiten für Tower Frankfurt und Bremen

Ayberk Tuzcuoglu

Bachelorarbeit, TH Aschaffenburg, Fachbereich: Elektro- und Informationstechnik, Abgabedatum: 30.06.2025, Prof. Bochtler

Die Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Konzeption und Umsetzung eines neuen INFO-Seiten-Services für TANGe als Beispiel für die Tower der Flughäfen Frankfurt (EDDF) und Bremen (EDDW). Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer modernen, wartbaren und benutzerfreundlichen Lösung zur Bereitstellung betrieblicher Informationen für die Fluglotsen. Hierfür wird das Bestandssystem IDVS durch einen webbasierten INFO-Seiten-Service auf Basis des Content-Management-Systems ProcessWire erweitert. Im Rahmen der Arbeit werden zunächst die Ausgangssituation und die Schwächen des bisherigen Systems analysiert. Anschließend werden die Konzeption und technische Umsetzung des INFO-Seiten-Services beschrieben. Dazu gehören die Entwicklung der Seitenstruktur, die Erstellung und Anpassung von Templates, die Implementierung zentraler PHP-Funktionen sowie die Integration externer Datenquellen. Darüber hinaus werden die Benutzer- und Rollenverwaltung sowie die Deployment-Strategie mit Docker und Kubernetes erläutert. Die entwickelte Anwendung wurde erfolgreich als Prototyp umgesetzt und den verantwortlichen Mitarbeitern sowie Fluglotsen vorgestellt. Das erhaltene Feedback bestätigte insbesondere die verbesserte Bedienbarkeit und den schnelleren Zugriff auf betriebsrelevante Informationen. Der Tower Bremen dient derzeit als erster Pilotstandort für die Einführung des

INFO-Seiten-Services und wird als erste operative Einsatzumgebung in Betrieb genommen.

Optimized Pathfinding for Unmanned Aerial Vehicles in the Context of German Airspace Regulations – deutsch Übersetzung: „Optimierte Wegfindung für unbemannte Luftfahrzeuge im Kontext der deutschen Luftraumregulierung“

Matthias Wallenstein

Masterarbeit, Hochschule Darmstadt, Fachbereich: Informatik, Abgabedatum: 30.11.2025, Referent: Prof. Dr. Benjamin Meyer Korreferent: Prof. Dr. Kai Renz

Durch den wachsenden Markt für Drohnen ist auch die Zahl der Drohnenoperationen und privaten Drohnenpiloten gestiegen. Um dabei einen sicheren Luftraum zu ermöglichen, wurden Gesetze und Richtlinien eingeführt, die unter anderem Lufträume definieren, in denen das Fliegen von Drohnen nur mit einer Genehmigung möglich ist. In Deutschland und Europa gibt es viele solcher sogenannten geografischen Gebiete, was die Routenplanung für Drohnenoperationen komplex gestalten kann. Routen müssen immer innerhalb eines definierten Operationsgebiets bleiben und sofern möglich geografische Gebiete vermeiden. Die Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS) bietet Werkzeuge wie die Digitale Plattform für Unbemannte Luftfahrt (DIPUL) für Drohnenpiloten und Operateure an, um diese bei der Planung und Durchführung ihrer Operationen zu unterstützen. Im Rahmen der Thesis soll eine Basis zur Implementierung einer automatischen Routenplanung für solche Tools geschaffen werden. Für die Ermittlung einer optimierten Route in einem definierten Operationsgebiet werden Start- und Zielpunkt so verbunden, dass Flugstrecke und Genehmigungsaufwand für das Durchqueren von geografischen Gebieten minimiert werden. Die Konzeption der 4D Routenplanung gliedert sich in drei Problemfelder: (1) Für eine effiziente Modellierung des 4D Raums unter Einbeziehung geografischer Gebiete wird eine umfassende Analyse von bestehenden Ansätzen (Uniform Grids, Quad Trees und Triangulated Graphs) sowie eine geeignete Komplexitätsreduktion auf 2D vorgestellt. (2) Zur Bewertung des Genehmigungsaufwands für die verschiedenen Klassen von geografischen Gebieten wird anhand eines Experten-Interviews eine anwendungsorientierte Heuristik abgeleitet. (3) Für die schnelle Optimierung der Route werden geeignete Algorithmen (A*, Theta* und Lazy Theta*) untersucht und bewertet. Abschließend wird die Integration aller Teillösungen in einer protypischen Umsetzung evaluiert und diskutiert. Die vorgestellte Lösung berechnet eine optimierte Route für ein 14,86 km² großes städtisches Operationsgebiet mit 23 geografischen Gebieten und einer Flugstrecke von 11,28 km in 0,34 s auf einem handelsüblichen Notebook. Die prototypische Umsetzung dient als Basis für weitere Funktionen zur Unterstützung von Betreibern und Piloten bei der Operationsplanung und -durchführung.

Design und Entwicklung einer modernen grafischen Benutzeroberfläche für eine Applikation zur Überwachung von Flugsicherungssystemen

Felix Zipser

Bachelorarbeit, Hochschule für angewandte Wissenschaften Landshut, Abgabedatum: 13.03.2026, Prof. Dr.-Ing. Eduard Bröcker

In dieser Arbeit wird die Neuentwicklung einer Benutzeroberfläche für eine Überwachungssoftware von Flugsicherungssystemen behandelt. Die Überwachungssoftware ermittelt den Zustand von Hard- und Software der einzelnen Rechner im Betriebsraum der Flugsicherung am Standort München und stellt diesen Zustand grafisch dar. Die Neuentwicklung soll diese Benutzeroberfläche überarbeiten und modernisieren. Über eine Anforderungsanalyse wurden konkretere Benutzeranforderungen und Wünsche der Nutzer ermittelt, die diskutiert und umgesetzt wurden. Die Implementierung dieser Vorschläge soll die Übersichtlichkeit des bisherigen Tools verbessern und die Wartbarkeit in der Zukunft garantieren. Dabei wird berücksichtigt, dass nur die grafische Benutzeroberfläche und die Benutzerführung erneuert werden und nicht die gesamte Überwachungssoftware. Zur Entwicklung der grafischen Benutzeroberfläche wurde die Programmiersprache Python in Kombination mit dem Framework PyQt verwendet. Die Implementierung erfolgte über das inkrementelle Vorgehensmodell, um Zwischenergebnisse in die Entwicklung einzubeziehen. Die Umsetzung fand in einer Testumgebung des Unternehmens statt, die den wesentlichen Aufbau des Betriebsraums nachbildet. Nach einer Validierung in der Testumgebung wurde festgestellt, dass die neue grafische Oberfläche und Benutzerführung die grundlegenden Eigenschaften der bestehenden Überwachungssoftware beibehalten hat. Die Zustände der Maschinen werden korrekt dargestellt. Gleichzeitig konnte die Übersichtlichkeit verbessert werden, indem die Legende, die die Zustände erklärt, überarbeitet und eine klare Aufteilung der Systemkomponenten geschaffen wurde. Durch die im Rahmen des Projekts geschaffene Grundlage besteht die Möglichkeit, die Benutzeroberfläche in Zukunft auf weitere Systeme auszuweiten. Dadurch könnte ein Einsatz in der operativen Umgebung erfolgen. Aufgrund des Interesses der Nutzer an diesem Projekt ist eine Weiterentwicklung der Benutzeroberfläche vorgesehen. Die wesentlichen Ziele des Projekts wurden erreicht.

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 DFS Deutsche Flugsicherung GmbH. Diese Ausgabe ist elektronisch im Internet (www.dfs.de > Medien > Publikationen > „Schlagworte" Innovation im Fokus) 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: 13.08.2026

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 © 2026 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.

DFS Deutsche Flugsicherung

Impressum

Innovation im Fokus

Informationen zu Forschung, Entwicklung und Validierung

Herausgeber:
DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
Dr. Gerolf Ziegenhain, Bereichsleitung Innovation & Planung

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

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

Dr. Swaroop Chauhan
Tel. +49 (0)6103 707 2284
E-Mail: swaroop.chauhan@dfs.de

Dr. Morten Grandt
Tel. +49 (0)6103 707 2250
E-Mail: morten.grandt@dfs.de

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

Anschrift der Redaktion:
DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
Redaktion Innovation im Fokus
Am DFS-Campus 5
63225 Langen
E-Mail: forschung@dfs.de

Nachdruck nur mit Genehmigung.