

Innovation im Fokus

Informationen zu Forschung, Entwicklung und Validierung



Themenübersicht

- Einbindung des Luftverkehrs in intermodale Reisen
- Trajectory Prediction and Aircraft Performance Modelling
- Fähigkeit des Abfanges von in gesperrte Lufträume eindringenden Kleinfluggeräten durch zivile Einsatzmittel (Falke)
- Spracherkennungsbasierte Eingabeunterstützung für Lotsen und Technologieevaluierung - SALT
- Rolle der Automatisierung bei der Umsetzung klimaoptimierter Anflugprofile



Herausgebereditorial: Auf neuen Wegen – Eine Reflexion zum Ruhestand

Liebe Leserinnen und Leser,

es ist das Gefühl von Wehmut, aber auch das von noch mehr Stolz und Dankbarkeit, mit dem ich mich heute an Sie wende, um meinen Abschied als Herausgeber dieser Forschungszeitschrift zu verkünden. Nach vielen Jahren der engagierten Zusammenarbeit und inspirierenden Entdeckungen ziehe ich mich nun in den wohlverdienten Ruhestand zurück. Dieser Moment markiert nicht nur das Ende eines beruflichen Kapitels, sondern eröffnet auch Raum für neue Perspektiven und Möglichkeiten.

Wenn ich auf die vergangenen Jahre zurückblicke, überkommt mich ein Gefühl der Dankbarkeit für die zahlreichen Beiträge, die die Forschungsgemeinschaft zu dieser Zeitschrift beigetragen hat. Gemeinsam haben wir Wissen geschaffen, Erkenntnisse vertieft und den Horizont der Wissenschaft erweitert. Die Vielfalt der Themen, die in diesen Seiten ihren Platz fanden, spiegelt die Breite und Tiefe der Forschung in unseren Fachgebieten wider. Es war mir eine Ehre, Teil dieses intellektuellen Dialogs zu sein.



Mein Ruhestand markiert jedoch nicht das Ende dieser Reise, sondern den Beginn einer neuen Etappe. Als Herausgeber habe ich stets nach Innovation und Exzellenz gestrebt. Ich ermutige die kommende Generation von Forschenden und Herausgebern, diesen Weg fortzusetzen und neue Wege der Erkenntnis zu erkunden. Die Wissenschaft ist ein stetig fließender Fluss, und es liegt an uns, diesen Fluss mit Neugier und Entschlossenheit weiter zu erforschen.

In einer Zeit, in der die Welt vor Herausforderungen steht, die multidisziplinäre Lösungen erfordern, rufe ich dazu auf, weiterhin über Fachgrenzen hinweg zusammenzuarbeiten. Die Zusammenführung verschiedener Perspektiven und Expertisen ist der Schlüssel zur Bewältigung komplexer Probleme. Unsere Forschungszeitschrift soll ein Ort bleiben, an dem interdisziplinäre Dialoge gefördert werden und innovative Ideen gedeihen können.

Abschließend möchte ich mich bei allen Autorinnen und Autoren, Reviewerinnen und Reviewern sowie dem gesamten Redaktionsteam für die hervorragende Zusammenarbeit bedanken. Gemeinsam haben wir die Forschungslandschaft geprägt und einen bleibenden Beitrag geleistet. Zuversichtlich übergebe ich die Verantwortung in die Hände meines Nachfolgers und bin sicher, dass die Zeitschrift auch unter neuen Herausgebern weiterhin aufblühen wird.

In diesem Sinne danke ich Ihnen allen für die inspirierende Reise und freue mich darauf, als Leser künftig die Früchte unserer gemeinsamen Bemühungen zu ernten. Be innovative!

Mit herzlichen Grüßen,

Günter Achatz

Herausgeber der Forschungszeitschrift

(Mithilfe von KI maschinell erstellt und durch Menschen überarbeitet)

Inhaltsverzeichnis

Einbindung des Luftverkehrs in intermodale Reisen und Rolle von Verspätungen in der Luftfahrt auf die Reisezeit Tür-zu-Tür.....	7
Jörg Buxbaum	
Trajectory Prediction and Aircraft Performance Modelling	15
Matthias Poppe, Thomas Pütz, Longbiao Ma*, Yingchao Xiao* & Weiyu Jiang* (*State Key Laboratory of Air Traffic Management System and Technology, Nanjing, China)	
Fähigkeit des Abfangens von in gesperrte Lufträume eindringenden Kleinfluggeräten durch zivile Einsatzmittel (FALKE)	23
Andreas Udovic & Ralf Häschke	
Spracherkennungs-basierte Eingabeunterstützung für Lotsen und Technologieevaluierung – SALT	27
Stefan Tenoort, Thomas Rüggeberg, Konrad Hagemann, Sven Simon, Benedikt Pudwell & Armin Linke	
Rolle der Automatisierung bei der Umsetzung klimaoptimierter Anflugprofile	37
Jörg Buxbaum, Lukas Rohrmüller, Steffen Flämig*, Wolfram Schiffmann* & Jan Höra (*Fernuniversität Hagen)	
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

Jörg Buxbaum: Einbindung des Luftverkehrs in intermodale Reisen und Rolle von Verspätungen in der Luftfahrt auf die Reisezeit Tür-zu-Tür – Flüge sind häufig ein isolierter Bestandteil einer intermodalen Reise. Vom Flightpath-2050-Ziel, innerhalb von vier Stunden in Europa „nahtlos von Tür zu Tür“ reisen zu können, ist die Realität noch weit entfernt. Es fehlen Angebote für intermodale Reisen von Tür zu Tür, mit App-gestützter, selbstständiger Neuplanung der Anschlussverbindungen von Verkehrsträgern, auch und gerade bei Verspätungen und Störungen. Dabei könnten insbesondere über neue Digitalisierungsoptionen, den Einsatz von KI und verkehrsträgerübergreifende Regelungen Puffer- und Prozesszeiten reduziert und Reisen planbarer, schneller und einfacher werden. Der Artikel wirft Perspektiven auf diese Optionen und stellt auch typische Verspätungen im Luftverkehr in Relation zu typischen Reisezeiten von Tür zu Tür – mit dem spannenden Ergebnis, dass Delays in der Luftfahrt bei Point-to-Point-Verbindungen weit weniger gravierende Auswirkungen haben als die fest eingebauten Warte- und Pufferzeiten in der Transportkette.

Matthias Poppe, Thomas Pütz, Longbiao Ma*, Yingchao Xiao* & Weiyu Jiang* (*State Key Laboratory of Air Traffic Management System and Technology, Nanjing, China): Trajectory Prediction and Aircraft Performance Modelling – Der Artikel ist in englischer Sprache verfasst und beschreibt ein Modell für die Vorhersage der vertikalen Trajektorie vom Take Off bis zum Top of Climb. Das Flugleistungsmodell basiert auf einem physikalischen Gesamtenergiemodell und wurde für die internationalen Flughäfen Baiyun (China) und München validiert. Dieses Modell wurde mit den Anfangsparametern initialisiert, die die Flugzeugleistung und die Umgebungsbedingungen berücksichtigten. Für den Speed Schedule wurden die Calibrated Airspeed (CAS) und Machzahl aus einem Deep Neural Network abgeleitet. Die Masse wird mit einem Optimierungsansatz der kleinsten Quadrate geschätzt. Die Wind- und Temperaturbedingungen werden in zeitlicher, lateraler und vertikaler Dimension berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen einen Vorhersagefehler in der Größenordnung von 600 bis 1000 Fuß mittlerer absoluter Fehler, der relative Fehler liegt zwischen 1,5 % und 3 %. Indem einige der Fehlerquellen adressiert wurden, konnte der Fehler der Vorhersage weiter auf die Größenordnung von 400 bzw. 500 Fuß (Baiyun bzw. München) für den A320 reduziert werden. Dies entspricht einem relativen Fehler von etwa 1 % bis 1,5 %, bezogen auf einen Steigflug von Flight Level 100 bis Flight Level 300.

Andreas Udovic und Ralf Häschke: Fähigkeit des Abfangens von in gesperre Lufträume eindringenden Kleinfluggeräten durch zivile Einsatzmittel (FALKE) – Das Projekt FALKE, das vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr gefördert wurde, hatte das Ziel, die gesamte Prozesskette von der Detektion illegal operierender Drohne bis zur Abwehr durch ein Abfangdrohne zu untersuchen. Die Partner, darunter die Helmut-Schmidt-Universität, der Flughafen Hamburg, die Bundespolizei und andere, waren in 10 Arbeitspakete involviert. Die DFS (Deutsche Flugsicherung GmbH) war besonders in den ersten drei Arbeitspaketen aktiv und trug mit ihrem Warnstufenmodell und operationellem Know-how zur Entwicklung der Software bei. Die DFS konnte die Prozesskette erfolgreich abschließen und eine Blaupause für die Vernetzung der Systempartner an Flughäfen schaffen. In den Tests wurden Schnittstellen, Anforderungen und das Gesamtkonzept für die Drohnendetektion und -abwehr erfolgreich erprobt.

Stefan Tenoort, Thomas Rüggeberg, Konrad Hagemann, Sven Simon, Benedikt Pudwell & Armin Linke: Spracherkennungsbasierte Eingabeunterstützung für Lotsen und Technologieevaluierung – SALT – Der Artikel fasst DFS Konzeptarbeiten zum Einsatz von Spracherkennung als mögliche Eingabeunterstützung am Lotsenarbeitsplatz zusammen. Die Konzepterstellung wurde von einer prototypischen Erstentwicklung der Ideen an einem vereinfachten streifenlosen Radararbeitsplatz begleitet und Mitte 2022 zur Vorstellung in den DFS Betrieb gebracht. Die Software für die automatische Spracherkennung basierte auf dem Open-Source Toolkit „Kaldi“. Wesentliche Merkmale in der eingesetzten Version sind Schnelligkeit bei der Erkennung von Schlagworten und die Erkennungsgüte. Nutzerseitig war die Resonanz gegenüber dem Konzept, insbesondere auf dem Bewertungsfaktor „Kapazitätsentlastung“ über Niederlassungen hinweg sehr positiv. Das SALT Konzept kann sowohl im Foyer des Forschungszentrums auf einem Großbildschirm als Video erlebt, wie auch im Simulatorraum an einem Demo-Arbeitsplatz für Zukunftskonzepte interaktiv ausprobiert werden.

Jörg Buxbaum, Lukas Rohrmüller, Steffen Flämig*, Wolfram Schiffmann* & Jan Höra (*Fernuniversität Hagen): Rolle der Automatisierung bei der Umsetzung klimaoptimierter Anflugprofile – Der Artikel untersucht das Potenzial, Anflugprofile ab Reiseflug umweltfreundlicher und CO₂-optimierter zu gestalten. Zusammenfassend handelt es sich bei diesem Vorhaben, unabhängig vom Flughafen in Deutschland, weder um einen „Quick Win“ noch um eine „Low hanging fruit“. Zahlreiche technische und betriebliche Entwicklungen sind erforderlich, um den Anteil an CDO-Anflügen in einem komplexen Luftraum wie Deutschland zu steigern und messbare Treibstoffeinsparungen zu erzielen. Im Gesamtkontext einer zukünftigen CO₂-neutralen Luftfahrt sind CDO-Anflüge zwar nur ein kleiner Baustein, aber langfristig unausweichlich, um Flüge unabhängig vom Energieträger so energieeffizient wie möglich zu führen.

Einbindung des Luftverkehrs in intermodale Reisen und Rolle von Verspätungen in der Luftfahrt auf die Reisezeit Tür-zu-Tür

Jörg Buxbaum

Flightpath 2050: „In vier Stunden von Tür-zu-Tür“

Zwölf Jahre ist es her, dass politische Ziele für die europäische Luftfahrt in einer strategischen Vision mit dem Namen „Flightpath 2050“ mündeten [1]. Als Bedürfnis der Gesellschaft und des Marktes formulierte das Papier: „Im Jahr 2050 können 90% der Reisenden in Europa ihre Reise von Tür-zu-Tür innerhalb von vier Stunden abschließen. Passagiere und Fracht wechseln nahtlos zwischen den Verkehrsträgern, um reibungslos, vorhersehbar und pünktlich den Zielort zu erreichen.“ In den Folgejahren entspannten sich zunächst einmal Diskussionen darüber, wie dieses Ziel zu verstehen sei, da z.B. keinerlei Angabe enthalten war, ob ein Flugsegment in diesen Reisen enthalten ist und auf welchen exakten geografischen Raum es sich bezieht [2]. Mittlerweile scheint anerkannt, dass es sich um intermodale Reisen handelt, die ein Flugsegment (Point-to-Point) beinhalten können.

Dieser Artikel beleuchtet, wie sich Vision und Realität derzeit noch unterscheiden, was Gründe dafür sind und wie realistisch die Erreichung der Vision unter aktuellen technischen und betrieblichen Projektionen erscheint. Es werden Möglichkeiten beleuchtet, weitergehende Potentiale einer nahtloseren, schnelleren und vorhersehbareren intermodalen (Flug-)Reise in Europa zu erschließen. Der Artikel stellt auch dar, welche Auswirkung typische Verfrühungen und Verspätungen im Luftverkehr auf die Reisezeit Tür-zu-Tür haben.

4-Stunden-Ziel: Realitätscheck

Für die Abschätzung des Unterschieds zwischen der Ist-Situation und der Vision und damit auch der bestehenden Herausforderung bietet sich ein Blick auf aktuelle Verhältnisse an.

Viele Fluggesellschaften und Flughäfen empfehlen Flugpassagieren, zwei bis drei Stunden vor Abflug am Flughafen zu sein [3]. Bei einer angenommenen Anreisezeit von 30 Minuten zum Flughafen und

30 Minuten Reisezeit vom Zielflughafen zum endgültigen Reiseziel verbleiben für das Segment Off-Block bis On-Block maximal 60 Minuten. Bei 20 Minuten Rollzeit und einer durchschnittlichen Fluggeschwindigkeit von 750 km/h sind 500 Kilometer Flugdistanz erreichbar.

Damit kann in vier Stunden maximal eine intermodale Reise Frankfurt-Paris durchgeführt werden – nicht jedoch eine „typische“ Flugreise innerhalb Europas, die eine Flugdistanz von knapp 1000 Kilometern aufweist [4]. Bei Gepäckaufgabe dürfte die erreichbare Distanz nochmal deutlich kleiner sein, da hier Drop-Off am Startflughafen und Gepäckaufnahme am Zielort zusätzlich Zeit kosten. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 1 – eine exemplarische Reise aus dem Rhein-Main-Gebiet nach Berlin, die rund sechs Stunden in Anspruch nahm.

Von diesen vier bzw. sechs Stunden ist maximal die Hälfte tatsächliche Reisezeit mit einem Verkehrsmittel. Der Rest besteht aus Pufferzeiten: Zeit, die Reisende einplanen müssen, um einen pünktlichen Transportablauf zu gewährleisten. Die Pufferzeit lässt sich in Prozesszeit und reine Pufferzeit unterteilen, die Störungen und Unsicherheiten entgegenwirkt [5].



Abbildung 1: Exemplarischer, zeitlicher Verlauf einer intermodalen Flugreise von Langen (Hessen) nach Berlin, durchgeführt vom Autor im Juni 2022.

Ursache für hohen Anteil an Pufferzeiten

Gründe dafür, dass selbst bei pünktlichen Verkehrsmitteln das Vier-Stunden-Ziel für europäische Flugreisen selten realistisch ist, liegen vielfach auf der Anreise zum Flughafen und den Prozessen bis zum Abflug:

- Ein wesentlicher Anteil von Flugtickets gerade von Freizeitreisenden ist fluggebunden und nur gegen Gebühr oder gar nicht umbuchbar, wenn der Reisende nicht pünktlich zum Check-In, zur Gepäckaufgabe oder zum Boarding erscheint. Diese Konsequenz sorgt dafür, dass Reisende in der Erwartung von möglichen Verspätungen bei der Anreise massive Pufferzeiten einplanen, um den Flug auf jeden Fall zu erreichen. Auch flexible Flugtickets helfen nicht, wenn am Betriebstag keine weitere Verbindung zum Ziel-flughafen angeboten wird. Im Falle eines Verpassens des Fluges wird dann eine Übernachtung auf eigene Kosten nötig.
- Es besteht bei den meisten Verkehrsträgern keinerlei Verbindungsgarantie zum anschließenden Flug. Selbst bei kombinierten Buchungsoptionen wie dem seit 30 Jahren bestehenden „Lufthansa Rail & Fly“ oder „TuiFly Zug zum Flug“ kann eine Zugverspätung dazu führen, dass der Reisende den Flug verpasst – die Kostenübernahme für eine Umbuchung oder ein Ersatzflugticket ist regelmäßig Gegenstand von nachträglichen rechtlichen Auseinandersetzungen und hängt auch davon ab, mit wieviel Pufferzeit der Zug planmäßig den Flughafen erreichen sollte [6][7].
- Für Reisende ist bei Beginn der Reise unklar, mit welchen Warte- und Prozesszeiten am Flughafen zu rechnen ist. Zwar geben einige Flughäfen aktuelle Wartezeiten an den Sicherheitskontrollen an – dies allerdings unverbindlich und meist ohne eine Prognose für den Zeitraum, in der der Reisende voraussichtlich vor Ort sein wird. Die Wartezeit bei der optionalen Gepäckaufgabe ist ebenso wenig vorab verbindlich bestimmbar. Der vielfach angebotene Vorabend-Check-In kann Unsicherheiten und Zeitaufwand am Reisetag reduzieren, sorgt aber für zusätzlichen Reise- und Zeitaufwand am Vortag, der der Bruttoreisezeit zugerechnet werden könnte.
- Selbst Elemente erfolgter Digitalisierung können das Risiko von Reisenden erhöhen, bei verpassten Flügen aufgrund unverschuldet langer Wartezeiten z.B. an der Sicherheitskontrolle eine Kompensation verweigert zu

bekommen: Checkt der Flugpassagier von unterwegs per Internet ein und fliegt mit Handgepäck, besteht im Gegensatz zum Check-In am Flughafen oft kein Beweis, dass er zeitgerecht am Flughafen war. Ein Check-In vor Ort wiederum ist bei einigen Airlines kostenpflichtig, Ryanair veranschlagt dafür z.B. aktuell 55 EUR [8].

Einfluss von Flugverspätungen auf die Erreichbarkeit eines Vier-Stunden-Ziels

Flugverspätungen können am Betriebstag die Reisezeit verlängern. Im Delay-reichen Jahr 2018 lag die durchschnittliche Abflugverspätung in Europa bei rund 15 Minuten, im Juni 2022 bei 24 Minuten [9][10]. Obwohl ein durchschnittlicher Delay nichts über individuelle Reiseverzögerungen aussagt, bewegt sich die Dimension dieser Verspätungen im Bereich von rund 6% bzw. 10% der avisierten vier Stunden. Ziel von „Flightpath 2050“ ist, dass langfristig die Delays (bei jedem Wetter) auf eine Minute gesenkt werden sollen [1]. Technische und betriebliche Maßnahmen, um dieses Ziel zu erreichen, sind derzeit nicht bekannt.

Neben der Delay-Reduktion bietet die Verkürzung von Flugstrecken noch Potential für eine Reiseverkürzung. Derzeit weisen Flüge in hochbelasteten Regionen wie Europa und den USA im Mittel eine Streckenlänge auf, die bezogen auf den Reiseflug rund drei Prozent über dem Großkreis liegt [4]. Theoretisch besteht das Potential einer durchschnittlichen Verkürzung um etwa 30 km und damit um rund 2,5 Minuten Flugzeit. Auf der anderen Seite ist messbar, dass Fluggesellschaften bei hohen Kraftstoffkosten mit reduzierten Fluggeschwindigkeiten fliegen, diese Entwicklung war beispielsweise im deutschen Luftraum zwischen 2004 und 2012 feststellbar. Solche Effekte könnten eine Verkürzung der Flugstrecken konterkarieren [11].

Die eher „politisch“ avisierte Delay-Minimierung bis 2050 auf nahezu Null und theoretische Flugwegverkürzungen summieren sich im Vergleich zum Juni 2022 auf maximal rund 26 Minuten in Europa. Eine messbare Zeitersparnis, die allerdings angesichts der deutlich größeren Pufferzeiten einer intermodalen Reise kein zentraler Bestandteil eines Maßnahmenpakets sein kann, das Vier-Stunden-Ziel zu erreichen, das derzeit schon in der Planung nicht zu 90% erreichbar ist.

Auswirkungen von Verspätungen im Luftverkehr auf Reisezeiten: Detailbetrachtung am Beispiel von 2022

Pünktliche Flüge

Im Jahr 2022 erreichten etwas mehr als 50% der europäischen Flüge ihr Gate oder ihre Position am Zielflughafen verfrüht oder pünktlich (d.h. verfrüht, exakt plangemäß oder bis spätestens 4 Minuten nach ihrer Planzeit, der Scheduled Time of Arrival STA) [12] (s. Abbildung 2). Unter Anwendung der u.a. flughafenseitig verwendeten Definition von Verspätungen („Verspätung“ ab Ankunft 15 Minuten nach der Planzeit) lag der Anteil bei etwa 72% [13].

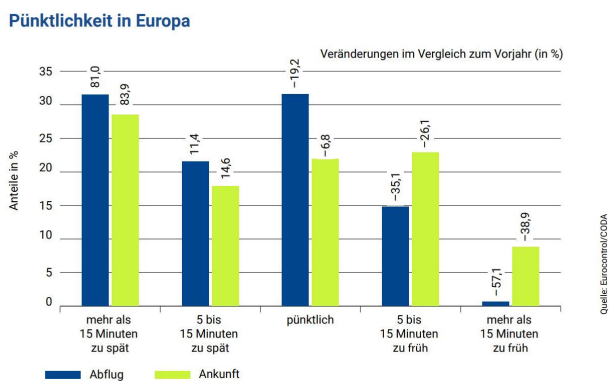


Abbildung 2: Pünktlichkeit von Flugreisen in Europa 2022 [12].

Rund 22% aller Flüge kamen sogar mit lediglich +/- 4 Minuten Ablage von ihrer planmäßigen Ankunftszeit am Zielort an [12]. Angesichts der vielen Monate im Voraus stattfindenden Planung von Off-Block-Time (OFB) und Blockzeit und zu dem Zeitpunkt nicht abschätzbarer und am Betriebstag kaum kompensierbarer Effekte wie Wind, Sichtbedingungen, Start- und Landerichtung, genutzte Piste, Rollzeit, Lage von Gate und Position sowie potentielle Vorverspätungen am Betriebstag ist dieser Anteil dieser „superpünktlichen“ Ankünfte weniger einer „perfekten“ Vorausplanung und Flugdurchführung geschuldet, sondern illustriert Gesetzmäßigkeiten der Stochastik.

Auswirkungen von verfrühten Ankünften

Knapp ein Drittel aller europäischen Flüge erreichten 2022 ihr Ziel 5 oder mehr Minuten früher als geplant [12]. Damit ergibt sich für einen maßgeblichen Anteil auch an intermodalen europäischen Flugreisen mit einem Flugsegment eine potentielle Verkürzung der intermodalen Reise gegenüber dem ursprünglichen Plan. Grund dafür sind frühere Anschlussverbindungen (Bus, Bahn, Taxi u.a.) zum endgültigen Reiseziel, die von den Reisenden ggf. in Anspruch genommen werden können. Voraussetzung dafür ist, dass der meist kleine Zeitgewinn einer früheren

Ankunft in folgenden Prozessen (Deboarding, Baggage Claim usw.) nicht wieder verloren geht.

Auswirkung von verspäteten Ankünften

Etwa 46% aller Flugreisen in Europa hatten 2022 einen Verzug von 5 oder mehr Minuten im Vergleich zur planmäßigen Ankunftszeit, etwa 28% mehr als 15 Minuten [12]. Die durchschnittliche Ankunftsverspätung pro verspätetem Flug betrug rund 18 Minuten [14], wovon rund 2,5 Minuten Verspätung in direkter und auf den Flug bezogenen Verantwortung der Flugsicherungen in Europa lag (AirTraffic Flow Management (ATFM) Delay Airport und En-Route, z.B. aufgrund von Überlastungen im Luftraum oder fehlendem Personal) [12]. In den 18 Minuten Ankunftsverspätung sind allerdings noch Folgeverspätungen (Reactionary Delay) enthalten, deren Zuschreibung auf ursächliche Verspätungsgründe schwierig ist. Der Anteil von Reactionary Delay an den Gesamtverspätung betrug 2022 rund 50% [12]. Dass 2022 derartig hohe Delay-Werte erreicht wurden, lag insbesondere am Ukrainekrieg: Seit dem Angriff Russlands stehen der ukrainische, der russische und der belarussische Luftraum für den zivilen Flugverkehr nicht mehr zur Verfügung und es herrschen sehr hohe Verkehrskonzentrationen im Gürtel um diese Zonen herum. Auch der militärische Flugverkehr in West- und Mitteleuropa nahm zu, was den für Zivilflüge verfügbaren Luftraum einschränkte [12]. Die schlechte Verspätungssituation wurde ebenfalls stark von der allgemeinen Herausforderung der Luftfahrtindustrie beeinflusst, die nun erneut hohen Passagier- und Flugzahlen nach dem Abflauen der COVID-19-Pandemie zu bewältigen [14]. Daneben führte die Inbetriebnahme neuer Flugsicherungssysteme unter anderem in Frankreich zu Engpässen bei der Flugsicherung [12].

Bezogen auf die im Haupttext angenommene, gesamte Reisezeit Tür-zu-Tür von rund 6 Stunden entspricht der durchschnittliche Delay von 18 Minuten für die rund 46% verspäteten Flüge einer zeitlichen Verlängerung der Reise von etwa 5%. Die europäischen Flugsicherungen trugen zu diesem Wert rund 1,7 Prozentpunkte oder knapp ein Drittel bei [12], wenn der Reactionary Delay nach den Anteilen des primären Delays auf alle primären Verursacher aufgeteilt wird. Das entspricht einer flugsicherungsbedingten Reisezeitverlängerung von 5 Minuten bei verspäteten Flügen.

Die Länge des durchschnittlichen Delays von rund 18 Minuten bei den verspäteten Flügen entspricht von der Größenordnung her den typischen



Abbildung 3: Einfluss einer hypothetischen Abflugverspätung auf den zeitlichen Reiseablauf Tür-zu-Tür unter Annahme einer Nutzung von regelmäßig und häufig fahrendem ÖPNV als letztem Verkehrsmittel.

Warte-, Prozess- oder Pufferzeiten einer Flugreise wie der Sicherheitskontrolle, Baggage Drop-Off, Warten am Gate oder Boarding/ Deboarding [15]. Diese schwanken stark in Abhängigkeit von Flugzeuggröße, Auslastung, Flughafen, Tageszeit und Vorflugverspätungen sowie der Personaldisposition beim Baggage-Handler, an der Sicherheitskontrolle und an weiteren relevanten Stellen, z.B. bei der Bedienung der Fahrgastbrücke.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Für eine intermodale Reise in Europa mit einem Flugsegment dürften die meisten Flugverspätungen selbst im schwierigen Jahr 2022 keine nennenswerte Relevanz für die Gesamtreisedauer gehabt haben (s. Abbildung 3).

Anders stellte es sich dar, falls am Ziel Anschlussflüge erreicht werden sollen, gerade wenn sie innerhalb oder nahe der MCT (Minimum Connecting Time) geplant sind. Oder wenn nachfolgend andere Reiseelemente genutzt werden, die nur eine geringe Frequenz aufweisen (z.B. Fernzüge) und / oder die bereits fest und unabänderlich gebucht sind.

Geschwindigkeit, Nahtlosigkeit oder Nachhaltigkeit?

Offen ist, welche Elemente des formulierten Ziels von „Flightpath 2050“ von den Reisenden wie hoch priorisiert werden und ob nicht die Vorteile einer nahtlosen Reise ohne überdimensionierte Puffer- und Wartezeiten wichtiger eingestuft werden als der reine Zeitaspekt „vier Stunden Tür-zu-Tür“. Ebenfalls kann in Zukunft bei der Entscheidung von Reisenden über intermodale Verbindungen ggf. deutlich wichtiger sein als heute, welche Umweltauswirkungen mit der Reise verbunden sind [16].

Dies könnte angesichts der aktuellen Umweltbilanz von Verkehrsträgern dazu führen, dass die Reisenden von sich aus vermehrt auf Flugsegmente verzichten und intermodale Bahnreisen bevorzugen.

Es ist nicht sicher, ob Flughafenbetreiber ein ausgeprägtes Interesse an dem „Flightpath-2050“-Ziel von maximal vier Stunden Reisezeit haben, denn das wichtige Airport-Retail-Geschäftsmodell setzt voraus, dass der Fluggast eine signifikante Wartezeit vor Abflug am Flughafen verbringt [17]. Airlines wiederum stehen nicht in Konkurrenz zueinander über Reisezeiten von Tür-zu-Tür der Reisenden, sondern neben dem Ticketpreis über Flug- bzw. Blockzeiten, so dass eine reibungslosere Intermodalität keine signifikante Marktanteilsrelevanz verspricht.

Rolle der Intermodalität und Elemente einer „nahtlosen“ Reise

Eine intermodale Reise mit möglichst geringen Warte- und Pufferzeiten ist zusammen mit einem nahtlosen Übergang zwischen intermodalen Reiseanteilen der Schlüssel zu einer Verkürzung von Flugreisen.

Es sind etliche Stoßrichtungen sichtbar, um nahtlose und schnellere intermodale (Flug-)Reisen von Tür-zu-Tür in Europa zu ermöglichen (siehe auch Abbildung 3):

Intermodale Buchungen und verkehrsträgerübergreifende Navigation
▪ Kombiniert buchbare Transportprodukte inkl. ÖPNV mit Anschlussgarantie zwischen allen Verkehrsträgern und automatischer Anpassung von Verbindungen bei (prognostizierten oder eingetretenen) Störungen und Verspätungen ▪ App-gestützte, verkehrsträgerübergreifende Navigation inkl. Passagierführung an den Flughäfen / Bahnhöfen
Genauere und verbindlichere Prozessprognosen
▪ Höhere Genauigkeit und konstante Live-Versorgung mit Prognosezeiten, bezogen auf einzelne Verbindungen und Prozesse (z.B. Check-In, Gepäckabgabe, Sicherheitskontrolle, Wegezeiten zum Gate) ▪ Genaue, einzelflugbezogene Prognosen von Off-Block-Zeiten, Rollzeiten, Startzeiten, Landezeiten und On-Block-Zeiten mit angemessenem Vorlauf ▪ Verbindlichkeit von Prognoseinformationen („Quasi-Garantie“, dass die Prognosezeiten zutreffen)
Verkehrsträgerübergreifende Versicherung gegen Prozessverspätungen
▪ Versicherung, die im Falle einer Verspätung bei nicht kombiniert gebuchten Reiseanteilen Schutz bzw. Kompensation bei möglicherweise verpassten Verbindungen bietet (Übernahme von Mehrkosten durch Umbuchung, ggf. Übernachtung und Transport)
Schneller und unkomplizierter Gepäcktransport
▪ Separater, sicherer und pünktlicher Transport von aufzugegebenem Gepäck von Tür-zu-Flug oder von Tür-zu-Tür innerhalb Europas.

Beispielhafte Lösungen

In vielen dieser Felder gibt es isolierte Lösungen, die derzeit entweder in der Entwicklung oder regional beschränkt sind und vielfach aus separaten Geschäftsmodellen, Web-Portalen oder Apps bestehen:

- „Lufthansa Express Rail“ bietet eine Umsteigegarantie bei Anfahrt von derzeit 24 deutschen Städten zum Flughafen Frankfurt mit der Deutschen Bahn. Ab dem 1.8.2022 ist die Deutsche Bahn intermodaler Partner der Star Alliance, d.h. Zubringerzüge sind auf dem Flugticket ausgewiesen.

Allerdings fehlt bei dem Angebot eine entsprechende intermodale Option für die meist ebenfalls gebuchte Rückreise aus dem Ausland [18].

- In Heathrow, Genf und Zürich bietet die Firma „airportr“ in Zusammenarbeit u.a. mit British Airways und der Swiss einen Service an, bei dem Gepäck daheim abgeholt, eingecheckt und direkt zum gebuchten Flug gebracht wird [19].
- Innerhalb Deutschlands kann Gepäck bis 31,5 kg mit dem Paketdienstleister Hermes von Tür-zu-Tür transportiert werden – unabhängig von der Wahl des Reisemittels durch den Reisenden [20].
- Für die Flughäfen Frankfurt, München, Hamburg, Düsseldorf und Münster-Osnabrück bietet die App „Passngr“ Flug- und Navigationsinformationen sowie Informationen zu Anschlussverkehr. Die App berechnet auch die Wegezeit unter Berücksichtigung von Wartezeiten an der Sicherheitskontrolle [21].
- Verschiedene deutsche Flughäfen bieten seit kurzem Reservierungen für die Sicherheitskontrolle an, um Wartezeiten zu minimieren. Der Flughafen Berlin erlaubt seit August 2022 zwischen 72 Stunden und 60 Minuten vor dem Flug die Online-Buchung eines Zeitfensters für die Sicherheitskontrolle im Terminal 1. Vergleichbare Service gibt es mittlerweile u.a. in Hamburg, Köln-Bonn, Düsseldorf und Hannover. Allerdings verfällt die Buchung, wenn es z.B. zu Verzögerungen bei der vorherigen Gepäckabgabe kommt [22][23][24].
- Bereits 2014 entwickelte das DLR Institut für Flughafenwesen (Deutsches Forschungszentrum für Luft- und Raumfahrt) mit der TU Hamburg-Harburg ein Navigations- und Informationssystem, das Passagiere so durch den Flughafen führt, dass kaum Wartezeiten entstehen und der Passagier verzögerungsfrei vom Betreten des Terminals bis hin zum Abfluggate die Prozesse durchläuft [25].
- Die DFS Deutsche Flugsicherung entwickelte 2019 eine KI-gestützte Prognose der Landezeit von Anflügen auf den Flughafen München. Die Güte der Vorhersage überbot die von derzeit eingesetzten operativen Systemen deutlich [26].
- Über das Web-Portal „Rome2Rio“ lassen sich intermodale Reisen planen und Tickets kaufen. Intermodale Reisen sind allerdings nicht als Paket buchbar. 2016 publizierte „Rome2Rio“ eine verkehrsträgerübergreifende, weltweite Isochronenkarten unter Einbezug von

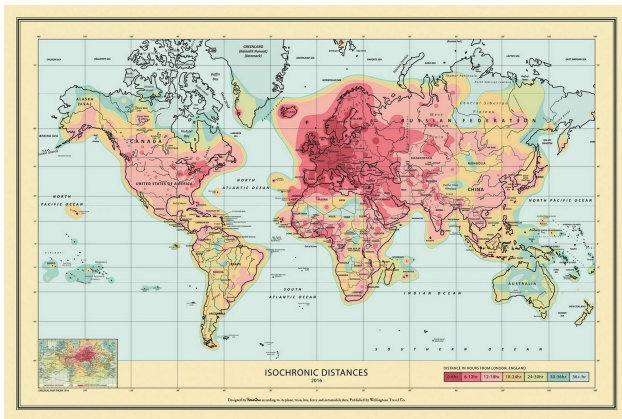


Abbildung 4: Isochronenkarte intermodaler Flugreisen ab London, Quelle: rome2rio, 2016 [27].

Insbesondere über neue Digitalisierungsoptionen, den Einsatz von KI und verkehrsträgerübergreifende Regelungen könnten Puffer- und Prozesszeiten reduziert und Reisen planbarer, schneller und einfacher werden.

Die Auswirkungen von Verspätungen im Luftverkehr sind in Relation zur Reisezeit vergleichbar gering und liegen deutlich unterhalb der planmäßig und systematisch vorgesehenen Puffer- und Wartezeiten für Flugpassagiere.

Es gibt wie schon bei Publikation der Ziele von „Flightplan 2050“ ein deutliches Potential, die Planbarkeit, Nahtlosigkeit und Geschwindigkeit von



Abbildung 5: Potentiale zur Beschleunigung und Vereinfachung intermodaler Flugreisen.

Luftverkehr – in Adaption der Karten von F. Galton und J. G. Bartholomew, die vor über 100 Jahren entstanden (s. Abbildung 4)[27].

- Virtual Interlining-Anbieter wie z.B. „KIWI“ oder „dohop“ ermöglichen es Reisenden, mehrere Flüge unterschiedlicher Fluggesellschaften zu kombinieren und unter den Bedingungen zu fliegen wie bei Code-Share-Flügen. Intermodale Buchungen sind nicht möglich [28][29].

Ausblick und Erwartungen

Flüge sind häufig ein isolierter Bestandteil einer intermodalen Reise. Vom Ziel, innerhalb von vier Stunden in Europa „nahtlos von Tür-zu-Tür“ reisen zu können (s. Abbildung 5), ist die Realität weit entfernt. Es fehlen Angebote für intermodalen Reisen von Tür-zu-Tür, mit App-gestützter, selbstständiger Neuplanung der Anschlussverbindungen von Verkehrsträgern, auch und gerade bei Verspätungen und Störungen.

intermodalen Reisen in Europa voranzutreiben. Entsprechende technische Möglichkeiten bestehen und haben sich teilweise bereits im regional begrenzten Einsatz oder im Feldversuch bewährt. Offen ist, wann und durch wen die bestehenden Möglichkeiten integriert und allen europäischen Reisenden zur Verfügung gestellt werden. Ob eine deutliche Beschleunigung von Reisen damit erreicht wird, deren Umweltverträglichkeit gesteigert werden kann oder intermodale Reisen für die Reisenden einfacher werden, kann derzeit nicht gesagt werden.

Anmerkungen zur Veröffentlichung

Der vorliegende Artikel beruht auf einer kürzeren Fassung, die zuvor schon in [30] veröffentlicht wurde.

Abkürzungsverzeichnis

ATFM	Air Traffic Flow Management
DLR	Deutsches Forschungszentrum für Luft- und Raumfahrt
KI	Künstliche Intelligenz
MCT	Minimum Connecting Time
OFB	Off-Block-Time
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
STA	Scheduled Time of Arrival

Referenzen

- [1] "Flightpath 2050, Europe's Vision for Aviation. Report of the High-Level Group on Aviation Research", 2011.
- [2] Grimme, W., Maertens, S. "An analysis of the 4-hour-goal using flight schedules and origin-destination passenger demand data", Deutsches Forschungszentrum für Luft- und Raumfahrt, 2019.
- [3] Mayer, C, „Deutsche Flughäfen im Vergleich: So viele Stunden solltet ihr vor Abflug an den Check-in-Schaltern sein“, URL: <http://www.businessinsider.de>, abgerufen 18.7.2022.
- [4] „Comparison of air traffic management related operational performance U.S./Europe“, EUROCONTROL, FAA, 2019.
- [5] Nickel, F., „Possibilities For Shortening Travel Times By Reducing Buffer Times In The Process Chain“, Bachelorarbeit, Hochschule Worms, 2020.
- [6] „TuiFly Zug zum Flug“. Abschnitt: „Inkludierte Leistungen“, URL: <http://www.tui.com/hilfe/zug-zum-flug-tuifly/>, abgerufen 18.7.2022.
- [7] Amtsgericht München (Urteil vom 28.05.2019, Az.: 114 C 23274/18), Bundesgerichtshof (BGH) (Urteil v. 29.06.2021, Az.: X ZR 29/20).
- [8] Gebührentabelle Ryanair, URL: <https://www.ryanair.com/at/de/nutzliche-infos/service-center/gebuehren>, abgerufen 18.7.2022.
- [9] Walker, C., "CODA Digest All-causes delay and cancellations to air transport in Europe Annual report for 2018", EUROCONTROL, 2019.
- [10] Pressekonferenz der DFS Deutschen Flugsicherung GmbH, auf Basis von CODA-Daten, 20.7.2022.
- [11] Lindner, M., „Entwicklung eines Algorithmus zur Anpassung der Vorhersage von Trajektorien an spezifische Flugmanöver von Luftverkehrsgesellschaften“, Studienarbeit, TU Dresden, 2013.
- [12] CODA-Digest, "All-Causes Delays to Air Transport in Europe Annual 2022", EUROCONTROL 2023, URL abgerufen 15.11.2023: <https://www.eurocontrol.int/publication/all-causes-delays-air-transport-europe-annual-2022>.
- [13] Website OAG Aviation Worldwide Limited, URL: <https://www.oag.com/airline-on-time-performance-defining-late> abgerufen 13.11.2023.
- [14] Luftverkehr in Deutschland, Mobilitätsbericht 2022, DFS, 2023.
- [15] Nickel, F. (2020): Possibilities For Shortening Travel Times By Reducing Buffer Times In The Process Chain. Bachelorarbeit, Hochschule Worms.
- [16] Loepp, B., Ziegler, J., „Empirische Bedarfsanalyse zur intermodalen Navigation und dem Einsatz von Informationssystemen zur Förderung ihrer Attraktivität“, 2017.
- [17] Kiziltas, Ö., „Airport Retailing an europäischen Flughäfen am Beispiel des Flughafens Hamburg“, Bachelorarbeit, Hochschule Mittweida, 2014.
- [18] Pressemitteilung Deutsche Bahn, 4.7.2022, URL: https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/DB-wird-erster-intermodaler-Partner-der-Star-Alliance-8129672, abgerufen 13.11.2023.
- [19] Website „Airportr Technologies Limited“, URL: <https://airportr.com/de/>, abgerufen 13.11.2023.
- [20] Website Hermes Germany GmbH, URL: <https://www.myhermes.de/preise/gepaeck-und-koffer/>, abgerufen 13.11.2023.
- [21] Website „InfoGate Information Systems GmbH“, URL: <https://www.passngr.de/de/>, abgerufen 13.11.2023.
- [22] Pressemitteilung Flughafen Berlin Brandenburg GmbH, 25.8.2022, URL: <https://ber.berlin-airport.de/de/news/2022-08-25-per-zeitfenster-zur-sicherheitskontrolle.html>, abgerufen 13.11.2023.
- [23] Wirtschaftswoche, Artikel „Wie Sie diesen Sommer am Flughafen Zeit sparen“, 5.6.2023, URL: <https://www.wiwo.de/erfolg/trends/tipps-fuers-fliegen-wie-sie-diesen-sommer-am-flughafen-zeit-sparen/29174164.html> abgerufen 13.11.2023.
- [24] Madsack Travel GmbH & Co. KG, Artikel „An diesen Flughäfen kannst du jetzt Sicherheitsslots buchen“, 23.10.2023, URL: <https://www.reiseporther.de/reisenews/flughafen-in-deutschland-hier-kannst-du-sicherheitsslots-buchen-YEUJLTWNDTIZ7JJAC54XEGYOPA.html> abgerufen 13.11.2023.
- [25] Oppermann, R., „Anforderungen an die Luftverkehrsinfrastruktur an regionalen Verkehrsflughäfen und Verkehrslandeplätzen in Deutschland unter Berücksichtigung des Flightpath 2050“, TH Wildau, 2017.

- [26] Graul, C., „Analyse und Vergleich der Estimated Landing Time (ELDT) zwischen Anbietern im Internet und Air Navigation Service Providern (ANSPs)“, Bachelorarbeit, Hochschule Darmstadt, 2019.
- [27] Website „Zukunft Mobilität“, „Immer schneller und weiter: Reisezeiten im Jahr 1881, 1914 und 2016“, URL: www.zukunft-mobilitaet.net/153730/vergangenheit-verkehrsgeschichte/erreichbarkeitskarten-isochronen-1881-2014-london/ abgerufen 18.7.2022.
- [28] Website Kiwi.com s.r.o., URL: <https://www.kiwi.com/de/>, abgerufen 13.11.2023.
- [29] Website Dohop ehf., URL: <https://www.dohop.de/> abgerufen 13.11.2023.
- [30] Buxbaum, J. (2022). Einbindung des Luftverkehrs in intermodale Reisen. *Internationales Verkehrswesen*, 74(3), S. 66–69.

Trajectory Prediction and Aircraft Performance Modelling

Matthias Poppe, Thomas Pütz, Longbiao Ma*, Yingchao Xiao* & Weiyu Jiang*
 (*State Key Laboratory of Air Traffic Management System and Technology, Nanjing, China)

Deutsche Zusammenfassung

Der Artikel beschreibt ein Modell für die Vorhersage der vertikalen Trajektorie vom Take Off bis zum Top of Climb. Das Flugleistungsmodell basiert auf einem physikalischen Gesamtenergiemodell und wurde für die internationalen Flughäfen Baiyun (China) und München validiert.

Dieses Modell wurde mit den Anfangsparametern initialisiert, die die Flugzeugleistung und die Umgebungsbedingungen berücksichtigten. Für den Speed Schedule wurden die Calibrated Airspeed (CAS) und Machzahl aus einem Deep Neural Network abgeleitet. Die Masse wird mit einem Optimierungsansatz der kleinsten Quadrate geschätzt. Die Wind- und Temperaturbedingungen werden in zeitlicher, lateraler und vertikaler Dimension berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen einen Vorhersagefehler in der Größenordnung von 600 bis 1000 Fuß mittlerer absoluter Fehler, der relative Fehler liegt zwischen 1,5 % und 3 %. Indem einige der Fehlerquellen adressiert wurden, konnte der Fehler der Vorhersage weiter auf die Größenordnung von 400 bzw. 500 Fuß (Baiyun bzw. München) für den A320 reduziert werden. Dies entspricht einem relativen Fehler von etwa 1% bis 1,5 %, bezogen auf einen Steigflug von Flight Level 100 bis Flight Level 300.

Introduction

The aircraft performance and the prediction of the aircraft trajectory are key enablers for future ATM trajectory-based operations. The lateral and vertical flight profile depends on many factors of different nature, such as the aircraft intent, the aircraft current state, the atmospheric conditions, and last but not least human air traffic controller and pilot interventions. This results in an operational and technical uncertainty [1] where many of these factors are not known or can only be estimated roughly. The most obvious factors are:

- Technical uncertainties (e.g. Take off weight and fuel flow related mass changes during flight

progress are not known to ATC)

- Physical uncertainties (e.g. the dynamic atmospheric conditions such as wind, temperature, turbulences, vorticity)
- Operational uncertainties such as Cost Index of the flight, manual interventions by the pilot and clearances of the air traffic controller.

Despite all the progress made during the last years, the resulting uncertainty may still be too high for certain safety critical applications such as Conflict Detection or Conflict Resolution.

At DFS, BADA is currently used to model the planning trajectory in the upper airspace. The reference mass for specific aircraft types is modified to match the observed average aircraft performance behavior. This was done by means of statistical analysis. However, due to the reasons outlined, the resulting trajectory prediction is yet not always sufficient, in particular for vertical aircraft maneuvers.

Model Description

The approach follows in general the large-scale multi-airport study from R. Alligier [2]. Here, the focus was on two busy major hub airports, Baiyun (ZGGG) in China and Munich (EDDM) in Germany for validation and application of this approach. Figure 1 shows the model for the trajectory prediction (TP).

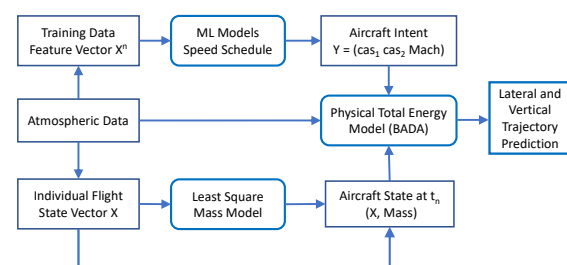


Figure 1: Trajectory Prediction Model.

The prediction of the trajectory is based on a physical Total Energy Model (TEM). The Base of Aircraft Data

(BADA) from EUROCONTROL [3] is one of the most prominent representatives and was used in this study. The best knowledge of the current aircraft state at time t_p and the intent of the aircraft is important for accuracy of the TEM and the TP. This intent in the climb phase can be described by the speed schedule with the constant speed values of the Calibrated Airspeed (CAS) and above the crossover altitude with the Mach number. The current state vector is described by the estimated mass, the speed, altitude & climb rate and track and roll angles. The current atmospheric conditions (wind, temperature) will also be considered because they impact the aircraft performance [4].

This approach is based on the assumption that only data available today shall be used i.e. in the absence of technology that is planned to be introduced in the coming years like ADS-C. To obtain the current aircraft state including the mass, Mode S Enhanced Surveillance data plus radar data and flight plan data were used. The mass can be estimated at early flight stages by applying the *Least Square* method (refer to [5]). The atmospheric data sources are the nowcast and forecast values of the meteorological data provider. All data were used to initialize the TEM and to predict the trajectory in the climb phase.

Speed Schedule

A typical climb profile from Take Off to the Top of Climb (ToC) takes place in different flight phases. The first acceleration phase immediately after Take Off usually ends by reaching an Indicated Airspeed of 250 knots in most operational environments (applicable for ZGGG and EDDM). As soon as 10000 feet altitude are reached, a second acceleration phase follows towards the designated CAS which is being referred to as CAS2. For the further climb segment, the aircraft maintains the constant CAS2 until it reaches the crossover altitude. Above this altitude, the phase of constant Mach starts.

The values of CAS2 and constant Mach are referred to as speed schedule or flight intent. They depend on many factors such as aircraft type, engines, atmospheric conditions or Cost Index and settings of the Flight Management System [6].

In some cases, different CAS values may be applicable for a flight. This will cause problems for the prediction because it is not known at which flight level the change of CAS will take place. Reasons may be the change of target speed by the pilot or an Air Traffic Controller speed clearance.

Airlines may optimize the speed profile beyond the FMS planned optimum for different reasons like fuel consumption, considering atmospheric conditions, or engine usage (derated climb power) for maintenance cost, considering planning tools or alternative procedures.

If the constant segment begins later than assumed (after leaving 250 knots restriction below FL100), a rather poor prediction is expected. Figure 2 shows the Flight level distribution for the A320 with the begin of acceleration from 250 knots towards CAS2. As expected, the majority of flights starts acceleration around FL110 to FL115. However, a long tail of this distribution was also observed.

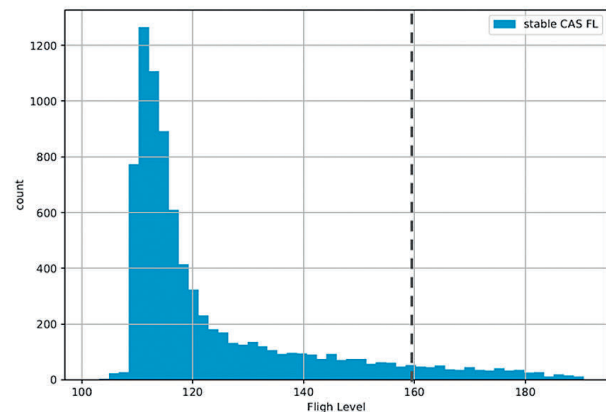


Figure 2: Distribution of FL with begin of acceleration to constant CAS2.

Neural network for CAS and Mach inference

The speed schedule for climbing aircraft can be described by the constant CAS and Mach target speeds. As long as ATC cannot obtain these speeds either from the airline or via aircraft downlink, statistical learning and inference methods can be applied as alternative means used.

Figure 3 shows the empirical distributions of the target CAS, derived from about 12k randomly selected EDDM departures in 2019 for the A320 aircraft type. A peak around 300 knots was observed which is slightly below the BADA CAS reference value of 310 knots. Some aircraft maintained a speed of 250 knots, possibly due to flights at low FL to other domestic airports in Germany.

From a correlation analysis between the available features and the target values, the following conclusions were derived for the Deep Neural Network (DNN) in order to infer the speed schedule:

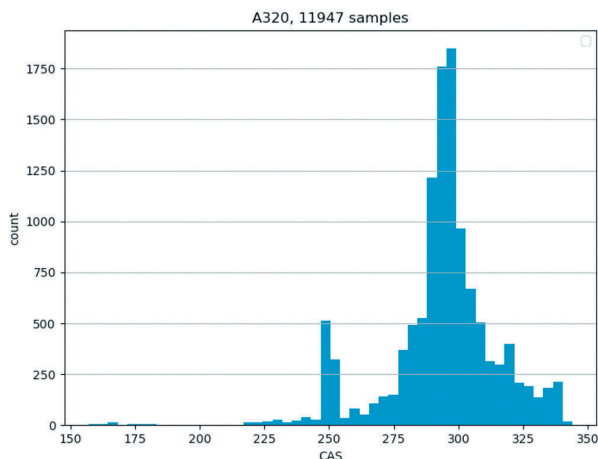


Figure 3: CAS target distributions A320.

Helpful static features from the Flight Plan:

- Destination airport (distance),
- Cruise Speed,
- Cruise FL,
- Aircraft type

Helpful dynamic trajectory features:

- Indicated Air Speed, True Air Speed
- Piecewise aggregated approximation distance to the BADA reference profile (for details, refer to [7])

A Deep Neural Network (DNN) was developed with the Python libraries Keras and Tensorflow to derive the CAS2 and Mach speeds from the downlinked Mode S EHS data for each individual flight. The network architecture consists of six hidden layers with a decreasing number of nodes.

A Mean Absolute Error (MAE) of the CAS in the magnitude of 3.5 to 4 knots was obtained. The Mach MAE was in the magnitude of 0.015.

The Reference Model

The predictions were compared to the „standard BADA“ model. It was expected that the TP with individual flight values for mass, CAS, Mach and actual atmospheric conditions should perform better than BADA with the default values for the specific aircraft type. The Total Energy Model equations based on BADA were implemented. This was regarded as a black box fed with pre-knowledge gathered from the

observed trajectory, including

- estimated mass based on the Least Square approach,
- temperature profile (difference to International Standard Atmosphere)
- wind conditions per altitude layer
- initial CAS value at Take Off
- Obtained speed schedule from the DNN, i.e. constant CAS value (corresponds to Cost Index of the aircraft) and Mach number.

The input parameters were provided by means of configuration files for each flight. A common data pool with ZGGG and EDDM departures was established with about 1k flights each for the most frequent aircraft types A320 and B738 (in total about 4k flights) at these airports. Moreover, at DFS, about 80k departures from EDDM in 2019 were available for training of the neural network and additional studies.

Two scenarios were distinguished and compared to each other (refer to Figure 4).

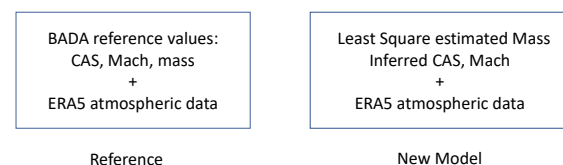


Figure 4: TP Scenarios.

The reference scenario uses the BADA reference values for the speed schedule and the aircraft mass. In the second scenario the mass was derived from assumed pre-knowledge of the trajectory, obtaining CAS and Mach values from the DNN and using actual atmospheric conditions derived from re-analysis data (ERA5).

Wind Impact

For estimating the wind impact (refer also to [4]), ISA temperature conditions ($\Delta t = 0$) were used, a Take Off CAS of 165 knots, a constant CAS of 310 knots and a mass of 64 tons (reference values) for A320. The climb segment was modelled with these parameters and the time from Take Off to FL300 was measured in seconds. The wind strength refers to a continuous increase of the wind value from 0 knots to 25 and 50 knots in FL300 (a constant wind does not change the climb performance).

If there is a wind gradient opposite to the direction of flight, i.e. headwind, a better climb performance was observed in the magnitude of 20 seconds (25 knot wind speed) and 40 seconds respectively (50 knots wind) from Take Off to FL300.

If there are tailwind conditions, the climb performance becomes worse, and the aircraft takes about 20 and 40 seconds longer to climb to FL300 (independent of the lateral position). In reality, there will be varying wind conditions in time and in lateral and vertical dimensions, which means a more complex situation. However, the impact of the wind on the vertical TP needs to be taken into account, as this experiment shows the order of magnitude.

Temperature Impact

The deviation of the actual ambient temperature T_{act} compared to the International Standard Atmosphere (ISA) temperature will be taken into account.

$$\Delta T = T_{act} - T_{ISA}$$

Figure 5 shows the variation of temperature ΔT over flight level for three randomly selected flights in spring 2019. The varying deviations to the ISA temperature can clearly be seen. It can be concluded that

1. Ground ΔT can not represent ΔT at all flight levels;
2. ΔT has a strong correlation with time and FL.

Therefore, it was agreed to update ΔT every 10 FL for each trajectory. All wind and temperature data are taken from [2] and were matched to the trajectories (nearest neighbor algorithm).

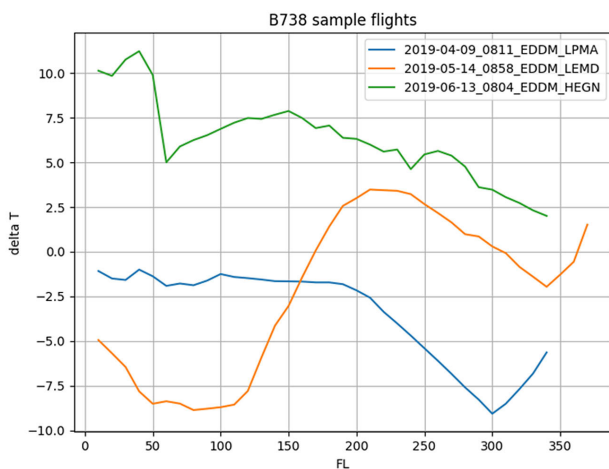


Figure 5: Examples of variation of ΔT at EDDM.

Mass estimations

In [8], the mass estimation approach has been explained. For this estimation, only today's available Mode S EHS data were used. The mass distribution at airports ZGGG and EDDM for selected aircraft types shows a Gaussian-shaped curve with a mean close to the BADA reference values for these types.

Regarding mass estimation, it can be concluded that:

- The distributions become narrower as the flight level increases, providing more data points to estimate the mass -> the accuracy improves
- The estimates seem to be too high and erroneous in some cases resulting in a mass greater than the maximum take-off mass. This is possibly due to the processing of level off segments and/or human intervention.

Metrics used for Evaluation

The quality of the predicted trajectory compared to the observed trajectory needs to be evaluated. Both trajectories can be regarded as continuous functions f and g . The difference over a closed interval from Take Off to a pre-defined altitude, in this case FL300 has been evaluated. To ease the comparison and the integration, the x-axis is divided into equidistant intervals of one second.

The L_1 Norm was applied for two continuous functions f, g in the closed interval $[a, b]$, $a < b$ with

$$d_1(f, g) = \int_a^b |f(x) - g(x)| dx$$

In the case of equidistant intervals Monte Carlo integration for solving the integral was used.

In this case, the L_1 norm and the MAE are equivalent and measure the cumulative error. It has the advantage that the unit of the measured variable (Flight Level) can be kept. Figure 6 shows an example of a flight from EDDM to LPMA for which the observed and predicted trajectories (blue dotted line) are plotted in one diagram. The Calibrated Air Speed (CAS) is also added for both cases (yellow dotted line for predicted CAS). The FL difference is shown in the part below. The area under the curve is the cumulated sum between FL80 as starting point and FL300 (green color). The difference function may take any arbitrary shape. The integral provides a single metric for the overall match between true and predicted trajectory.

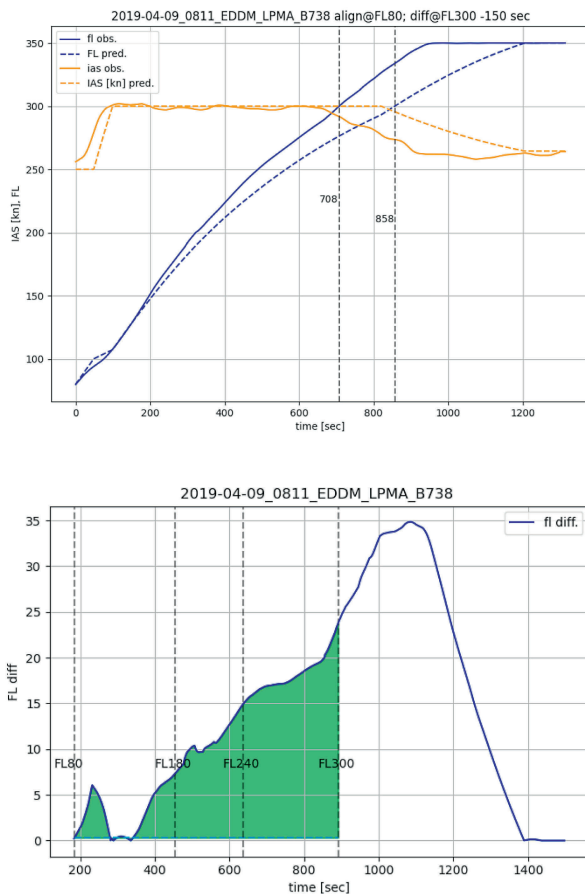


Figure 6: Example of observed (true) and predicted trajectory and the difference.

Trajectory Prediction Results

The results for the A320 trajectories from the TP Data Pool (about 1k A320) are presented in table 1. It shows the Mean Absolute Error (MAE) for the trajectories from starting FL120 to FL300 and the prediction error with a Look Ahead horizon of 360 seconds. Figure 7 shows an example of the distribution of the MAE with inferred CAS and estimated mass at FL120.

The overall prediction error is in the range of 6–8 FL for the A320. The prediction with the BADA reference values for speed and mass lead to an error which is on average about 15% higher. The biggest improvements by applying the new model were obtained with 2019 data for heavy Airbus aircraft types, reducing the error from 19.4 FL to 14.4 FL.

For the heavy aircraft, the error distribution is biased towards negative values. The MAE has been calculated as difference between true FL and predicted FL.

Table 1: TP results for A320.

	Mean Absolute Error		Error in 360 seconds [FL]	
	Reference	New Model	Reference	New Model
A320 (FL120)	7.3 FL	6.3 FL	8.9 FL	7.8 FL

Thus, negative values indicate a higher predicted FL than the achieved FL.

If the distribution is shifted to eliminate this bias, the MAE for the TP drops to 7.9 FL with the new model. This may be an indication that the maximum thrust assumption for heavy aircraft (HVY) should be re-considered. Other possible reasons may be different Cost Index settings and thus different speed schedule because airlines try to climb at minimum cost. However, it shows that the MAE can be further reduced with more realistic model assumptions.

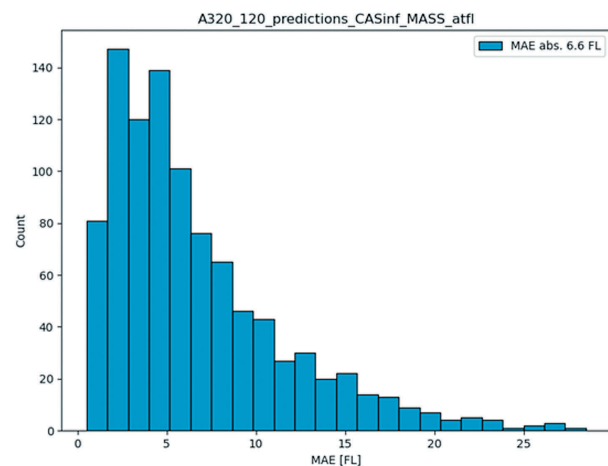


Figure 7: distribution of mean absolute error, EDDM, A320 departures.

Situation at ZGGG airport

The same TP model was used to predict the trajectories at ZGGG airport. The operational environment and the procedures are different between the two airports (e.g. number of level off segments from Take Off to the Top of Climb which is less in EDDM).

The number of flights reaching the prediction horizon of FL300 without restriction varies between 60% and 76% in EDDM (2019 figures), while in ZGGG between 15% and 20% unrestricted climbs were observed. This makes the prediction more challenging because

the proposed method can only be used to estimate mass during climbing segments.

However, most of the error values are in the same order of magnitude as those for Munich airport. To address the possible error sources the effect of late acceleration of flights to their constant CAS2 value was studied, i.e. at a later FL than assumed after leaving FL100 at 250 knots IAS.

Table 2 shows the results. While the MAE for all flights is 6.3 FL for a six-minute prediction horizon, it reduces to 5.1 FL if a pre-knowledge of the level is assumed at which the acceleration to the CAS2 takes place (extracted from the observed trajectory).

Table 2: Impact of late acceleration at ZGGG.

	Error in 360 seconds [FL]			
	All flights	All flights with pre-knowledge acc. FL	Filtered flights with late acc.	Filtered flights with pre-knowledge acc. FL
A320 (FL120)	6.3 FL	5.1 FL	10.7 FL	4.6 FL

To estimate the error for flights with a late acceleration these flights were filtered (with the wrong assumption of acceleration after leaving FL100). The error increases to 10.7 FL. Assuming knowledge of the correct acceleration FL, the MAE for these filtered flights decreases to only 4.6 FL.

It can be concluded that the knowledge of the acceleration FL plays a major role for those flights while the overall impact to all flights is still visible but much smaller.

Also the impact on the TP was analysed in terms of the inference CAS and the true CAS value. If the true CAS is used instead of the inference CAS, the performance is much better. It can be concluded that the inaccurate inference CAS is a major error source for ZGGG. However, as these experiments also showed, the inaccurate inference CAS is not a major error source for EDDM.

Analysis of possible error sources

The developed model works well for the majority of departures with a MAE less than 6–8 FL in many cases for a prediction horizon of 6 to 10 minutes. However, sometimes the error can be substantially bigger. Operational and technical/model inherent errors can be distinguished.

The major operational error sources for TP are:

- Human intervention: the Air Traffic Controller needs to intervene in case of potential conflicts or flow measures and sequencing. The pilot may change the flight trajectory at own discretion.
- Operational procedures: certain restrictions may be applicable to the Standard Instrument Departure routes at each airport, in terms of speed and/or level constraints and the routing.

The major technical error sources for TP are:

- Mass estimation: the method is volatile close to level off segments and cannot be estimated during level off segments
- CAS and Mach inference: training data is critical, as it was observed that training data from EDDM lead to a rather big error for ZGGG
- Atmospheric values: wind and temperature Re-analysis data are hourly averaged data (computed, no real data);
- The FL at which acceleration takes place: the acceleration takes place at higher FL than assumed in the model. This is applicable for 13% of the A320 flights and 7% of the B738 flights in the used traffic samples.
- Model assumptions: climb with constant CAS/Mach (sometimes there are unstable CAS and climb segments with different two or more CAS values) and climb with maximum thrust (some heavy aircraft seem to use different climb thrust settings)

Conclusions and future Work

The Total Energy Model has been used for prediction of climbing trajectories, initialized with more accurate values compared to the BADA reference figures. The accuracy of the trajectory prediction was analyzed. As a metric for the resulting error distribution, the Mean Absolute Error was selected. This error depends on aircraft type, the start FL of the prediction and other factors. In general, the error is in the magnitude of 6–10 FL for a six-minute look ahead time. The biggest improvements were obtained for heavy aircraft.

Some of the model's inherent error sources were identified like poor mass estimation or inferred speeds that were not accurate. Also, some of the assumptions were questioned and analyzed like acceleration to the final CAS after passing FL100 during climb.

By repeating the predictions with more realistic parameters in these cases, the MAE dropped further to the magnitude of 4 FL for A320 at ZGGG and 5 FL for A320 at EDDM.

Parameters that need most attention because they are critical in terms of prediction sensitivity, are the aircraft mass, the acceleration flight level and the constant CAS during climb. It can be concluded that the highest accuracy with smallest error of the developed method could be achieved with knowledge of the critical parameters, that could be obtained for example by downlink from the aircraft with ADS-C EPP¹.

Since a bias in the error distributions for heavy aircraft in EDDM was identified, some of the assumptions like maximum thrust need to be re-considered for those aircraft types. A thrust factor less than 1 may be more appropriate (modelling “derated climb thrust” settings).

It can also be concluded that there seems to be an error of about four to five flight level for a six-minute look ahead horizon that cannot be improved much further. This is most likely not a technical or model problem but due to operational uncertainties and human intervention from pilots and air traffic controllers.

Future work

Recommendations for future work and further improvements complementary to the results achieved in this project, are:

- The vertical trajectory prediction needs to be combined with lateral trajectory prediction. Only if lateral position and altitude at the lateral position are put together, real applications can be improved with this prediction. For lateral prediction, emphasis needs to be put on wind impact and modelling of turn segments as well as speed variations. A validation with flown trajectories should be carried out, ideally in different operational environments.
- Analyze the benefits of an improved trajectory prediction with a local ATC application, for example with controller decision support tools like Conflict Detection and a short term look

ahead horizon of six to 10 minutes within a sector. Also, the prediction of sector sequences or whether a flight may or may not achieve the agreed sector exit conditions may be more accurate with an improved TP.

- Quantify the benefits of downlinked aircraft parameter like speed schedule or mass from ADS-C EPP reports; in addition, operational departure constraints are also downlinked via ADS-C EPP, which can be taken into account (based on the work already done in SESAR [9]).
- Improve the current model with speed and altitude constraints of the Standard Instrument Departure routes and consider these constraints for predicting the acceleration FL of the aircraft.
- Study the sensitivity of the assumptions that have been made, for example the maximum climb thrust assumption should be revised for heavy aircraft. Further sensitivity analysis should also be done on the impact of atmospheric conditions (wind, temperature).
- Further complementary model improvements: develop metrics on how to detect problematic predictions for a flight at an early stage. If deviations between prediction and real trajectory exceed certain thresholds, a balance factor [10] could be introduced that empirically aligns both trajectories.

Acknowledgements

This is a shortened summary of the final report of the cooperation between NRIEE and DFS Aviation Services with the title “NRIEE RESEARCH AND DEVELOPMENT COOPERATION IN TRAJECTORY BASED OPERATIONS AND FREE ROUTE AIRSPACE, Work Package 2. 2021–2023”.

List of Abbreviations

ADS-B	Automatic Dependent Surveillance Broadcast
ADS-C EPP	Automatic Dependent Surveillance – Contract Extended Projected Profile
ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management

¹ These parameters are currently not available. However, flight tests were done for example in SESAR Joint Undertaking project PJ.18-W2-53B to evaluate the benefits.

BADA	Base of Aircraft Data
CAS	Calibrated Airspeed
DNN	Deep Neural Network
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EDDM	Munich Airport
EHS	Enhanced Surveillance
EPP	Extended Projected Profile
ERA5	ECMWF Re-analysis data v5
FL	Flight Level
HVY	Heavy aircraft types
ISA	International Standard Atmosphere
LS	Least Square
MAE	Mean Absolute Error
MCP/FCU	Mode Control Panel / Flight Control Unit
MSE	Mean Squared Error
TAS	True Airspeed
TEM	Total Energy Model
TOC	Top of Climb
TP	Trajectory Prediction
ZGGG	Guangzhou Baiyun International Airport

References

[1] Common Trajectory Prediction Capability for Decision Support Tools, Sip Swierstra & Steven M. Green, 5th USA-Europe ATM Seminar, Budapest, June 2003.

[2] ECMWF Reanalysis v5 | ECMWF, Retrieved August 18, 2023 from: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>

[3] User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA), Revision 3.15, EEC Technical /Scientific Report No. 19/03/18–45. May 2019.

[4] Improving Climb Performance Prediction in Air Traffic Control with Machine Learning and Full Flight Simulator Verification. Matthias Poppe, Thomas Pütz, Roland Scharff. Digital Avionics Systems Conference, San Diego, USA 2019.

[5] Ground Based Estimation of Aircraft Mass. Adaptive vs. Least Square Method. Richard Alligier et.al.. 10th USA/Europe ATM Seminar, Chicago, United States, June 2013. Also available at Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO): <http://oatao.univ-toulouse.fr>, eprints ID: 12495

[6] Getting to grips with aircraft performance. Airbus Customer Service. Airbus S.A.S. Flight Operations & Line Assistance, Toulouse, January 2002.

[7] Lin, Keogh, Lonardi, Chiu: A symbolic representation of time series, with implications for streaming algorithms, University of California, Riverside, USA. DMKD' 03, 8th ACM SIGMOD Workshop on Research Issues in Data Mining and Knowledge Discovery, June 13, 2003, San Diego, CA, USA. Copyright 2003 ACM1–58113– 763– x; Retrieved August 18, 2023 from: <https://www.cs.ucr.edu/~eamonn/SAX.pdf>

[8] D2.3A: TBO Aircraft Performance Modelling Report. Matthias Poppe, Thomas Pütz. DFS Aviation Services GmbH, March 2022

[9] Datapack of solution PJ.18-W2–53B in SESAR2020 (Wave2) project “4D Skyways” (to be published on the SESAR 3 JU webpage www.sesarju.eu).

[10] Real Time Predictor Calibration through EPP Profile Down-Link. Jesper Broonsvoort. EURO-CONTROL/FAA ATM Seminar 2015.

Fähigkeit des Abfangens von in gesperrte Lufträume eindringenden Kleinfluggeräten durch zivile Einsatzmittel (FALKE)

Andreas Udovic & Ralf Häsckke

Einleitung

Das Projekt FALKE – Fähigkeit des Abfangens von in gesperrte Lufträume eindringenden Kleinfluggeräten durch zivile Einsatzmittel wurde durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) gefördert und startet am 08.11.2019 [1]. Mit einer Abschlussdemonstration am 31.01.2023 in Hamburg bei der Helmut-Schmidt-Universität wurde das Projekt erfolgreich beendet.

Ziel des Projektes war es, die gesamte Prozesskette von der Detektion illegal operierender Unmanned Aircraft-Systeme (UAS) über die Reaktion durch die Flugsicherung und den Flughafen bis zur Abwehr der Bedrohung durch das Einfangen des UAS durch ein Counter-UAS zu untersuchen, zu optimieren und zu unterstützen. Damit soll eine schnelle Reaktion auf die Bedrohung ermöglicht und der wirtschaftliche Schaden durch eine Einstellung des Flugverkehrs möglichst minimiert werden.

Projektpartner und Projektstruktur

Um diese Projektziele zu erreichen, waren am Projekt Falke folgende Partner beteiligt:

- Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Fakultät für Elektrotechnik, Professur für Elektrische Messtechnik. Projektkoordination und zuständig für die Programmierung der Abfangdrohne mittels Künstlicher Intelligenz (KI) beim Endanflug zum Abfangen von Drohnen.
- Flughafen Hamburg als Systempartner am Flughafen.
- Bundespolizei, Referat 65 Forschung und Erprobung. Verantwortlich für das Abfangen von illegalen Drohnen und Systempartner am Flughafen.
- Hensoldt, Venture Labs. Stellte die Radartechnik zur Detektion von Drohnen bereit.
- Frequentis Consoft AG war für die Software zur Vernetzung des Systempartner am Flughafen verantwortlich.

- Euroavionics entwickelte die Abfangdrohne zum Abfangen der illegalen Drohne zur Verfügung.
- DFS ist für die Auslösung der Gefahrenstufen und für die Warnung von Pilotinnen und Piloten bzw. für die Einstellung von Lande- und Startfreigaben zuständig, wenn eine illegale Drohne am Flughafen -detektiert wird.

Insgesamt war das Projekt in 10 Arbeitspakete strukturiert:

- AP1: Erfassung IST-Zustand
- AP2: Anforderungsdefinition und Spezifikation
- AP3: Systementwurf Gesamtkonzept
- AP4: Modellbildung und Simulation
- AP5: Komponenten-Entwicklung und -Tests
- AP6: Systemintegration
- AP7: Systemtests
- AP8: Feldtests
- AP9: Dissemination
- AP10: Standardisierung

Dabei war die DFS insbesondere in den ersten drei Arbeitspaketen involviert.

Aufgaben der DFS im Rahmen des Projekts

Die DFS beteilige sich insbesondere bei den Arbeitspaketen, die die Prozesskette definierte und die Schnittstellen zwischen den Systempartnern beschrieb. Basierend auf einer Analyse der Bedrohungen am Flughafen durch UAS wurde eine umfangreiche Ist-Analyse der Abläufe bei und nach der Detektion durchgeführt. Ergebnis war ein detailliertes Ablaufdiagramm, welches für die Entwicklung der Software genutzt wurde. Hier brachte die DFS zum einen das von ihr entwickelte und an den Flughäfen genutzte Warnstufenmodell ein und zum anderen operationelles Know How durch die Beteiligung von DFS-Towerlotsen des Flughafens Hamburgs. Der Ablauf des Projekts war maßgeblich durch die

Covid-19 Pandemie beeinflusst, die einen direkten persönlichen Austausch z.B. bei Workshops nicht ermöglichte. Daher mussten viele der geplanten Besprechungen abgesagt und durch Videokonferenzen ersetzt werden. Dies behinderte gerade zu Beginn der Pandemie den Informationsaustausch zwischen den Partnern. Betroffen davon waren auch die geplanten Feldtests, die nicht wie geplant am Flughafen Hamburg stattfinden konnten. Auch konnte sich die DFS an diesen Feldtests nicht wie geplant beteiligen.

Ebenso hat die Einstellung der Aktivitäten seitens einer der Projektpartner die Arbeiten der DFS negativ beeinflusst, da so die geplante Bewertung der Sensorik zur Detektion von Drohnen nicht bzw. nur zum Teil stattfinden konnte.

Insgesamt konnte die DFS die Arbeiten jedoch trotz dieser Widrigkeiten im Großen und Ganzen wie geplant durchführen. Die Arbeiten insbesondere zur Prozesskette konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Die Aufgaben bei der Detektion und Abwehr von Drohnen konnten beschrieben werden. Die Schnittstellen und der Informationsaustausch konnten definiert und so eine Grundlage für die softwarebasierte Unterstützung geschaffen werden. Diese wurde durch die Firma Frequentis Consoft AG umgesetzt und in einem Feldtest zusammen mit den Partnern überprüft. Dabei konnten von Seiten der DFS noch Verbesserungsvorschläge eingebracht werden.

Auch kann die erarbeitete Prozesskette als Blaupause für die Vernetzung der Systempartner an den Flughäfen genutzt werden.

Ergebnisse aus Sicht der Flugsicherung

Wie bereits erwähnt hat sich die DFS insbesondere an den Arbeitspaketen 1 bis 3 beteiligt. Die Ist-Analyse wurde noch vor Beginn der Covid 19-Pandemie gestartet. Als Grundlage dienten die Ergebnisse eines Workshops, der in Hamburg am Flughafen durchgeführt wurde. An diesem Workshop nahmen alle Partner teil. Insbesondere die am Flughafen agierenden Partner Flughafen Hamburg, Bundespolizei und DFS brachten ihre Erfahrungen bei der Detektion von, der Reaktion auf und der Abwehr von illegalen Drohnen am Flughafen ein.

Grundlage der Ist-Analyse war das Gefahrenstufenmodell bei Drohnensichtungen am Flughafen der DFS, welches je nach Bedrohungslage abgestufte Reaktion auf die Bedrohung beinhaltet.

Ausgehend von der Meldung einer illegalen Drohne, bzw. von der Sichtung einer solchen Drohnen, wird die Bedrohung entweder weiter beobachtet oder Maßnahmen eingeleitet. Die Maßnahmen sind abgestuft von Information anfliegender bzw. startender Flugzeuge bis hin zur Einstellung von Start- und Landefreigaben, so dass kein Flugbetrieb am Flughafen mehr stattfindet. Parallel dazu wird eine Alarmkette ausgelöst, welche die Informierung der Systempartner am Flughafen beinhaltet. So wird die am Flughafen verantwortliche Polizei alarmiert und der Flughafenbetreiber informiert. Sowohl der Flughafen als auch die Polizei leiten dann ihrerseits weitere Maßnahmen ein. Die Polizei z.B. ist dann dafür zuständig die illegale Drohne und deren Steuerer aufzuspüren und die Bedrohung durch diese zu beseitigen. Der Flughafen stellt je nach Bedrohungslage z.B. den Bodenbetrieb auf dem Vorfeld ein.

Abbildung 1 zeigt das Ergebnis der Ist-Analyse aus dem Workshop in Hamburg. Dieses Ergebnis bildete dann die Grundlage für die weiteren Arbeiten in den Arbeitspakete 2 und 3.

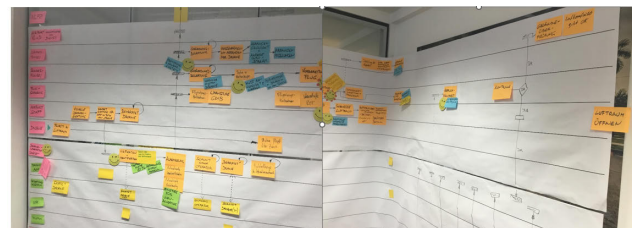


Abbildung 1: Ergebnis der Ist-Analyse des WS in Hamburg.

Auf diesem Workshop wurden auch unterschiedliche mögliche Szenarien diskutiert, die im Rahmen des Projekts weiter betrachtet werden sollten. Zwei Szenarien wurden dabei intensiver diskutiert. Zum einen der Drohnensteuerer, der aus Unkenntnis seine Drohne illegal am Flughafen bzw. im Flughafennahbereich betreibt, und zum anderen das Szenario „Umweltaktivist“, bei dem ein Drohnensteuerer gezielt den Flugbetrieb stören möchte. Der erstere möchte mit seiner Drohne nur Fotos oder Videoaufnahmen machen und fliegt daher mit einer Drohne, die mit Kamera ausgestattet ist. Normalerweise fliegt er langsam und der Steuerer befindet sich in der Nähe der Drohne. Der Umweltaktivist fliegt mit einer oder mehreren kleinen Drohnen und will gesehen werden, um so den Flugverkehr zu stören. Auch dieser fliegt in der Regel mit einer eher moderater Geschwindigkeit. Im Projekt nicht weiter betrachtet wurde das Szenario „Attentat“, wo eine Drohne gezielt benutzt werden soll, um einen Anschlag zu verüben.

Basierend auf der Ist-Analyse wurde im Arbeitspaket 2 die Schnittstellen zwischen den beteiligten Partnern untersucht und beschrieben. Auf Basis dieser Beschreibung wurden dann die Anforderungen definiert, welche Informationen den beteiligten Partnern am Flughafen für ein gemeinsames Lagebild bereitgestellt werden müssen. Insbesondere der Informationsfluss und darauf aufbauenden Aktionen und Reaktionen der Partner waren hier zentrales Element der Diskussion. Dazu wurde die Prozesskette beginnend mit der Detektion durch Sensorik, aber auch auf Basis von Beobachtungen (Piloten, Flughafenmitarbeit, Towerlotsen) weiter aufgebaut. Basierend auf der Detektion der Drohne findet eine erste Bewertung statt. Handelt es sich tatsächlich um eine Drohne oder ist es vielleicht doch nur ein Vogel oder eine Fehlmeldung. Wenn eine Drohne sicher detektiert worden ist, muss entschieden werden, ob diese illegal betrieben wird oder dort regulär fliegen darf. Wenn sie dort nicht fliegen darf, wird basierend auf den Warnstufenmodel der DFS die Alarmierungskette der Systempartner angestoßen. Wichtig bei der Anforderungsdefinition und Spezifikation war es, dass alle Partner am Flughafen jederzeit den gleichen Informationsstand haben und jeder der Partner weiß, an welcher Stelle des Prozesses man sich befindet. Nur so kann ein schneller und reibungsloser Ablauf bis hin zur Wiederfreigabe des Flugverkehrs gewährleistet werden.

Im Arbeitspaket 3 wurden die gefundenen Anforderungen und Spezifikationen beschrieben und in ein Gesamtkonzept überführt. Dieses Gesamtkonzept war die Grundlage für die weitere Entwicklung.

Basierend auf den Gesamtkonzept wurden dann eine Softwarelösung durch die Firma Frequentis Consoft AG programmiert. Diese Software wurde durch die Systempartner im Rahmen des AP 7 „Systemtest“ bei einem Test in im Herbst 2022 Hamburg durch die Systempartner am Flughafen Bundespolizei, Flughafen Hamburg und DFS validiert.

Bei diesem Test wurden die verschiedenen Arbeitspositionen am Flughafen aufgebaut und vernetzt, so dass der Flughafen Hamburg, die Bundespolizei und die DFS ihre jeweiligen Positionen räumlich getrennt besetzen konnten. Abbildung 2 zeigt die DFS-Mitarbeiter an ihrer Arbeitsposition beim Systemtest, in dem Verbesserungsvorschläge erarbeitet worden sind. Insbesondere Verbesserungsvorschläge für das HMI konnten entwickelt werden.

Das Counter-UAS, welches die illegale Drohne abfangen soll, wurde durch die Helmut-Schmidt-



Abbildung 2: DFS-Mitarbeiter Thorsten Wiesemann (links) und Dr. Ralf Häschke beim Systemtest in Hamburg.

Universität gebaut und getestet. Aufgrund der Covid-Pandemie konnte die DFS nicht an geplanten Feldtests dieser Drohne, sondern nur an der Zwischendemonstration teilnehmen. Auch musste die geplante Abschlussdemonstration am Flughafen Hamburg ausfallen. Diese wurde durch eine Abschlussdemonstration Ende Januar 2023 an der Helmut-Schmidt-Universität ersetzt. An dieser Abschlusspräsentation nahm als Vertreter des Projektträgers Herr Staatssekretär Höppner vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) teil. Die DFS stellte zusammen mit den Projektpartnern die Ergebnisse des Projekts „Falke“ vor. Abbildung 3 zeigt die DFS-Teilnehmer zusammen mit Staatssekretär Höppner am Stand der DFS.



Abbildung 3: Foto von der Abschlusspräsentation mit Staatssekretär Hr. Hartmut Höppner vom BMDV (4.v.l.) und DFS Geschäftsführer Technik Hr. Friedrich-Wilhelm Menge (3.v.l.), sowie den weiteren DFS-Teilnehmern Hr. Dr. Biedermann, Hr. Udovic, Hr. Dr. Häschke und Fr. Kies (v.l.r.).

Fazit

Zusammenfassend kann für die Flugsicherung von einem erfolgreichen Projekt gesprochen werden. Die Erstellung eines Gesamtkonzepts zur Drohnerdetektion und Drohnenabwehr, welches auch auf andere Flughäfen übertragen werden kann, wurde erfüllt.

Auch die Beschreibung der Schnittstellen zwischen den Systempartnern am Flughafen ist für die weitere Bearbeitung des Themas enorm hilfreich und wichtig. Die Tests der entwickelten Software am Flughafen Hamburg haben das mögliche Potential gezeigt, welches in der Erstellung eines gemeinsamen Lagebildes für die Systempartner beinhaltet.

Zudem zeigten die Tests und die Validierung des Counter-UAS durch die Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, dass Reaktionen auf illegale Drohnen gerade in dem schwierigen Umfeld Flughafen mit einer hohen Dichte an Flug- und Fahrzeugen sowie einer hohen technischen Ausstattung gefahrlos möglich sind.

Anmerkungen zur Veröffentlichung

Dieser Artikel beruht auf einem Vortrag beim F&E Fachkolloquium, welcher DFS-intern aus dem BK-Netz auch als Video abrufbar ist [2].

Abkürzungsverzeichnis

BK	Bürokommunikation
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
DFS	DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
FALKE	Fähigkeit des Abfangens von in gesperrte Lufträume eindringenden Kleinfluggeräten durch zivile Einsatzmittel
HMI	Human-Machine Interface
KI	Künstliche Intelligenz
UAS	Unmanned Aircraft System

Referenzen

- [1] BMDV (2023). Fähigkeit des Abfangens von in gesperrte Lufträume eindringenden Kleinfluggeräten durch zivile Einsatzmittel – FALKE. URL abgerufen am 6.9.2023: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/UAV-Projekte/falke.html>.
- [2] Udovic, A. & Häschke, R. (2023). FALKE Fachkolloquium. DFS F&E Fachkolloquium vom 13.01.2023. Video-URL (DFS BK) abgerufen am 9.11.2023: <https://dfsde.sharepoint.com/:v:/r/sites/ForschungUndInnovation/Freigegebene%20Dokumente/Fachkolloquien/2023-02-13%20Projekt%20FALKE.mp4?csf=1&web=1&e=y1KaO4>.

Spracherkennungsbasierte Eingabeunterstützung für Lotsen und Technologieevaluierung – SALT

Stefan Tenoort, Thomas Rüggeberg, Konrad Hagemann, Sven Simon, Benedikt Pudwell & Armin Linke

Hintergrund Spracherkennung

Bereits 2010 entschied die DFS GmbH, Spracherkennung unter der Bezeichnung „Voice Recognition and Response“ (VRR) im Bereich des ATC-Trainings einzusetzen (zitiert nach [1]). Seitdem wurde dieses System zusammen mit UFA, dem Hersteller, der in der DFS genutzten En-Route Simulatoren kontinuierlich weiterentwickelt, um diese in den Simulatoren der Akademie wie auch der Kontrollzentralen als Ergänzung oder Ersatz von Simulationspiloten zu nutzen. Insbesondere erfolgte im DFS-Forschungszentrum auf technischer Seite die Erweiterung der Möglichkeiten durch den Einsatz immer leistungsfähigerer Spracherkennung-Engines. Ein bedeutender Meilenstein war hierbei u.a. jüngst die Entscheidung, Spracherkennung bei der Einführung des neuen ATC-Systems iCAS in der Niederlassung München von Anfang an konsequent einzusetzen [2]. Auch „direkt an Board“ bei den Lotsen bietet die Spracherkennung Potential für Assistenzsysteme, was zu einer Verankerung als technische Enabler in der EATMA [3][4] nach sich zog und schon seit einigen Jahren international diverse Forschungsaktivitäten angeregt hat. Im SESAR Projekt PJ.16–04 „Workstation, Controller Productivity“, das 2019 abgeschlossen wurde, wurde bei den verschiedenen Partnern eine Validierung von Spracherkennungssystemen am Lotsenarbeitsplatz im Simulator durchgeführt [5]. Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieses Projekts sind die Ausgangslage für die hier vorliegende Konzeptarbeit.

In dem europäischen Förderprojekt wurden zwei prototypische Anwendungen entwickelt und in einer zweiwöchigen Simulation mit acht Lotsen in Langen validiert. Eine Anwendung war die Target Location Assistance (TLA), welche die Labels von Flügen hervorhob, wenn das Callsign im Sprechfunk des Lotsen erkannt wurde, und eine Controller Clearance

Verification (CCV), welche die Freigaben des Lotsen via Sprechfunk mit den vorgenommenen Systemeingaben verglich und bei Abweichungen eine Warnung im Label darstellte. Die Simulation verwendete ein vereinfachtes iCAS Mockup und den Luftraum München Approach.

Für die Anweisungen an den Simulator wurden Erkennungsraten von durchschnittlich 91% erzielt, jedoch war die Fehlalarmrate insbesondere bei der CCV deutlich zu hoch. Grundsätzlich waren die Lotsen dem Einsatz eines Spracherkennungssystems gegenüber positiv eingestellt, allerdings nur, wenn sich Erkennungsrate und Zuverlässigkeit verbessern sowie Fehlalarme reduziert werden.

Aufbauend auf den Erkenntnissen und gesammelten Erfahrungen aus diversen Projekten wie den o.g. muss man einräumen, dass es derzeit höchst unwahrscheinlich ist, dass ein Spracherkennungssystem eine 100%ige Erkennungsleistung aller gesprochenen Äußerungen erreichen wird. Es ist zudem fraglich, ob dies jemals möglich sein wird. Unabhängig vom Spracherkennungssystem können darüber hinaus auch Sprechercharakteristik, Störschall und Akustik, verwendete Technik (z.B. Mikrofon oder Headset), Abweichung von Phrasenologie etc. zu einer Verminderung der Erkennungsrate beitragen¹.

Spracherkennung zur Systemeingabe in einem sicherheitskritischen Umfeld muss höchste Anforderungen an Erkennungsrate und Zuverlässigkeit erfüllen. Das in Training und Ausbildung der DFS verwendete UFA Spracherkennungssystem kann dies momentan nicht in einem zufriedenstellenden Maße gewährleisten. Aktuell ist es also eine große Herausforderung, ein Spracherkennungssystem dergestalt zu ertüchtigen, dass es an der CWP eine zuverlässige Systemeingabe ermöglicht, d.h. vom Lotsen verbal

¹ Auch sollte man den absoluten Anspruch einer perfekten automatischen Erkennungsleistung kritisch hinterfragen. So ist selbst ein hochtrainierter menschlicher „Erkennung“

nicht frei von Fehlern und nicht verstandene Funksprüche müssen im Regelbetrieb wiederholt werden, was Teil der Routine ist.

gegebene Freigaben werden ins System übertragen, statt diese über andere Medien wie Maus, TID oder Tastatur einzugeben. Bei der Arbeit mit dem iCAS System müssen Freigaben vom Lotsen in das System eingepflegt werden. Eine Lösung diese Systempflege mittels Spracherkennung vorzunehmen hätte zwar einen sehr hohen Nutzwert beim Einsatz am Lotsenarbeitsplatz, gleichzeitig stellt sie aber auch die größte Herausforderung bei der Realisierung dar.

Es wurde im SESAR Projekt PJ.16-04 festgestellt, dass bereits damals aus der Gesamtheit der Äußerungen bestimmte Elemente wie callsigns sehr akkurat und zuverlässig erkannt wurden, andere dagegen wie z.B. Wegpunkte und komplexe Anweisungen eher schlecht. Statt also eine „big-bang Lösung“ anzustreben, bei der, ähnlich wie bei VRR, die Spracherkennung zur Eingabe aller getätigten Äußerungen der Lotsen in das System genutzt wird, kann ein schrittweises Vorgehen unter Anwendung der funktionierenden Aspekte des Spracherkennungssystems frühzeitig Lösungen generieren, die für den Betrieb nutzbringend sind. Ziel war es deshalb, Spracherkennung so einzusetzen, wie sie zuverlässig funktioniert und den Lotsen sinnvoll unterstützt bzw. entlastet. Erste Vorschläge wurden in einem Konzept entworfen und zusammen mit Lotsen detailliert ausgearbeitet und evaluiert. Die Inhalte des Konzeptes werden im Folgenden beschrieben.

Bei den Validierungsübungen zur Spracherkennung im Rahmen des SESAR-Projektes PJ.16-04 zeigte sich, dass komplexe Anweisungen, also mehrere Freigaben in einer Sprechfunkübertragung, häufig, schlecht erkannt wurden und fehleranfällig waren. Ebenso waren Abweichungen von der Standardphraseologie (31,9% bei dem überwiegend grammatikbasierten VRR Spracherkennungssystem von UFA [5]) für die Spracherkennung eine erhebliche Herausforderung. Beides führte zur Verschlechterung der Erkennungsleistung und vor allem zu Fehlalarmen bei der Controller Clearance Verification (CCV).

Dagegen funktionierte die Erkennung der Callsigns sehr akkurat, zuverlässig und schnell. Wie könnte man also diese Eigenschaft am Lotsenarbeitsplatz nutzen?

Die im genannten Projekt untersuchte Lösung die Callsign-Erkennung als eine Art Peiler zu nutzen, fand insgesamt wenig Akzeptanz. Dies wäre nach Lotsenaussagen nur sinnvoll, wenn das Spracherkennungssystem den Sprechfunk auf Pilotenseite nutzen würde [6]. Aufgrund der Sprechfunkqualität ist hier

mit ernststen Schwierigkeiten bei der Realisierung einer zuverlässigen Anwendung zu rechnen. Im Gegensatz zur Pilotenseite kann die gut funktionierende Erkennung von Callsigns beim Lotsensprechfunk aber durchaus genutzt werden. Im vorliegenden Konzept werden Vorschläge aufgeführt, bei denen die Callsign-Erkennung genutzt wird, um den Lotsen bei bestimmten Routineaufgaben zu unterstützen. Das Konzept sieht grundsätzlich vor, von einfachen Anwendungen zu komplexeren Lösungen voranzuschreiten und sukzessive die Möglichkeiten des Spracherkennungssystems zu erweitern.

Im Gegensatz zu VRR der Firma UFA, welches in Simulatoren der Akademie und der Niederlassungen zu Ausbildungs- und Trainingszwecken genutzt wird, ist es am Lotsenarbeitsplatz nicht notwendigerweise erforderlich, alle getätigten Sprechfunkinhalte zu erkennen. Bestimmte Inhalte wie z.B. callsigns mit Höhenanweisungen gezielt und durchgehend zuverlässig zu erkennen, kann bereits ausreichend sein. Es geht bei diesem Anwendungsfall nicht darum einen Simulator zu steuern und das (Simulations-) Pilotenverhalten nachzubilden, sondern darum, die Lotsen bei den notwendigen Systemeingaben zu entlasten. Insbesondere trajektorienrelevante Eingaben sind von besonderer Bedeutung.

Konzeptentwicklung

Die im Konzept genannten Funktionalitäten wurden mittels eines iterativen Prototypings zusammen mit Lotsen der DFS Niederlassung Mitte entwickelt. Der Fokus lag während der Konzeptentwicklung auf der Rolle des Executive Controllers von ACC in einer iCAS-Umgebung. Der Hauptnutzen für Spracherkennung wird derzeit insbesondere im Approach gesehen, d.h. dort, wo eine Vielzahl per Sprechfunk übertragener Freigaben manuell in das System eingepflegt werden müssen und vermehrt mit Standardverfahren unter Zeitdruck gearbeitet wird. Durch den gezielten Einsatz von Spracherkennung sieht man hier eine quantifizierbare kognitive und physische Entlastung des Lotsen durch Spracherkennung als wahrscheinlich [7].

Für den Arbeitsbereich eines DFS-Approach Lotsen konnte die Zielrichtung der angestrebten Entwicklung in Form eines „Problem Statements“ für den Betrieb zusammengefasst und präzisiert werden [8]:

„Es wird eine Lösung benötigt, um Routineeingaben schnell und unkompliziert vornehmen zu können, weil...“

...

- ... an diesem Arbeitsplatz in schneller Abfolge gearbeitet werden muss,
- ... mit iCAS wesentlich mehr Eingaben als mit PSS/ATCAS/P2 notwendig sein werden (z.B. Heading) und
- ... diese Eingaben bei iCAS nicht mehr wie zuvor bei PSS mit einem Stift, sondern mit der Maus getätigt werden müssen.“

Basierend auf diesem „problem statement“ konnten im Prototyping verschiedene Ausbaustufen entwickelt und getestet werden, die im Folgenden erläutert werden.

1. Auto-Assume bei Initial Call
2. Quick Access Menü (QAM) bei Nennung eines Callsigns, Lotse kann Freigabe(n) manuell eintragen
3. Erkannte Freigaben werden ins QAM eingetragen und angezeigt. Manuelle Korrekturen sind möglich.
4. Nutzung von Schlüsselwörtern zur Steuerung von Anzeigen.

Initial Contact

Ein wesentlicher Ansatz von Automatisierung ist es, den Lotsen von Routineaufgaben zu entlasten. Je weniger mentale Ressourcen durch solche Routine-tätigkeiten gebunden werden, desto mehr stehen sie für die anspruchsvollen Aufgaben zur Verfügung, zu denen Informationsaufnahme des Verkehrsbildes, Planungs- und Problemlösungsaktivitäten gehören.

Eine Routinetätigkeit des Lotsen ist es, in seinen Zuständigkeitsbereich einfliegende Luftfahrzeuge (LFZ) auf der eigenen Funkfrequenz entgegenzunehmen. Der Pilot ruft bei einem Frequenzwechsel die Kontrollstelle an, um sich anzumelden. Der Lotse bestätigt die Identifikation des LFZ (<CALLSIGN> <IDENTIFIED> oder <RADAR CONTACT>). Dabei wird in der Regel das LFZ „assumed“ und ggfs. eine Freigabe erteilt.

In iCAS erfolgt das „Assume“ durch Öffnen des Callsign-Menüs und Auswahl des Assume Buttons. Diese Routinetätigkeit lässt sich durch die Erkennung des Kommandos (<CALLSIGN> <IDENTIFIED>) automatisch ausführen. Gleichzeitig wird das erkannte Callsign auf dem Air Situational Window hervorgehoben. Durch das „Assume“ ändert sich der Status des LFZ, was im iCAS System durch das Umfärben der Labelfarbe nach schwarz kodiert ist.

Findet nur ein „Assume“ statt, müsste eine parallel ausgeführte Aktivität des Lotsen, z.B. eine andere komplexere Systemeingabe, nicht unterbrochen werden, da beides, Mauseingabe und Sprechfunk, parallel und unabhängig voneinander erfolgen könnten.

QAM-Automatisierung

Eine weitere Entlastung von Routineaufgaben kann durch Unterstützung bei Standardfreigaben erfolgen, die regelmäßig beim Initial Contact gegeben werden. Da diese auch ins System eingegeben werden müssen, bietet es sich an, entsprechende Eingabemenüs anzubieten, sobald das Spracherkennungssystem <CALLSIGN> <IDENTIFIED> erkennt.

Die entsprechenden Eingabemenüs könnten beim Erkennen des Callsigns während des Initial Contact bereits geöffnet angeboten werden. Auf diese Weise ließen sich weitere Mausklicks einsparen, die für ein „Assume“ und das Öffnen von Eingabemenüs erforderlich sind. Voraussetzung ist, dass die Spracherkennung in Echtzeit und das Anbieten eines Eingabemenüs etwa so schnell, wie die derzeit vorgesehenen Mausklicks erfolgten und/oder parallel dazu, während der Lotse noch eine andere System-eingabe tätigt.

In iCAS ist ein sogenanntes Quick Access Menu (QAM) vorgesehen, mit dem ein Lotse einfache, aber auch komplexe Eingaben, d.h. solche die mehrere Freigaben parallel enthalten, durchführen kann. Abbildung 1 zeigt die Menütiefe verschiedener QAM-Unterfenster zur Eingabe einer Flugflächenfreigabe für das Luftfahrzeug mit dem Callsign „LANDU1“ mit eingeschränkter Steigrate. Für die konventionelle Eingabe mit der Maus sind mehrere Zwischenschritte notwendig. Während dieser Zeit ist das Air Situational Window mit der Luftlage durch diverse Eingabemenüs überdeckt. Nach erfolgter Selektion über die Untermenüs erscheint der Wert dann im Übersichtsfenster links (hier: CFL 180 -> 150) zusammen mit anderen ggfs. getätigten Eingaben wie Waypoints (WPT, hier: DM428), Headings (HDG) oder Speedanweisungen (ASP, hier: 270) für eine letzte Kontrolle, bevor dann über Mausklick auf die Schaltfläche EXEC oder Doppelklick auf dem zuletzt ausgewählten Wert die Werte in das System übernommen werden.

Zukünftige Weiterentwicklungen könnten helfen, den Suchraum des Spracherkennungssystems einzugrenzen und damit die Erkennungsleistung zu verbessern: Je nach Arbeitsplatz und Flugstatus sind

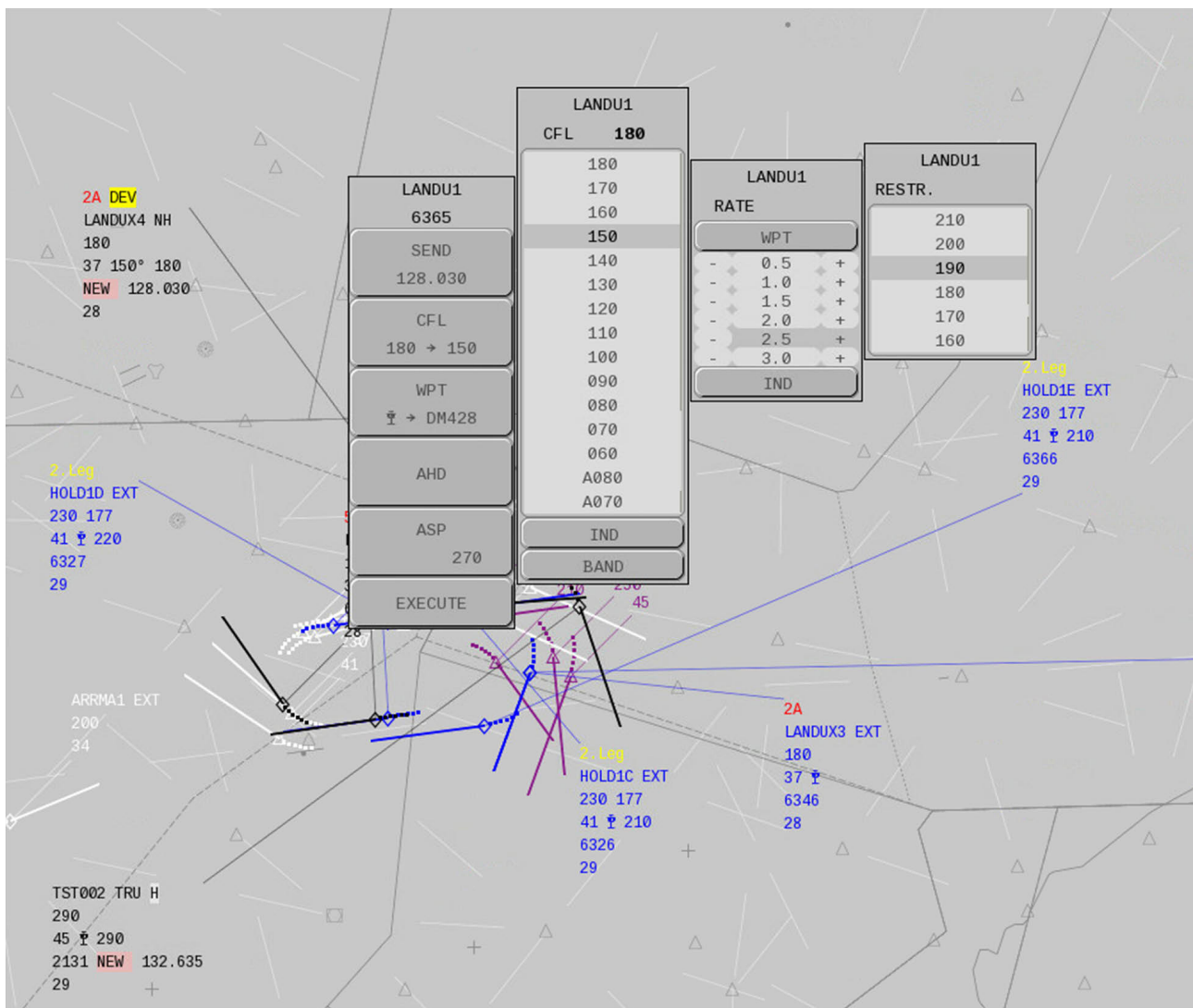


Abbildung 1: Quick Access Menü (QAM) im ICAS System München (Darstellung hier mit einem Testszenario).

bestimmte Eingaben wahrscheinlicher als andere. Um den Flugstatus zu identifizieren, können Flugplandaten, aktuelle oder geplante Trajektorien und bisherige Freigaben genutzt werden.

Zum Beispiel sind in einem Approach Sektor bei einem Initial Contact Anweisungen zu Flughöhe und Anflugroute (STAR) wahrscheinlich. Bei Flügen im oberen Luftraum werden unterschiedliche Anweisungen erforderlich sein, je nachdem, ob es sich um einen Überflug, der wahrscheinlich Routenanweisungen oder um einen Sinkflug, der demnächst landen und an den unteren Luftraum übergeben, also Höhenfreigaben erhalten wird.

Es ist darüber hinaus an dieser Stelle auch ein Anwendungsfall für den Einsatz von Methoden maschinellen Lernens denkbar, um die basierend auf

früheren Eingaben wahrscheinlichsten Eingabemenüs bereitzustellen. Ferner könnte ein abschließender Plausibilitätscheck der erkannten Eingaben dazu verwendet werden, um die Erkennungsleistung weiter zu optimieren.

Nutzung von Schlüsselwörtern zur Steuerung

Zusätzlich als Idee aus den Lotsen-Workshops wurde eine „Funktionalität zur Ein- bzw. Ausblendung von Inhalten in die Radarkarte (z.B. Waypoints, militärische Gebiete, etc.) oder des Wetter- bzw. AMAN-Fensters auf den Lotsenbildschirm, mittels Spracherkennung eines Aktivierungswortes realisiert. Im Alltag ist vielen eine solche Steuerung z.B. als „ALEXA“ von Amazon Echo bekannt. Dadurch kann ein Lotse einerseits schnell eine temporär benötigte Funktionalität seines Radararbeitsplatzes aufrufen,

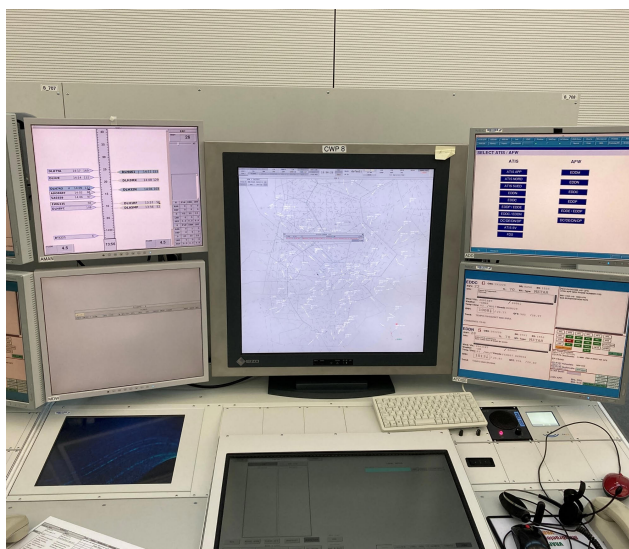


Abbildung 2: ICAS Controller Working Position mit verschiedenen Anzeigebildschirmen (vertikal stehend links oben: AMAN, links unten: MDW, Mitte: ASW, rechts oben: ADD, rechts unten: ATCISS).

andererseits erspart man sich das Suchen/ Klicken selten genutzter Funktionen in Menüs bzw. Unter-Menüs (z.B. in ATCISS, bzw. CICIS, s. Bildschirm rechts unten neben dem Radarbildschirm in Abbildung 2). Eine solche Lösung setzt natürlich eine adäquate Trennung zum Sprechfunk (z.B. via separaten Eingabekanal) voraus.

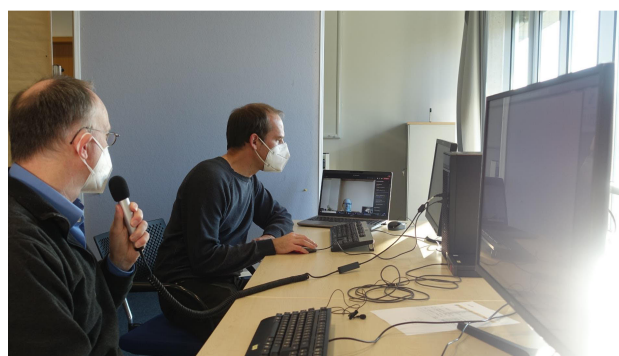


Abbildung 3: SALT Entwicklungsplattform inklusive Mock-Up für den Lotsenarbeitsplatz (rechts).

Lotsen-Workshops

Zur Erhebung der Nutzer-Anforderungen wurden drei Lotsen-Workshops innerhalb eines Jahres durchgeführt (siehe Abbildung 3). Darauf basierend erfolgte die Software-Entwicklung der Eingabe-Unterstützung für den Lotsen. Nach Begutachtung eines Prototyps durch die Lotsen, wurde dieser sukzessiv weiterentwickelt. Ausgehend von der bei der Spracherkennung bereits recht gut funktionierenden Schlagworterkennung (z. B. des callsigns) wurde im nächsten Schritt zur Erkennung einer Freigabe übergegangen, die aus zwei Schlagworten besteht (callsign identified). So war es möglich ein auto-assume zu realisieren, das dem Lotsen gänzlich eine Eingabe abnimmt.

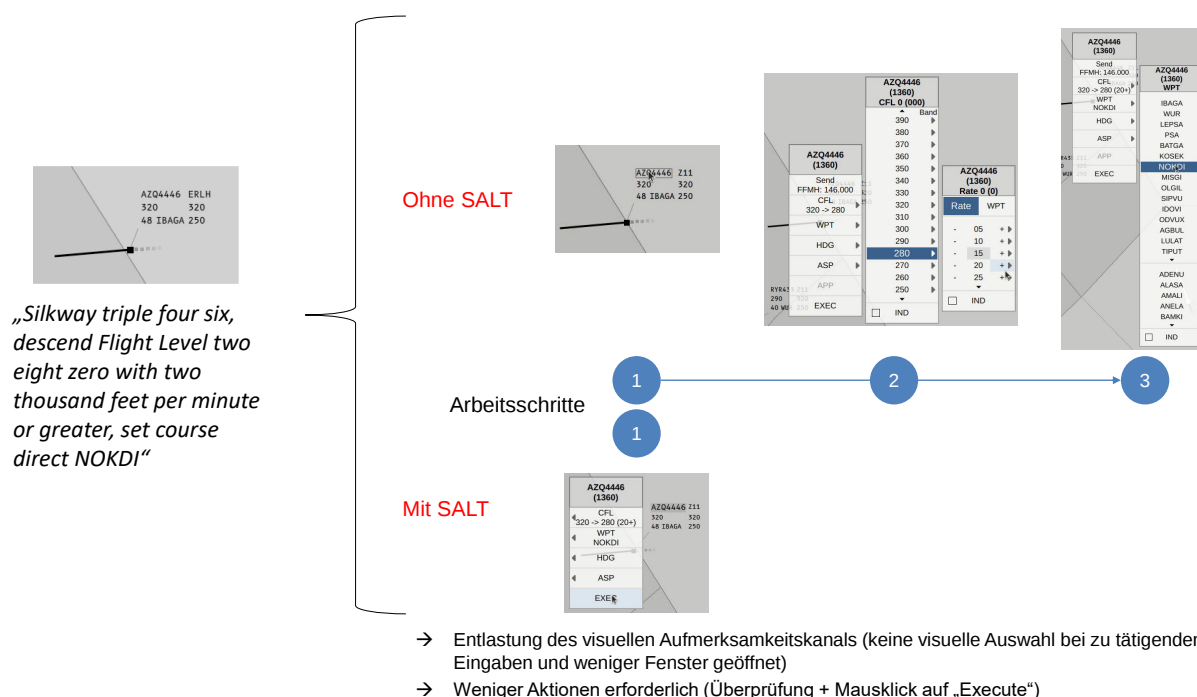


Abbildung 4: Gegenüberstellung der herkömmlichen Arbeitsweise ohne SALT mit der Arbeitsweise mit SALT Eingabeunterstützung zur exemplarische Verdeutlichung des Nutzens am Lotsenarbeitsplatz.

Im darauffolgenden Schritt wurde die SALT-Funktionalität auf kombinierte Freigaben erweitert. Konkret auf bis zu drei Freigaben in einem Funk-spruch (z.B. Kurs, Höhe und Geschwindigkeit betreffend). Im Idealfall würde sich die Tätigkeit des Lotsen bei der Eingabe seiner gesprochenen Freigaben in das ATC-System auf ein „gucken/klicken“ reduzieren, denn die gesprochenen Freigaben werden in die Eingabemenüs eingetragen, der Lotse kontrolliert den Eintrag und schickt diesen mit einem Mausklick auf den Execute-Button in die Systemverarbeitung. Technisch gesehen könnte zu diesem Zeitpunkt bereits die Maus auf dem Execute-Button positioniert werden, so dass es bei einem reinen „Kontrollieren“ und „Klicken“ bleibt. Diese Funktionalität wurde jedoch in Workshops kontrovers diskutiert, da sie ein Springen des Mauscursors zur Folge hat. Von einer weiteren Implementierung wurde daher abgesehen.. In den Workshops mit Lotsen aus dem Boxer-Team Niederlassung Mitte kristallisierte sich heraus, dass die Hauptanwendung in den Bereichen erfolgen würde, in denen eine hohe Sprechfrequenz kombiniert mit sich wiederholenden Freigaben vorkommt. Das könnten z.B. der APP Frankfurt und/oder der APP München sein. Dort könnte das System die Lotsen bei häufigen, schnell durchzuführenden Routineeingaben größtmöglich unterstützen (siehe Abbildung 4 für eine Zusammenfassung des angenommenen Nutzens).

Weiterführende Ideen

In Zusammenarbeit mit Lotsen konnten aufbauend auf den oben genannten Vorschlägen zusätzliche Anforderungen ermittelt sowie weiterführende Ideen für eine Nutzung der Spracherkennung am Lotsen-arbeitsplatz erarbeitet werden. Im Prinzip ist dabei das Entscheidende, analog zur Erkennung von Call-signs, ob Schlüsselwörter schnell genug richtig erkannt und entsprechende Menüanzeigen dargestellt werden können.

Erste Vorschläge umfassen:

- Anzeigen von Menüs oder Eingabe-Dialogen auf dem TID nach Erkennen des Callsigns als Ergänzung von Systemeingaben per Maus auf dem Radar. Dies könnte insbesondere bei kombinierten oder komplexen Freigaben von Nutzen sein, falls Mauseingaben dafür zu aufwendig sind.
- Einsatz am Planner-Arbeitsplatz, z.B. bei Koordinationsgesprächen mit angrenzenden Sektoren. Das Nennen des Callsigns hebt das Label auf dem ASW des anderen Kommunika-

tionspartners hervor, um die Suche nach dem zu koordinierendem LFZ zu erleichtern.

- Analog der Nutzung bei Assume ist auch eine Transfer-Clearance möglich. Bei Nennung von (<CONTACT><STATION><FREQUENCY>...) erfolgt ein „Send“ Kommando. Hierbei kann eine Plausibilitätsüberprüfung stattfinden, ob die in der Anweisung genannte Frequenz – ergo Sektor – überhaupt auf der geplanten Route liegt.
- Erkennen von bestimmten „keywords“ und basierend darauf optimierte Menüstrukturen. Zum Beispiel sofern „Heading“ erkannt wird, wird der entsprechende Eintrag ganz oben (in einer Liste)/ am schnellsten zu erreichenden Platz angezeigt oder alternativ auch nur mittels Hervorhebung der Menüfelder als optische Hervorhebung des Eingabefokus.
- Optimierte Labeldarstellung: Wenn z.B. ein Holding oder eine Runway erkannt wird („...expect Runway 26R“) wird der entsprechende Labeleintrag angezeigt (falls er noch nicht eingeblendet war).
- Zusammengefasst wäre die derzeit größtmögliche Unterstützung des Lotsen eine Erkennung der gesprochenen Freigaben und das Vornehmen entsprechender Einträge in die jeweiligen Eingabemenüs. Der Lotse bestätigt diese dann per „EXECUTE“ oder das System schließt die Eingabe direkt ab, sofern die Erkennungsleistung der Spracherkennung dies ermöglicht.

Software-Entwicklung

Ein kleines gut eingespieltes Team entwickelte die Software für die automatische Spracherkennung. Diese Software basiert auf dem Open-Source Toolkit „Kaldi“. Wesentliche Merkmale in der eingesetzten Version sind Schnelligkeit bei der Erkennung von Schlagworten und die Erkennungsgüte. Unterstützt wurde die Nutzbarkeit durch eine kontinuierliche Suchraumreduzierung durch Konzentration auf die Callsigns im Zuständigkeitsbereich des jeweiligen Lotsen sowie eine Fokussierung auf Freigaben für Level, Heading, Direct und Speed bzw. deren Kombinationen in Abhängigkeit von der jeweiligen Position und Flugphase. Im Quick Access Menu werden dann die erkannten Freigaben eingetragen, sodass ein Lotse nach der Kontrolle der erkannten Eingaben nur noch den Execute Button drücken muss.

Optimierung der Spracherkennung

Schnelligkeit ist bei der Spracherkennung im ATC Bereich ein wichtiger Faktor. Diese wird erreicht durch iterative Erfassung der in dem möglichen, eingeschränkten Lösungsraum enthaltenen Callsigns im Hintergrund und ein regelmäßiges Update der Vergleichsbasis (Grammar) für den Callsign-Lösungsraum. Des Weiteren wurden zwei unabhängige Instanzen der Spracherkennung genutzt, die zeitgleich arbeiten und parallel verschiedene Aufgaben erfüllen können. Dadurch erhöht sich die Erkennungsleistung spürbar.

Weitere Möglichkeiten die Spracherkennungsleistung zu verbessern existieren, wenn abhängig von der jeweiligen Position und dem Flugstatus (z.B. descend/ climb) die Menge an möglichen Freigaben auf wahrscheinliche Freigaben (z.B., reduce speed, fly heading, direct waypoint, cleared to land, ...) reduziert wird. Dadurch wird auch eine höhere Reaktionsgeschwindigkeit bei der Eingabe-Unterstützung erreicht werden und die passenden Eingabe-Fenster können schneller geöffnet werden. Diese Funktionalität wurde im Rahmen der prototypischen Erstentwicklung noch nicht umgesetzt.

Iteratives Prototyping/ agiles Vorgehen

Seit vielen Jahrzehnten hat sich bei Forschungs- und Entwicklungsaufgaben in der DFS der iterative, prototypische Ansatz bei der Software-Entwicklung bewährt. Ausgehend von der Erhebung der Lotsenanforderungen in Nutzerworkshops, der prototypischen Implementierung entsprechender Funktionalitäten und anschließendem Test durch dasselbe Lotsenteam nach einer Zeitspanne von 4 - 8 Wochen – je nach Umfang der abgesprochenen Software-Anpassungen – in der Simulation. Danach wechseln sich Lotsen-Test in der Simulation und Software-Entwicklung iterativ ab, so dass am Ende eine an die Lotsenanforderungen angepasste Funktionalität in der Simulationsumgebung getestet und im besten Fall validiert zur Verfügung steht.

Durch dieses Vorgehen können die Lotsen-Anforderungen effektiv umgesetzt werden. Es können so erlebbare, prototypische Funktionalitäten erstellt und frühzeitig festgestellt werden, ob die Realisierung der Anforderung entspricht oder ob diese eine andere Ausprägung haben sollte. Dadurch werden die benötigte Entwicklungsdauer erheblich reduziert und evtl. Fehlentwicklungen vermieden. So können Lotsen-Anforderungen schnell und damit günstig in greifbare Funktionalität umgesetzt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine schrittweise Entwicklung prototypischer Anwendungen, die mit Lotsen und anderen Experten getestet wird, dafür sorgt, dass die Entwicklungsschritte überschaubar und einfacher handhabbar bleiben. Erkenntnisse lassen sich schneller gewinnen und in den nächsten Prototypen einpflegen. Kleine Veränderungen fördern zudem die Akzeptanz bei den Lotsen mehr als größere Schritte. Die Lösungen bauen aufeinander auf und können schrittweise erweitert werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Einsatz von Spracherkennung über eine Anwendung als Simulationsunterstützung hinaus steht die DFS derzeit ungeachtet der parallel weiter rasant fortschreitenden Entwicklungen in internationalen Projekten [9] derzeit noch weit vor einer möglichen Umsetzung im Betrieb. Erste konkrete Vorschläge in Form eines Konzeptes und einer prototypischen Erstentwicklung der Ideen an einem Radararbeitsplatz wurden zusammen mit operativen Experten durchgeführt und Mitte 2022 zur Vorstellung in den DFS-weiten Betrieb gebracht. Nutzerseitig war die Resonanz gegenüber dem Konzept, insbesondere auf dem Bewertungsfaktor „Kapazitätsentlastung“ über Niederlassungen hinweg positiv bis sehr positiv. Der Forschungs- und Entwicklungsaufwand und die benötigte Zeit bis zu einem tatsächlichen operativen Einsatz werden derzeit jedoch als hoch eingeschätzt.

Die bisherigen Ergebnisse aus initialen Entwicklungsarbeiten unterstützen den eingangs formulierten Anspruch, Spracherkennung, wie sie im aktuellen Entwicklungsstand für ATC verfügbar wäre, so einzusetzen, dass sie zuverlässig funktioniert und den Lotsen effektiv entlastet. Für die nächsten Schritte wird es notwendig sein, iterativ und nutzerzentriert, d.h. zusammen mit operativem Personal, an einer auf den jeweiligen Arbeitsplatz angepassten prototypischen Lösung zu arbeiten und diese schrittweise in Simulationen bis hin zu einem validierten Konzept (V3 „Pre-industrial development & integration“, bzw. „ready for industrialization“ gemäß E-OCVM [10]) zu bringen.

Für vorgesehene funktionale Erweiterungsschritte wird es früher oder später unvermeidbar sein, parallel das verfügbare Spracherkennungssystem weiterzuentwickeln. Hierfür ist der Zugriff auf repräsentative ATC-Sprachdaten der Schlüssel, um mittels maschinellen Lernens einen entsprechend geeigneten Spracherkenner auf die spezifische ATC-Phraseologie anzulernen und zu trainieren.

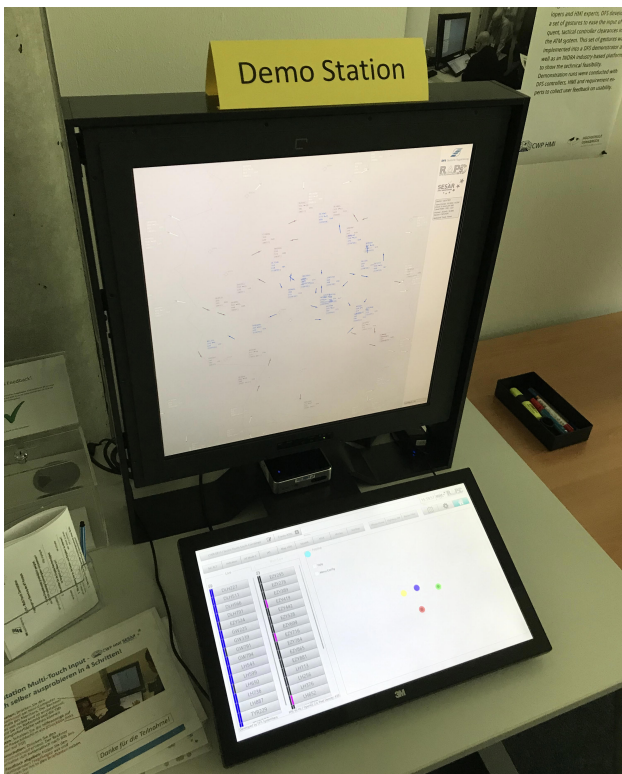


Abbildung 5: Demostation für Zukunftskonzepte im Simulatorraum des Forschungszentrums.

Ohne passende ATC-Daten sind der möglichen Optimierung eines Spracherkenners klare Grenzen gesetzt. An dieser Stelle gibt es derzeit zu adressierende Hürden von Gesetzgeberseite (DSGVO, TTDSG), aber auch unternehmensintern, da es sich um besonders schützenswerte Daten handelt (bzgl. Überlegungen zu Maßnahmen zum Schutz der Persönlichkeitsrechte mittels Anonymisierung siehe [11]).

Der aktuelle Stand des in der DFS-Konzernstrategie 2030 als Maßnahme „I1: Zielgerichtete Automatisierung in operativen Assistenzsystemen entwickeln“ verankerten SALT-Konzeptes kann sowohl im Foyer des Forschungszentrums auf dem Concept Desk [12] als Video erlebt, als auch im Simulatorraum an einem Demo-Arbeitsplatz für Zukunftskonzepte (zusammen mit einer Multi-Touch-Demo, siehe Abbildung 5) interaktiv ausprobiert werden. Letzteres wurde u.a. im Rahmen eines Lotsenlehrgangs der Ausbildung an der DFS-Akademie zu „Future Systems“ regelmäßig eingesetzt. In einem Demo-Video wird das Konzept beschrieben und der Einsatz gezeigt sowie das Feedback von Lotsen gezeigt. Das SALT Demo-Video kann im DFS Intranet betrachtet werden [13].

Beteiligte DFS-Bereiche

Die Entwicklung des Konzeptes und des Mockup wären in der erreichten Form nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung der Kollegen aus den nachfolgenden beteiligten Bereichen: Boxer-Team Niederlassung Langen, DFS-Systemhaus, DFS-Simulatorzentrum und Interne Unternehmenskommunikation.

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Area Control Center
ADD	Additional Data Display
AMAN	Arrival Manager
APP	Approach
ATC	Air Traffic Control
ATCISS	Air Traffic Control Information Support System
ASW	Air Situation Window
ATS	Air Traffic Services
CCV	Controller Clearance Verification
CICIS	Centralised Interoperable Center Information Service
C/S	Callsign
CWP	Controller Working Position
DSGVO	Datenschutzgrundverordnung
EATMA	European ATM architecture framework
E-OCVM	European Operational Concept Validation Methodology
FRA	Frankfurt Approach
iCAS	iTEC Center Automation Systems
LFZ	Luftfahrzeug
MDW	Main Data Window
PSS	Paperless Strip System
PSS	Paperless Strip System
QAM	Quick Access Menu
SESAR	Single European Sky ATM Research Programme
TID	Touch Input Device
TLA	Target Location Assistance
TTDSG	Telekommunikation-Telemedien-Datenschutz-Gesetz
VRR	Voice Recognition and Response

Referenzen

- [1] Buxbaum, J., Helmke, H., Rühl, O. & Slotty, M. (2015). Spracherkennung im Flugsicherungsumfeld. *Innovation im Fokus*, 01/15, S. 23–29.
- [2] Menge, F.-W. (2021). Cyrus in München. TecTalk, Blogeintrag vom 26.3.2021. DFS-Intranet. Abgerufen am 2.5.2023.
- [3] EATMA (2023). AERODROME-ATC-100 – Controller productivity enhancements by Automatic Speech Recognition at the Aerodrome CWP/HMI. eATM Portal. URL abgerufen am 12.07.2023 unter: <https://www.atmmasterplan.eu/data/enablers/20416252>
- [4] EATMA (2023). ER APP ATC 180 – Controller productivity enhancements by Automatic Speech Recognition at the ER/APP CWP/HMI. eATM Portal. URL abgerufen am 12.07.2023 unter: <https://www.atmmasterplan.eu/data/enablers/20416880>.
- [5] Hagemann, K., Slotty, M. & Albrecht, T. (2020). Speech Recognition for ATCO Assistance. *Innovation im Fokus*, 1/20, pp. 19–27, Langen: Deutsche Flugsicherung.
- [6] SESAR (2019). SESAR 2020 PJ.16.04.02 TRL4 TVALR – Automatic Speech Recognition (ASR). Deliverable D3.2.020. Appendix A.
- [7] DFS (2022a). Workshop zur Bewertung des betrieblichen Nutzens mit den Niederlassungen vom 7.4.2022, Langen.
- [8] DFS (2022b). Problem Statement und Lösungsansatz SALT. DFS-interner Foliensatz F&T Runde vom 8.7.2022, Langen.
- [9] Eurocontrol Fly AI Forum, April 2023, Brüssel.
- [10] Eurocontrol (2010). European Operational Concept Validation Methodology. Version 3. Brussels: Eurocontrol. URL abgerufen am 14.07.2023 unter: <https://www.eurocontrol.int/publication/european-operational-concept-validation-methodology-eocvm>.
- [11] Viswanathan, J., Blatt, A., Hagemann, K. & Klakow, D. (2022). Less Stress, More Privacy: Stress Detection on Anonymized Speech of Air Traffic Controllers. *Innovation im Fokus*, 01/22, S. 43–50.
- [12] Buxbaum, J. (2015). Der „conceptdesk“ im DFS-Forschungszentrum – ein Lotsenarbeitsplatz „von übermorgen“ zum Anfassen. *Innovation im Fokus*, 02/15, S. 30–34.
- [13] SALT Demo-Video. DFS Intranet. URL abgerufen am 11.07.2023 unter: <https://web.microsoftstream.com/video/29d9c51c-e5cd-4f94-9301-0a648007ad6a>.

Rolle der Automatisierung bei der Umsetzung klimaoptimierter Anflugprofile

Jörg Buxbaum, Lukas Rohrmüller, Steffen Flämig*, Wolfram Schiffmann* & Jan Höra (*Fernuniversität Hagen)

Motivation

Luftverkehr trägt messbar zum menschengemachten Klimawandel bei. Unter anderem aufgrund der zunehmenden gesellschaftlichen Ächtung seiner Hauptversacher steht der Luftverkehr vor der Aufgabe, sein Geschäftsmodell in Richtung Klimaneutralität zu transformieren. Neben Entwicklungen bezogen auf Treibstoffe und Antriebsarten liegt ein Augenmerk der Industrie auf neuen, treibstoffoptimierten Flugverfahren, die möglichst kurzfristig umgesetzt werden sollen. Während für den Streckenflug und die Steigflugphase von Flügen das unter den derzeitigen betrieblichen Rahmenbedingungen erreichbare Optimierungspotential weitgehend ausgeschöpft scheint, liegt aus Sicht des ATM-Performance-Monitorings (Air Traffic Management) noch ein relevantes Potential in der Umsetzung treibstoffoptimierter Sinkflüge ab Reiseflughöhe.

Derzeit bestehen flugsicherungs- und cockpitseitig vielerlei Gründe, „Continuous Descent Operations“ (CDO) ab dieser Höhe selten umsetzen zu können. Der Artikel beleuchtet, um welche Gründe es sich in verschiedenen Konstellationen von Lufträumen, Flughäfen und Verkehrsdichten handelt – und wirft einen konkreten Blick auf die Herausforderung, was CDO-Anflüge für die Konfliktfreiheit von Flügen bedeutet. In einem weiteren Teil illustriert der Beitrag, welche Informationen, Assistenzen und Systemfunktionalitäten bord- und bodenseitig sinnvoll scheinen, um CDO-Anflüge ab Top of Descent (TOD) im relevanten Maße umzusetzen. Flankiert wird diese Darstellung mit einem Ausblick, welche weiteren Änderung bei der Luftraum- und Verfahrensplanung sowie bei Prozessen zwischen Cockpitbesatzungen und Fluglotsen CDO-Anflüge unterstützen können.

Begriffsdefinition Continuous Descent Operations (CDO)

Der Begriff CDO wird an vielen Stellen verwendet und ist derzeit in der luftfahrtbezogenen Umwelt Diskussion ein oft verwendetes Schlagwort.

In diesem Abschnitt werden verschiedene Definitionen vorgestellt und diskutiert, ob es sinnvoll ist, den CDO-Begriff weiter zu unterteilen, um zwischen verschiedenen Ansätzen zu differenzieren.

Grundsätzlich lässt sich zwischen qualitativen und quantitativen Definitionen unterscheiden. Die qualitativen Definitionen beschreiben, wie ein CDO-Anflug aussehen soll und dienen der Beschreibung sowie einem Verständnis der Verfahren. Ein schematischer Vergleich zwischen einem stufenweisen (konventionellen) und einem CDO-Anflug ist in Abbildung 1 dargestellt. Die quantitativen Definitionen liefern Grenzwerte und Berechnungsmethoden, um Anflüge zu bewerten und Vergleiche anzustellen. Diese werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

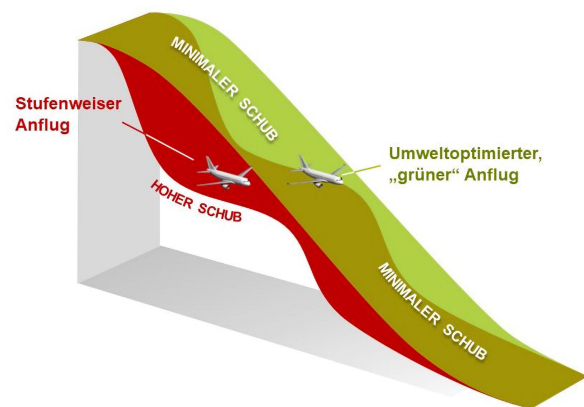


Abbildung 1: Prinzipbild eines stufenweisen Anfluges (rot) und eines umweltoptimierten Anfluges (grün).

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist der Geltungsbereich bzw. das Ziel des CDO. Ein idealer CDO startet am TOD des Fluges und endet mit dem Aufsetzen auf der Landebahn. Hierbei werden sowohl Treibstoffverbrauch und Emissionen wie in den meisten Fällen auch die Lärmbelastung reduziert. Dieser ideale CDO ist aufgrund verschiedenster Gründe selten möglich und ist häufig nicht gemeint, wenn von CDOs gesprochen wird. Meist liegt der Fokus auf der Reduktion der Lärmimmissionen und die Umsetzung konzentriert sich auf den Flughafennahbereich.

Somit lässt sich in der Diskussion zwischen CDOs unterscheiden mit Fokus auf den Treibstoffverbrauch, die den gesamten Anflug betrachten, und CDOs mit Fokus auf Lärm, die sich auf den Flughafennahbereich und geringere Höhen beschränken.

Die erste offizielle Definition von CDO stammt von der ICAO und wird im Doc 9931: Continuous Descent Operations (CDO) Manual vorgestellt [1]. Die Definition beschreibt CDO als ein Verfahren, das durch die Luftraumgestaltung sowie das Verfahrensdesign und Air Traffic Control (ATC) ermöglicht wird. In diesem Verfahren sinkt ein ankommendes Luftfahrzeug soweit möglich kontinuierlich, bei minimalem Triebwerksschub und in einer Konfiguration mit niedrigem aerodynamischen Widerstand. Der CDO startet am TOD und endet mit dem Final Approach Point (FAP). Hierbei werden die geflogenen Levelsegmente, die Lärmemission, der Treibstoffverbrauch und damit verbundene Emissionen sowie auch die Kommunikation zwischen Lotsen und Pilot reduziert. Gleichzeitig soll die Vorhersagbarkeit steigen und die Flugstabilität erhöht werden [1].

Darüber hinaus wird eine Beschreibung einschließlich Abbildung geliefert, wie sich berechnen lässt, über welche Höhenbereiche sich CDO-Anflüge der gängigsten Flugzeugmuster und Konfigurationen aufteilen würden. Dies kann für die Gestaltung von Verfahren verwendet werden.

Die Reduktion von Treibstoffverbrauch und damit verbundenen Emissionen sowie der Lärmemission deckt sich mit dem allgemeinen Verständnis eines CDO. Die Reduktion des Kommunikationsaufwandes zwischen Piloten und Lotsen sowie die Erhöhte Vorhersagbarkeit hingegen ist kein direktes Ziel des gängigen CDO-Ansatzes. Diese Punkte stellen auf kurze Sicht erst einmal Herausforderungen von CDO dar, die gelöst werden müssen. So ist davon auszugehen, dass die vermehrte Verwendung von CDO unter den derzeitigen technischen Voraussetzungen zunächst die Kommunikation zwischen Piloten und Lotsen erhöht und die Vorhersehbarkeit der Trajektorien sinkt, da es starke Unterschiede in den Sinkprofilen gibt. Auf lange Sicht und unter Betrachtung neuer technischer Lösungen ist das Ziel, die Kommunikation zu reduzieren und die Vorhersagbarkeit zu erhöhen, sehr sinnvoll.

Eine weitere offizielle Definition ist von der CDO / CCO Taskforce der EUROCONTROL die im European CCO / CDO Action Plan dargestellt wird [2]. Diese folgt weitestgehend der ICAO-Definition (International Civil Aviation Organization). Der CDO soll es

dabei dem Luftfahrzeug ermöglichen einem „flexiblen und optimalen Flug Pfad zu folgen, welcher umweltbezogene und wirtschaftliche Vorteile liefert – Reduktion von Treibstoffverbrauch, gasförmiger Emissionen und Lärm - ohne negative Auswirkungen auf die Sicherheit zu haben“ [2].

Im Gegensatz zur ICAO-Definition wird hier nicht von möglichst kontinuierlichen Anflügen gesprochen, sondern gesagt, dass die Anflüge einem möglichst „flexiblen und optimalen Pfad“ [2] folgen sollen. Auf eine reduzierte Kommunikation oder verbesserte Vorhersagbarkeit wird nicht eingegangen, dafür aber von einer Vermeidung negativer Auswirkungen auf die Sicherheit gesprochen. In dieser Definition findet sich nun auch die bereits angesprochene Unterscheidung zwischen lärm- und treibstoffreduzierenden CDOs.

Da diese Definitionen keine klaren Grenzwerte enthalten und von der Begriffswahl oft sehr vage gehalten sind (z.B. „möglichst“, „im Idealfall“) eignen sie sich schlecht, um die Umsetzung von CDOs zu tracken oder zu vergleichen.

Eine alternative Definition von CDOs, die aus Sicht der Flugsicherungen Anwendung finden kann, besteht über erteilte Freigaben. In diesem Fall entspricht ein Anflug einem CDO, wenn dieser vom Lotsen als ein CDO-Anflug freigegeben wurde. Eine Analyse, ob der Anflug vertikal optimal geflogen wird, erfolgt nicht, da dies außerhalb des Einflussbereichs der Flugverkehrskontrolle liegt. Der entscheidende Punkt ist in diesem Fall, wie eine solche Freigabe definiert ist. Im Idealfall sollte die Freigabe dem Piloten alle Freiheiten lassen, damit er das für diesen Anflug optimale Profil abfliegen kann. Die optimalen Sinkprofile hängen bereits stark von Flugzeugtyp und Beladung ab. Darüber hinaus ist der nach Umweltgesichtspunkten optimale Anflug oft nicht der für die Airline optimale Anflug, der sich aus dem Cost Index (CI) bestimmt. Dies erhöht die Streuung der Anflugprofile immens und macht eine so generische Freigabe kompliziert und nur bei sehr wenig Verkehr umsetzbar. Kleine Schritte von einem gestuften Anflug zu einem CDO lassen sich hiermit nicht messen. Dazu kommt, dass Anflüge die optimal fliegen, aber nicht als CDO freigegeben sind, nicht gezählt werden.

Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es einfach zu messen ist, und die Performance der Flugsicherung beim Thema CDO nicht von den Piloten und der Airline beeinflusst wird. Aktuell sind die Daten zu erfolgten Freigaben zumindest in Deutschland nicht

verfügbar, so dass eine Statistik derzeit nicht möglich ist.

Wie die Bezeichnung „CDO“ schon beinhaltet, sollen damit „kontinuierliche Anflüge“ illustriert werden. Ein Anflug ist allerdings nicht zwingend energetisch und somit vom Treibstoffverbrauch optimal, nur weil er kontinuierlich erfolgt. In Extremfällen kann ein Anflug sehr flach unter zusätzlichem Triebwerksschub oder sehr steil unter Verwendung der Bremsklappen erfolgen. Diese Fälle sind in den gängigen Definitionen ausgeschlossen, da der Anflug mit minimalem Triebwerksschub und in einer Konfiguration mit niedrigem aerodynamischen Widerstand erfolgen soll. Allerdings gibt es auch in diesem Fall noch ein breites Spektrum an möglichen Anflugprofilen. Der TOD kann sehr spät gelegt werden und der Anflug erfolgt sehr steil und mit einer hohen Geschwindigkeit. Effizienter ist es jedoch, wenn der TOD deutlich früher gelegt wird (Verkürzung der Flugstrecke mit Schub für Reiseflug) und der Anflug mit der optimalen Gleitgeschwindigkeit erfolgt. Dies zeigt, dass man zwischen kontinuierlichen und optimalen (sowie kontinuierlichen) Anflügen unterscheiden muss.

Abbildung 2 zeigt zufällig ausgewählte Anflüge der A320- und B737-Familie auf die Flughäfen Frankfurt und Oslo im Vergleich. Es ist zu erkennen, dass die ausgewählten Anflüge auf Oslo weniger Levelsegmente aufweisen als die Anflüge auf Frankfurt. Dies deckt sich auch mit Auswertungen von EUROCONTROL, auf die an späterer Stelle eingegangen wird. Ebenfalls zeigt sich hier der zuvor angesprochene Punkt, dass unterschiedlich gestaltete Anflüge trotzdem alle kontinuierlich sein können. So sind die hier gezeigten Anflüge auf Oslo nahezu kontinuierlich, der Punkt an dem die Reiseflughöhe verlassen wird und die Sinkrate unterscheiden sich jedoch trotzdem deutlich.

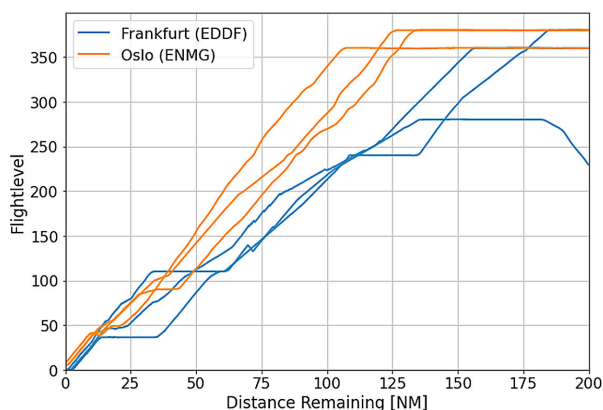


Abbildung 2: Zufällig ausgewählte Anflüge der A320- und B737-Familie auf die Flughäfen Frankfurt und Oslo am 28.03.2023. Daten: OpenSky [3].

Messung und Bewertung von (CDO)-Anflügen

Um zu beurteilen, zu welchem Grad CDO-Anflüge umgesetzt werden, und Verbesserungen aufzuzeigen, werden Bewertungskriterien benötigt. Dies ist wichtig, um den Status Quo zu bestimmen und den Effekt von getroffenen Maßnahmen zu zeigen. Darüber hinaus könnten diese Messungen als direktes Feedback für Lotsen verwendet werden, um darzustellen, wie nah am Optimum ein Flugzeug gerade operiert.

Bei den Bewertungskriterien kann generell unterschieden werden zwischen binären Kriterien, die rein zwischen CDO / kein CDO trennen, und quantitativen Kriterien, die darstellen zu welchem Grad ein Anflug einem CDO entspricht. Die Bewertungskriterien werden nach ihrem Ansatz in drei verschiedene Gruppen unterteilt: Geometrische Ansätze, Ansätze basierend auf Simulationen und Ansätze basierend auf Messwerten. Darüber hinaus ist der Betrachtungsbereich (Treibstoff / Gesamter Anflug oder Lärm / Flughafennahbereich) der Bewertungskriterien entscheidend. Die meisten Bewertungskriterien können für beide Bereiche angewendet werden, beim Vergleich der Ergebnisse muss dies jedoch Beachtung finden.

Beim **geometrischen Ansatz** wird das Flugprofil (Höhe) über der verbleibenden Strecke oder Zeit analysiert. Der Fokus liegt auf der Identifikation von Levelsegmenten. Die Grenzwerte unterscheiden sich dabei je nach Ansatz. Der gängigste ist die von der CDO-Taskforce der EUROCONTROL vorgeschlagene Ansatz [6]. Hier ist als Levelsegment definiert, wenn eine Sinkrate von 300 Fuß pro Minute (ft/min) unterschritten wird. Der Betrachtungsbereich beträgt generell 200 Nautische Meilen (NM) verbleibende Flugstrecke. Um ausschließlich den Sinkflug zu betrachten, wird der TOD bestimmt und die Auswertung beginnt an diesem Punkt. (Für Details zur Berechnung siehe [2].) Die Betrachtung endet in 1800 ft AGL (Above Ground Level), da sich das Flugzeug in dieser Höhe in der Regel bereits auf dem Gleitweg des Instrumentenlandesystems (ILS) befindet. Um Ungenauigkeiten in den Messdaten zu filtern, werden Levelsegmente die kürzer als 20 Sekunden sind, aus der Betrachtung ausgeschlossen.

Basierend auf den ermittelten Levelsegmenten ergeben sich Kennwerte wie die Zeit oder Strecke im Levelflug, sowie der prozentuale Anteil am gesamten Anflug. Darüber hinaus kann eine binäre Klassifizierung stattfinden. In der aktuellen EUROCONTROL-

Auswertung ist ein Anflug ein CDO-Anflug, wenn es keine Levelsegmente gibt, die länger als 20 Sekunden sind. Diese Kennzahlen können für den einzelnen Anflug betrachtet werden oder über alle Anflüge gemittelt werden. Die Ergebnisse werden im EURO-CONTROL-CDO-Dashboard [3] dargestellt.

Der Vorteil des geometrischen Ansatzes ist, dass die notwendigen Daten zur Auswertung vorhanden sind und die Ergebnisse gut vergleichbar sind. Der Nachteil des Ansatzes ist die Genauigkeit der Ergebnisse, bzw. deren Aussagekraft. Mit diesem Ansatz wird lediglich zwischen Levelflug und Sinkflug unterschieden. Ob die Sinkrate für den jeweiligen Anflug verbrauchsminimal ist, wird nicht betrachtet. So kann es sein, dass ein kontinuierlicher, sehr flacher Anflug, der weiterhin Triebwerksschub erfordert, oder ein kontinuierlicher, sehr steiler Anflug unter Verwendung der Bremsklappen, die beide als CDO gewertet werden, eigentlich mehr Treibstoff verbrauchen als ein Anflug, der im idealen Gleitflug erfolgt, aber von Levelsegmenten unterbrochen ist. Ebenso erhalten ein Anflug im optimalen Gleitflug und ein sehr steiler Anflug, der länger im Cruise Setting geflogen ist die gleiche Bewertung, da die zusätzliche Zeit im Reise-
flug nicht berücksichtigt wird.

Ein weiteres mögliches Bewertungskriterium basiert auf **Simulationen**. In diesem Fall wird der Treibstoffverbrauch für die tatsächlich geflogene Trajektorie berechnet und mit dem Treibstoffverbrauch der idealen Trajektorie verglichen. Dies könnte z.B. mithilfe des BADA-Modells (Base of Aircraft Data) erfolgen. Für die Erhöhung der Genauigkeit würde die Simulation mit Messwerten von realen Flügen kalibriert und validiert werden. Dieses Verfahren wäre deutlich genauer und würde direkten Bezug auf den Treibstoffverbrauch nehmen. Für eine genaue Berechnung sind jedoch u.a. Daten zum Flug wie Gewicht, Beladung, Wind Situation notwendig. Diese stehen der Flugsicherung bzw. generell zum aktuellen Zeitpunkt nicht zur Verfügung. Somit gelten diese Einschränkungen auch für Berechnungsmodelle wie ETAS (Enhanced Trajectory Analysis System) [4]. Darüber hinaus ist eine Simulation jedes einzelnen Fluges sehr aufwändig.

Die letzte hier erwähnte Bewertungsmethode basiert auf **Messwerten** des Treibstoffverbrauchs. Dies wäre theoretisch die genaueste Methode, da man exakte Verbrauchswerte nutzt. Das große Problem hierbei ist jedoch, dass die Referenz, also der Treibstoffverbrauch des optimalen Anfluges fehlt. Die Referenz ist für jeden Flug unterschiedlich, da sie vom Gewicht, der Beladung, den Windverhältnissen und

vielen weiteren Parametern abhängt, die für jeden Flug unterschiedlich ist. Darüber hinaus liegen Daten der tatsächliche Treibstoffverbräuche u.a. der Flugsicherung zurzeit nicht vor.

An den vorangehenden Ausführungen sieht man, dass es aktuell kein perfektes Bewertungskriterium für CDO gibt. Die Kriterien sind entweder sehr ungenau oder es fehlen (selbst bei der Methode per Simulation) die dafür notwendigen Daten. Trotz der durchaus großen Schwächen des geometrischen Ansatzes, ist es durch das Vorhandensein der Daten aktuell das einzige anwendbare Bewertungskriterium. Bei der Verwendung sollten einem allerdings die Grenzen der Aussagekraft bewusst sein. Nur weil ein Anflug nach diesem Bewertungskriterium ein CDO ist, heißt es nicht, dass der Anflug treibstoffoptimal erfolgt ist.

Stand des Umsetzungsgrades von CDO im deutschen Luftraum

An den großen, von der DFS Deutschen Flugsicherung GmbH (DFS) kontrollierten Verkehrsflughäfen wurden in den letzten Jahrzehnten CDO-Verfahren etabliert. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten werden unterschiedliche Verfahren angewandt, z.B. als Transitions oder STARs (Standard Arrival Routes) mit wegpunktbezogenen Anflughöhenvorgaben oder CDOs auf taktischer Basis durch die Fluglotsen im Strecken- und Anflugbereich.

In der DFS-Betriebsanweisung Flugverkehrsmanagement [4] ist für CDO-Anflüge festgelegt: „Ein CDO kann von jeder Position und aus jeder Höhe durchgeführt werden. Er ist nicht an bestimmte Luftfahrzeugmuster gebunden und sollte, sofern möglich, entweder vom Lotsen angeboten oder kann vom Luftfahrzeugführer angefordert werden. Ein CDO ist abzulehnen bzw. nicht anzuwenden, wenn:

- abzusehen ist, dass dadurch andere Luftfahrzeuge in der Anflugfolge erkennbar verzögert werden müssen oder
- aus Sicherheitsgründen (z.B. Staffelung, Luftraumbeschränkungen) die erfolgreiche Anwendung des Verfahrens zweifelhaft bleibt.“

Ziel der Verfahren und der flugsicherungs- betrieblichen Vorgaben ist der Einsatz von CDOs in größtmöglichem Umfang, wobei derzeit beobachtbar ist, dass der Anteil von ununterbrochenen Sinkflügen auf deutsche Verkehrsflughäfen ab TOD sehr gering ist, insbesondere auf die hochfrequentierten Flughäfen Frankfurt und München.

Ein beispielhafter Vergleich der deutschen Flughäfen (basierend auf dem geometrischen Ansatz von EUROCONTROL[5]) ist in Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 3: Summe von Levelflight-Flugzeiten beim Anflug auf deutsche Flughäfen ab TOD (Quelle: EUROCONTROL, Daten für April 2023 [5]).

Die als *Transition to Final Approach* eingeführten CDO-Verfahren starten größtenteils in einer Höhe von *Flight Level* (FL) 80 bis FL120. Somit haben sie vorrangig die Vermeidung von Lärmemission bzw. -immission zum Ziel, schöpfen aber nicht das volle Potential in Bezug auf Treibstoffreduktion aus. Ebenso haben sie keine zwingende Auswirkung auf den Anteil der Anflüge, die einen CDO ab TOD durchführen, welche im EUROCONTROL-Vergleich ausgewertet werden.

Darüber hinaus können diese CDO-Verfahren nicht mit dem Flugplan aufgegeben werden, sondern nur von den Lotsen freigegeben werden. Dies erfolgt nur in Zeiten von wenig Verkehr, in welchen die Flugzeuge meistens über Directs noch direkter gelotet werden, und der kontinuierliche Sinkflug in größeren Höhen beginnt, als das CDO-Verfahren es anbietet. Aus diesen Gründen werden derzeit viele der Verfahren wieder abgeschafft.

Es gibt einzelne Verfahren, die aus größeren Höhen starten. Hier gibt es ebenfalls *Transition to Final Approaches*, für die die oben genannten Einschränkungen gelten, sowie einzelne STARS die als *Optimised Profile Descent Verfahren* (OPD) (wie z.B. EMPAX in Frankfurt) entwickelt wurden [6]. Diese starten bereits im oberen Luftraum und spannen an den Wegpunkten Höhenfenster auf, in denen der Anflug erfolgen muss. Um diese Vorgaben einzuhalten, ergibt sich nur ein sehr schmaler Geschwindigkeitsbereich, in dem der Anflug erfolgen kann, welcher sich zudem zwischen verschiedenen Flugzeugtypen unterscheidet.

Hierdurch ist es den Lotsen nicht möglich eine Staffelnung durch zuweisen von Geschwindigkeiten herzustellen, weshalb das Verfahren nur bei geringen Verkehrsdichten angewendet werden kann. In diesem Fall werden Directs wieder bevorzugt verwendet.

Somit lässt sich zusammenfassen, dass es zwar an den meisten Flughäfen CDO-Anflugverfahren gibt, diese durch ihre Einschränkungen allerdings nur in Zeiten von wenig Verkehr genutzt werden können. Da die Lotsen in dieser Zeit bevorzugt taktische CDOs anbieten, finden sie wenig Anwendung.

Gründe für unausgeschöpfte Potentiale hinsichtlich optimalen Sinkflugs

Die Umsetzung klimaoptimierter Anflüge – günstigs-tenfalls ab Reiseflughöhe – unterliegt zahlreichen Rahmenbedingungen, bezogen auf Flugverkehrsmanagement und der Flugzeugführung. Die Abbildung 4 zeigt eine Auswahl dieser Bedingungen.



Abbildung 4: Abhängigkeitsdiagramm der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Möglichkeiten einer optimierten vertikalen Flugführung (Ist-Situation).

Die Grafik zeigt, dass es sich bei der Umsetzung von CDO-Anflügen um eine Aufgabe in einem komplexen Umfeld handelt: Nötige Elemente sind auf verschiedene Weise miteinander verbunden, unterliegen systeminternen, nicht allgemeinbekannten Regeln und unterliegen keinerlei übergeordneten Orchestration. Wesentliche luftseitige Prozesse und Informationen (Flugleistungen, CI) sind den Fluglotsen gar nicht bekannt. Auf der anderen Seite hat die Cockpitbesatzung keinerlei Information über die Luftraum- und Pistenauslastung und die Gestaltung der Lufträume im weiteren Flugverlauf.

Eine wesentliche Verbesserung für die Umsetzung treibstoffoptimierter Flugverfahren würde sich ergeben, wenn zwischen relevanten Bereichen Informationsteilung und eine auf Prozesse bezogene Verzahnung erreicht werden könnte (Abbildung 5).



Abbildung 5: Abhängigkeitsdiagramm der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Möglichkeiten einer optimierten vertikalen Flugführung (Ziel-Situation, orangefarben unterlegt der Anpassungsbedarf für die Vernetzung).

Im Folgenden wird auf drei der Kernelemente von CDO-Anflügen näher eingegangen: Die Lotsen, die Piloten und die Verfahren und Luftströme.

Bei den **Lotsen** hat die Umsetzung von CDO nicht die erste Priorität, im Fokus der Arbeitsweisen steht Sicherheit und mit Ausnahme der Nachtstunden Kapazität. Interviews mit Lotsen unterschiedlicher Einsatzberechtigungsgruppen (EBGn) in den Kontrollzentralen München, Karlsruhe und Langen ergaben die breite Auffassung, dass CDOs nur angeboten werden können, wenn sehr wenig Verkehr herrscht. Zudem vertraten die Lotsen die Ansicht, dass die angebotenen Verfahren und definierten Übergabehöhen bereits optimal sind im Sinne einer möglichst guten Erfüllung der Kriterien „Sicherheit“, „Kapazität“ und eben auch „Umwelt“. Diese pauschale Feststellung kann mit Blick auf die Einflussfaktoren eines „umweltoptimierten“ Anflugs nicht nachvollzogen werden, allein schon da die optimalen Anflugprofile stark variieren, je nach Flugzeugtyp, Beladung, Wetterbedingungen, etc.

Auf Basis der den Fluglotsen aktuell zur Verfügung stehenden Daten ist es nicht möglich abzuleiten, wie ein optimales Sinkprofil für einen Anflug gestaltet sein muss. Dieser Umstand erschwert den Lotsen die Einplanung eines CDO in die weitere Verkehrsplanung. Die einzige Möglichkeit optimale Anflüge durchzuführen ist es, dem Piloten die Freigabe zu erteilen, nach eigenem Ermessen zu sinken. Dies ist jedoch nur bei sehr wenig Verkehr möglich, da ein

sehr großes Höhenband freigehalten werden muss. Damit der Pilot optimal sinken kann, benötigt er eine möglichst genaue Vorhersage der verbleibenden Flugstrecke, der Distance to Go (DtG). Für geschlossene Anflugverfahren ohne Sequenzierung kann diese genau bestimmt werden. In Fällen von Vectoring oder für Sequenzierungszwecke unterschiedlich lange ausgeflogene Transitions gibt es aktuell jedoch keine genaue Vorhersage der DtG, wenngleich hier der Einsatz von Maschinellem Lernen ggf. helfen kann.

Ein weiteres Problem ist die fehlende Zuordnung der Verantwortung, wer einen CDO zu initiieren hat und die fehlende Möglichkeit der vereinfachten Koordination. CDO-Anflüge durchfliegen eine Vielzahl an Sektoren und in der Regel mindestens zwei Kontrollzentralen. Dies erschwert die Abstimmung zusätzlich.

In Gesprächen mit einzelnen **Piloten** der Lufthansa zeigten diese grundsätzlich ein größeres Interesse, CDOs anzuwenden. Allerdings gibt es auch hier eine Vielzahl an Hürden. Gerade alte Flight Management Systeme (FMS) haben Probleme, komplexe Anflugverfahren wie die OPD-Verfahren, bei denen es für jeden Wegpunkt ein zulässiges Höhenband gibt, zuverlässig abzufliegen. Manche FMS können nicht alle Einschränkungen in Betracht ziehen und rechnen nur zum nächsten Wegpunkt, was im weiteren Verlauf zu Problemen führt. So kann es in diesem Fall dann dazu kommen, dass entweder mehr Schub gegeben werden muss, oder ein Ausfahren der Bremsklappen notwendig ist, um die vorgegebenen Grenzen einzuhalten. Dies steht dann im Gegensatz zum Grundgedanken eines CDOs. Des Weiteren gibt es Probleme, dass zu starke Sinkraten vor Levelsegmenten ungewünschte TCAS-Meldungen (Traffic Alert and Collision Avoidance System) erzeugen. Aus diesen Gründen ist das Vertrauen in das Flight Management System (FMS) eingeschränkt und viele Piloten planen den Anflug nach wie vor mit Faustformeln und fliegen ihn mit fest eingestellten Sinkraten ab. Um einen optimalen CDO zu erreichen, müsste jedoch der ganze Anflug vom FMS gestaltet werden, da das FMS die Flugleistung des Flugzeugs in der aktuellen Konfiguration und Beladung am besten „kennt“.

Ein weiterer Punkt, der nicht den Piloten direkt betrifft, aber stark damit zusammenhängt, ist der Cost Index CI. Vereinfacht gesagt gibt der CI an, ob der Fokus auf einer Reduktion des Treibstoffverbrauchs (niedriger CI) oder einer Reduktion der Flugzeit (hoher CI) liegt. Ist ein hoher CI gewählt, optimiert das FMS den Anflug für diesen Fall. Der Anflug ist für die Airline optimal, jedoch nicht optimal bezogen auf die Umwelt.

Der letzte Aspekt der näher betrachtet wird sind die **Verfahren** und die **Luftraumstruktur**. Probleme, die bei speziellen CDO-Verfahren auftreten, sind bereits besprochen worden. Hier soll darauf eingegangen werden, welche generellen Probleme es bei den Verfahren und der Luftraumstruktur gibt, die CDOs im Allgemeinen entgegenstehen. Hierbei wird zwischen dem Übergang vom Reiseflug in den Anflug und vom Flughafennahbereich unterschieden.

Der TOD liegt im oberen Luftraum. Im Idealfall verbleibt ein Flugzeug so lange in Reiseflughöhe, bis er die DtG erreicht, ab welcher er kontinuierlich bis zum Flughafen sinken kann. Es gibt jedoch mehrere Gründe, weswegen die Reiseflughöhe bereits früher verlassen wird. Gründe hierfür sind z.B. dass Platz für kreuzende Verkehrsströme geschaffen werden muss, oder nicht ausreichend Kapazität im oberen Luftraum verfügbar ist. Gerade im zweiten Fall sinkt das Flugzeug so weit, bis er gerade in den unteren Luftraum einfliegt. Die verbleibende Distanz bis zum Anschneiden des eigentlich optimalen Anfluges verbleibt er in einem Levelsegment. Um dies zu verbessern wäre eine vereinfachte Koordination zwischen den beiden Centern hilfreich. Aktuell ist kein Verfahren und kein Prozess etabliert, um anzubieten oder nachzufragen, ob das Flugzeug länger im oberen Luftraum verbleiben kann, wenn es die Verkehrssituation zulässt.

Im Flughafennahbereich treten die Hürden vor allem bei Flughäfen mit viel Verkehr und mehreren Landebahnen auf. Ein hohes Verkehrsaufkommen erfordert die Verwendung von Transitions zum Sequenzieren. Da die Piloten und häufig die Lotsen im Voraus nicht wissen, wie weit die Transition ausgeflogen wird, befinden sich die Flugzeuge bereits zu Beginn der Transition in einer Höhe, die ein Eindrehen auf den Endanflug (das Final) erlauben würde. Dies führt bei Ausfliegen der Transition zu sehr langen Horizontalflugsegmenten. Hier würde eine frühe Kenntnis der Lage des Eindrehpunktes helfen, den Sinkflug entsprechend zu planen und zu optimieren. Im Luftfahrtforschungsvorhaben *FUTURE (Fluglotsenunterstützung Endanflug)* wurde unter der Leitung der DFS ein Endanflugassistenz-System entwickelt, das diese Funktionalität umfasst [7]. Der „Spacing Assistant“ berechnet für jedes anfliegende Flugzeug u.a. unter Berücksichtigung der Höheninformation und Kompressionseffekten auf dem Endanflug eine Trajektorie, die auch die ideale Position für das Verlassen der Transitions beinhaltet. Dieser Eindrehpunkt wird wenige Minuten vorher berechnet. Grundsätzlich bietet sich allerdings das Potential, den Eindrehpunkt mit einem größeren zeitlichen Vorlauf zu berechnen.

Damit könnte an Flughäfen, die zukünftig mit diesem System ausgerüstet werden, der treibstoffoptimierte Anflug u.U. bis zu diesem Punkt geführt werden und somit der Horizontalflugabschnitt auf die Strecke ab diesem Punkt bis zum Erfliegen des ILS-Gleitweges beschränkt sein.

Eine Situation die ebenfalls Horizontalflugsegmente erzwingt, ist der unabhängige Parallelbetrieb zweier Pisten. In diesem Fall ist vorgeschrieben, dass die beiden Luftfahrzeuge entweder in der Höhe mit 1000 ft oder horizontal mit 3 NM zueinander gestaffelt sind, bis sie auf dem Endanflugkurs innerhalb der Normalanflugzone etabliert sind [8]. Bei Pisten, die weniger als 3 NM auseinanderliegen, was für die meisten Konstellationen zutrifft, ist ein unabhängiger Betrieb nur durch Einhalten der Höhenstaffelung möglich. In Frankfurt wird dies gelöst, indem Anflüge auf die Südbahn in einer Höhe von 4000 ft anfliegen müssen, Anflüge auf die Landebahn Nordwest in 5000 ft oder mehr [9]. Somit ist sichergestellt, dass die beiden Anflüge stets zueinander gestaffelt sind. Diese Höhen werden jeweils erst verlassen, wenn der Gleitpfad des ILS angeschnitten wird. Zu diesem Zeitpunkt ist der Flug auf dem Endanflugkurs etabliert und muss keine Höhen- oder Horizontalstaffelung mehr einhalten. Da es bei hohem Verkehrsaufkommen zu sehr langen Anflügen kommen kann, die bereits mit Endanflugkurs stattfinden, allerdings vor Etablierung auf dem Endanflugkurs, muss bereits hier die Höhenstaffelung eingehalten werden. Dies führt zu sehr langen und niedrigen Levelsegmenten. Bei Flughäfen mit nur einer Piste gibt es diese Einschränkungen nicht. Jedoch gibt eine DFS-Betriebsanweisung vor, dass ein Luftfahrzeug so auf den Endanflugkurs geführt werden soll, dass vor Beginn des Endsinkfluges mindestens 1 NM Geradeaus- und Horizontalflug gewährleistet sind [8]. Dies führt auch an kleinen Flughäfen mit wenig Verkehr zu kurzen Levelsegmenten im Anflug. Dies ist bei unabhängigem Parallelbetrieb ebenfalls gefordert, wird hier allerdings in der Regel von den sowieso vorhandenen Levelsegmenten zur Einhaltung der Staffelung abgedeckt.

Wirkung von vermehrten CDO-Anflügen auf unterschiedliche KPI der Flugsicherung und der Airlines

Auf den ersten Blick verheißt die vermehrte Umsetzung treibstoffoptimierter Anflüge deutliche positive Auswirkungen auf die Leistungskennzahlen von Flugsicherung und Fluggesellschaft (bezogen auf den Einzelflug). Allerdings lässt sich diese Erwartung beim Vergleich mit den geltenden Key Performance Indikatoren (KPI [10]) nicht nachvollziehen.

Die folgende Abbildung 6 zeigt die Wirkung zweier möglicher Entwicklungen auf die ATC-KPI: Zum einen die vermehrte Umsetzung von CDO-Anflügen ohne weitere Lotsenassistenzen, zum anderen unter Annahme einer wirkungsvollen Unterstützung der Fluglotsen bei CDO-Anflügen.

ATC-KPA:	Safety	Environment		Capacity	Cost-Efficiency
Relevante KPI:	Rate an sicherheitsrelevanten Staffelungsunterschreitungen	Kürzeste horizontale Flugdistanz bis 40NM vor Zielflughafen - Gemäß Flugplan - Tatsächlich geflogen	Hypothetische, neue KPI: Kerosinmehrverbrauch im Vergleich zum optimalen vertikalen Flugverlauf	ATFM-Delay aufgrund verminderter Bahnkapazität	Flugsicherungsgebührenrate
Auswirkung von CDO-Anflügen ohne weitere technische Unterstützung	-	0	+	--	-
Zielzustand (Assistenzsystem vorhanden, Verfahren, Arbeitsweisen und Prozesse optimiert)	0	0	++	-	--

Abbildung 6: Potentielle Wirkung vermehrter CDO-Anflüge auf die KPI der DFS (auf Grundlage der Vorgaben aus der SES Performance Scheme Reference Period 3 [10]). Der orangefarbig gerahmte Teil der Tabelle stellt die Wirkung der Maßnahmen auf eine hypothetische KPI dar, die den Kerosinverbrauch für Anflüge berücksichtigt.

Es ist keine positive Wirkung auf bestehende KPI zu erwarten. Sicherheit, Kapazität und Kosten würden sich negativ entwickeln. Allein die (derzeit noch hypothetisch betrachtete und nur zur Veranschaulichung eingefügte) KPI „Kerosinmehrverbrauch im Vergleich zu optimalem vertikalem Verlauf“ würde sich verbessern. Die Übersicht weist darauf hin, dass die Diskussion über passende Umwelt-KPI für Flugsicherungen ggf. neu geführt werden sollte.

Abbildung 7 zeigt die Auswirkung eines kerosinsparenden Anflugs auf die relevanten flugbetrieblichen Kennzahlen von Ryanair [11].

Airline-KPA	Kosten	Kosten	Kosten, Umlaufstabilität
Relevante KPI	Cost Index Compliance	Actual vs. Planned fuel burn	Arrival On-Time-Performance
Auswirkung von vermehrten CDO-Anflügen ohne weitere technische Unterstützung bei ATC	Potentiell besser	Positive Auswirkungen zu erwarten (abhängig von Planung)	Deutlich negativ aufgrund von Kapazitätseinschränkungen am Zielflughafen
Zielzustand (Bodenseitige Assistenzsysteme vorhanden, Verfahren, Arbeitsweisen und Prozesse optimiert)	Positive Auswirkungen durch Überdeckung von gewünschtem Sinkflug inkl. TOD und dem von ATC angebotenen Flugverlauf	Deutlich positive Auswirkungen zu erwarten (abhängig von Planung)	Negativ aufgrund von Kapazitätslimitierungen am Zielflughafen

Abbildung 7: Hypothetische Wirkung vermehrter CDO-Anflüge auf die Operational Performance KPI für individuelle Ryanair-Flüge, beschränkt auf luftseitige Prozesse.

Da sich alle KPI auf Kosten beziehen und sich die finanziellen Auswirkungen der einzelnen KPI-Folgen pauschal nicht beziffern lassen, kann nur grob abgeschätzt werden, ob sich im Saldo ein positiver Effekt ergibt.

Gemessene Benefits von CDO-Anflügen ab TOD

Bordgestützte Berechnungen zu CDO-Anflügen auf den Flughafen Schiphol [12] zeigen, dass für das bei Ryanair gebräuchliche Muster Boeing B737-800 ein durchschnittliches Einsparpotential von rund 130 kg CO₂ verbunden ist. Bei angenommen 50 Cent Kosten pro kg Kerosin ergibt sich damit pro „perfektem“ CDO-Anflug ein finanzieller Vorteil von 65 EUR über die Treibstoffreduktion. Dieser Wert widerspiegelt aktuelle Verhältnisse, z.B. die Steuerfreiheit für Kerosin. Beim Einsatz von alternativen und weitgehend CO₂-neutralen Kraftstoffen wie PtL (Power to Liquid) ergäbe sich unter der Annahme des Aufwands von 33 kWh Strom (angenommener Marktpreis derzeit 0,05 EUR pro kWh) zur Erzeugung von 1 kg Treibstoff eine Einsparung von rund 215 EUR pro Anflug – mehr als dem dreifachen Wert von Kerosin [27], [28].

Exemplarische Messungen

Um die Treibstoffersparnis in Relation zum tatsächlichen Verbrauch während der Anflugphase zu setzen, wurden Ende August 2023 durch die Cockpitcrew (Fluggesellschaft: Eurowings) für zwei inner-europäische Flüge eines Airbus A320 exemplarisch der Kerosinverbrauch im Anflug notiert [13]. Die beiden Anflüge sind in Abbildung 8 dargestellt. Der erste Anflug (EWG69J) erfolgt nahezu kontinuierlich ohne längeres Levelsegment, allerdings mit einer verhältnismäßig hohen Geschwindigkeit und von einer niedrigen Reiseflughöhe (FL320) und verbraucht 280 kg Kerosin bei einer Dauer von 20 Minuten. Der zweite Anflug (EWG1HR) erfolgt aus einer größeren Höhe (FL390) und hat ein langes Levelsegment in FL330. Danach erfolgt der Anflug nahezu kontinuierlich. U.a. durch die deutlich längere Dauer von 35 Minuten werden während des Anflugs 520 kg Kerosin verbraucht. Pro Minute Anflug verbrauchen beide Flüge rund 14 kg Kerosin, obwohl der Anflug auf PMI ein langes Levelsegment beinhaltet. Dies könnte sich erklären lassen, da der erste Anflug mit einer deutlich höheren Geschwindigkeit und, nach Aussage des Piloten, im ersten Teil mit zusätzlichem Schub erfolgte. Somit ist dieser Anflug ebenfalls nicht optimal, obwohl das Vertikalprofil einen kontinuierlichen Anflug zeigt. Das Beispiel verdeutlicht nochmals, dass die geometrische Interpretation vertikaler Flugverläufe allein kaum einen Schluss auf Verbräuche und die Umwelteffizienz von Anflügen zulässt und die Verwendung u.a. von Borddaten und meteorologischen Daten für eine seriöse Bewertung von Umweltaspekten eines Anflugs nötig ist.

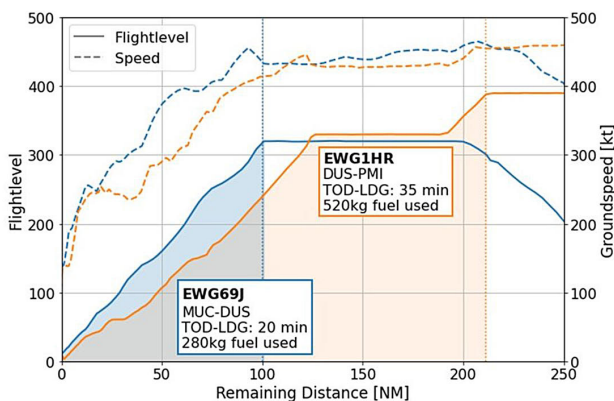


Abbildung 8: Profil zweier Anflüge mit Treibstoffverbrauch zwischen TOD und Landung. EWG69J am 29.08.2023, EWG1HR am 30.08.2023. Verbrauchs- und Zeitdaten von den Piloten notiert, Profil von FlightAware [13].

Einfluss von Delaykosten und CO₂-Schadenkosten

Den für einen CDO-Anflug berechneten Einsparungen stehen potenzielle Delaykosten gegenüber, die entstehen, da ein Luftraum und ein Flughafen mit hohem CDO-Anteil deutliche Kapazitätseinschränkungen aufweisen kann. Wie hoch diese sind, ist nicht ohne weiteres bezifferbar.

Allerdings lässt sich aus den vorgenannten 65 EUR „Gewinn“ ableiten, dass der akzeptierbare mittlere ATFM-Delay (Air Traffic Flow Management) den Wert von etwa 40 Sekunden pro Flug nicht überschreiten darf, um zumindest den finanziellen Benefit des CDO-Anfluges nicht zu konterkarieren. (Grundlage dafür sind die im ACE-Report (ATM Cost Effectiveness) dargestellten 106 EUR Kosten pro Minute ATFM-Delay En-Route [14].) Von der Einsparung von etwa 400 kg CO₂ pro Anflug ist dieser finanzielle Effekt getrennt, da ATFM-Delay keine Treibstoffmehrkosten generiert.

Ein Zusammenhang kann hergestellt werden über Schadenkosten für CO₂-Ausstoß. Gemäß Umweltbundesamt (UBA) richtet der Ausstoß einer Tonne CO₂ aktuell einen Schaden von 237 EUR an [15]. Demzufolge wird bei der Reduktion von 400 kg CO₂ bei einem CDO-Anflug ein Schaden in Höhe von 95 EUR vermieden, so dass sich zusammen mit dem finanziellen Effekt des gesparten Treibstoffs ein Vorteil von 160 EUR pro Anflug ergibt. Dieser „Gewinn“ hat die Größenordnung eines Delays von rund 90 Sekunden.

Unter der Annahme, dass ein In-Flight-Delay einen ähnlichen finanziellen Schaden verursacht wie ein ATFM-Delay, gilt: Ist die regelmäßige Flugzeit-

verlängerung oder Verspätung eines CDO-Anfluges deutlich über 1,5 Minuten (z.B. aufgrund einer geringeren Fluggeschwindigkeit oder ATFM-Delay), werden finanzielle Vorteile des CDO-Verfahrens (Kerosinkosten, Reduktion Schadenkosten durch CO₂-Ausstoß) ggf. überkompensiert.

Ein CDO-Anflug ab TOD ist also finanziell betrachtet (= gesparte Kerosinkosten und vermiedener Schaden durch CO₂) nur lohnenswert, wenn die Flugzeit durch das CDO-Verfahren nicht regelmäßig mehr als 1,5 Minuten zunimmt bzw. Flüge nicht regelmäßig aufgrund von CDO-Anflügen ATFM-Delay in dieser Höhe erfahren.

Bei noch größeren regelmäßigen Flugdauer-Verlängerungen durch CDO-Anflüge könnten auch folgende Effekte für wiederholende Flugverbindungen einer Airline resultieren:

- Höhe Fluggeschwindigkeit En-Route, um Blockzeiten (Scheduled Time of Departure STD, Scheduled Time of Arrival STA) zu halten. (Ggf. ein Flightleg später)
- Verlängerung der Blockzeit

Beide Konsequenzen hätten negative finanzielle bzw. umweltbezogene Folgen.

Konfliktpotential optimiert geführter Sinkflüge

Fragestellung

Um den Aufwand der Umstellung möglichst vieler Anflüge auf CDO insbesondere quantitativ abschätzen zu können, stellt sich die Frage, wie viele Konflikte sich ergeben würden, wenn alle infrage kommenden Anflüge eines Flughafens als CDO ausgeführt würden. Weiterhin soll untersucht werden, ob sich in der Menge der zu erwartenden Konflikte zeitliche bzw. räumliche Häufungen erkennen lassen. Um diese Fragestellungen zu untersuchen, wurde exemplarisch ein Verkehrstag am Flughafen München (EDDM) untersucht.

Datenbasis

Vom OpenSky Network [3] wurden alle erfassten Flugbewegungen vom 18. April 2023 im Bereich von 6.6° < Longitude < 18.8° E, sowie 44.4° < Latitude < 52.0° N heruntergeladen. Die Daten wurden unter Verwendung der Toolbox traffic.py [16] geglättet und Datenlücken wurden interpoliert. Es ergab sich eine Datenbasis von insgesamt 11.034 Flugbewegungen. Diese bestehen aus 35.103.926 Datenpunkten

welche für jede Sekunde des Untersuchungszeitraums Longitude, Latitude und Höhe jedes Luftfahrzeugs repräsentieren. 436 dieser Flugbewegungen sind Anflüge auf die Start- und Landebahn 08L bzw. 08R des Flughafens München.

Vorgehensweise und getroffene Annahmen

Von den 436 Anflügen erwiesen sich 77 als ungeeignet für die Modellierung als CDO. Die Gründe lagen meist in einer geringen Gesamtlänge bzw. Maximalhöhe dieser Flüge. Die restlichen 359 der Anflüge auf EDDM wurden als fiktive CDOs modelliert. Dazu wurde das Verfahren der kinematoiden Ketten [17] verwendet. Unabhängig vom Flugzeugtyp des originalen Anflugs wurde für jeden CDO ein Aircraft Performance Model (APM) eines durchschnittlich beladenen Airbus A320 angenommen. Der ToD wurde auf der maximalen Flughöhe des originalen Anflugs angenommen. Von dort aus wurde das nun fiktive Luftfahrzeug von seiner ursprünglichen Flugeschwindigkeit mit $0,6 \text{ m/s}^2$ auf eine Indicated Airspeed (IAS) von 204 kts (Knots) abgebremst. Dies entspricht der Green-dot-Speed des angenommenen APM. Während dieser Abbremsphase wurde die Höhe gehalten. Danach schließt sich ein Sinkflug mit Green-dot-Speed bis zum Final Approach Fix (FAF) BEGEN der Landebahn 08L des Flughafens München an.

Die Flugstrecke vom FAF bis zur Landung wurde nicht weiter betrachtet, da hier keine zusätzlichen Konflikte zu erwarten sind. Durch Verwendung der kinematoiden Ketten wurde sowohl eine sich mit der Höhe ändernde True Airspeed (TAS) bei konstanter IAS (Green-dot), als auch eine vom Geradeausflug abweichende Sinkrate im Kurvenflug realistisch modelliert. Die Modellierung des Windversatzes wäre bei Vorliegen entsprechender Winddaten mit dem Verfahren der kinematoiden Ketten möglich. Da jedoch nicht die Betrachtung der einzelnen Konflikte, sondern vielmehr die Gesamtanzahl und deren Verteilung interessant sind, wurde darauf verzichtet.

Die originalen Anflüge wurden nun durch die so modellierten, fiktiven CDOs ersetzt. Diese wurden sowohl auf Konflikte untereinander als auch mit allen anderen Flugbewegungen untersucht. Als Konflikt wurde eine laterale Annäherung von $\leq 3 \text{ NM}$ unterhalb FL 245 bzw. $\leq 5 \text{ NM}$ oberhalb FL 245, zusammen mit einer vertikalen Annäherung $\leq 1.000 \text{ ft}$ gewertet. Dies entspricht den von der DFS verwendeten Mindeststaffelungswerten. Ein beispielhafter Konflikt zwischen einem fiktiven CDO und einem Abflug ist in Abbildung 9 dargestellt.

Ergebnisse

Von den betrachteten 359 fiktiven CDOs wären 119 ohne Konflikt zum FAF gekommen. Bei den anderen

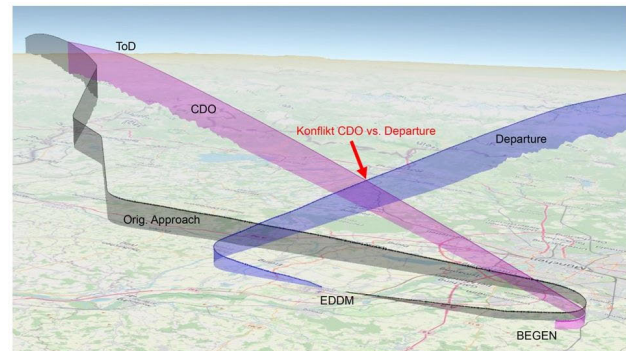


Abbildung 9: Beispiel eines Konfliktes zwischen einem fiktiven CDO und einem Abflug.

240 CDOs ergaben sich insgesamt 420 Konflikte. Einige dieser Flüge hatten also mehr Konflikte.

Tabelle 1: Konflikttypen und Anzahl.

Konflikttyp	Anzahl
CDO vs. Departure	45
CDO vs. CDO	210
CDO vs. Enroute	163

Die meisten Konflikte entstehen zwischen zwei fiktiven CDOs. Diese konzentrieren sich räumlich in der Nähe des FAF, siehe Abbildung 10. Da im Modell lediglich eine der beiden Runways (RWYs) verwendet wurde, ist davon auszugehen, dass ein Großteil dieser Konflikte durch Einbeziehung der zweiten RWY lösbar wäre.

Während die Konflikte zwischen CDOs hauptsächlich in Höhen unterhalb 10.000 ft Mean Sea Level (MSL) auftreten, ergibt sich eine weitere Häufung oberhalb von FL 300. Dies sind überwiegend Konflikte mit Streckenflügen, siehe Abbildung 11. Sie treten gehäuft auf den Hauptanflugrouten aus Nord, Nordwest und Südost auf.

Zeitlich skaliert das Auftreten von Konflikten mit dem allgemeinen Verkehrsaufkommen, d.h. in verkehrsreichen Stunden gibt es entsprechend mehr Konflikte als in verkehrsarmen. Eine weitere Zeitabhängigkeit konnte nicht ermittelt werden.

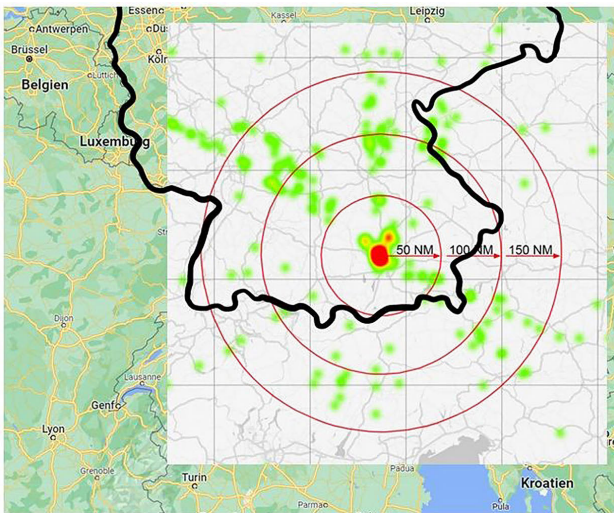


Abbildung 10: Laterale Häufigkeitsverteilung der Konflikte.

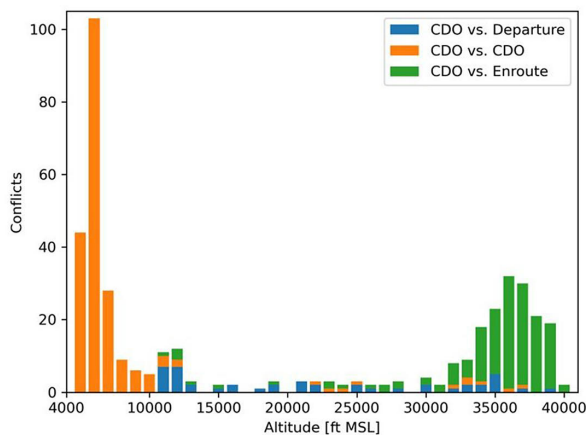


Abbildung 11: Konflikthäufigkeit in Relation zu Höhe und Konflikttyp.

Automatisierungsaspekte für energieeffiziente Anflüge ab Top of Descent

Mit Blick auf die vielen verschiedenen Gründe dafür, dass nur selten CDO-Anflüge ab Reiseflughöhe realisiert werden können, wird deutlich, dass ein höherer Anteil an CDO ohne Einbußen bei relevanten KPI nur mit einer Bündelung zielgerichteter Maßnahmen erreichbar ist. Elemente dieser Pakete könnten sein:

1. Luftraum / Verfahren, u.a.:
 - a. Priorisierung von CDO-Anflügen gegenüber kreuzendem Verkehr
 - b. Vergrößerung / Vereinfachung von Lufträumen, damit Verringerung von Schnittstellen bei der Flugführung

2. Technische / Technisch-betriebliche Entwicklungen, u.a.:

- a. Verbesserte Trajektorienprognose zur Überprüfung der Konfliktfreiheit von CDO-Anflügen mit anderem Verkehr
- b. Bodenseitige Möglichkeit der Abschätzung von Verbrauchswerten für verschiedene Flugführungsoptionen ab TOD
- c. Hochentwickelte Konfliktlösungsfunktionen im ATS-System (Air Traffic Service), um CDO-Flüge sicher durch hochbelastete Lufträume zu führen
- d. Anzeige des optimalen TOD in der ATS-Systemtrajektorie

3. Entwicklungen im Datenaustausch zwischen Bord und Boden, u.a.:

- a. Information über relevante Flugleistungsparameter (z.B. Konsequenzen des CI-Settings) an die Flugsicherung.
- b. Automatic Dependent Surveillance – Contract / Extended Projected Profile (ADS-C/ EPP)

Diese unterschiedlichen Entwicklungen lassen sich grob in drei verschiedene Gruppen unterteilen (siehe Abbildung 12).

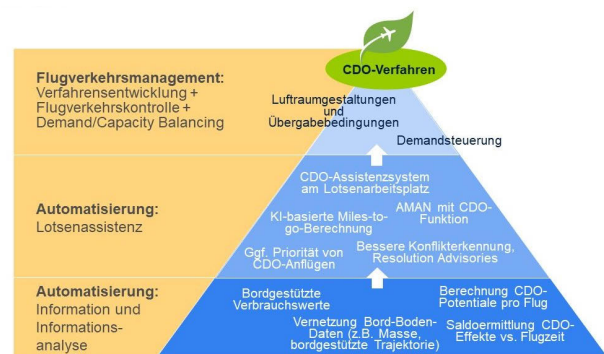


Abbildung 12: Voraussetzungen für die Umsetzung von CDO-konformen Anflügen, unterteilt in die drei Gruppen „Information und Informationsanalyse“ (Automatisierung), „Lotsenassistent“ (Automatisierung) und Flugverkehrsmanagement.

Ebenfalls lässt sich der aktuelle Stand der Lotsenassistent bei CDO-Anflügen in der bei SESAR (Single European Sky ATM Research) entwickelten Levels of Automation Taxonomy [18] auftragen (Abbildung 13).

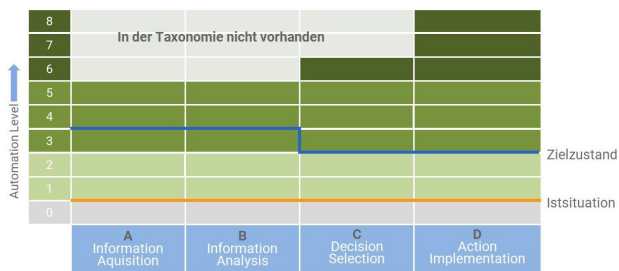


Abbildung 13: Istzustand und möglicher Zielzustand eines CDO-Assistenten für Fluglotsen (vereinfacht) für CDO-Anflüge ab Top of Descent. Der Zielzustand setzt neue Technologien und Verfahren voraus, die es heute noch nicht gibt.

Der Istzustand zeichnet sich dadurch aus, dass von der Vorlage und Interpretation relevanter CDO-Information bis hin zur Handlungsausführung keinerlei Unterstützung vorhanden ist und aktuell eine komplett manuelle Vorgangsweise etabliert ist. Die Automatisierungsstufe ist Null. Den hypothetischen, mit derzeitigen technischen Mitteln und Verfügbarkeit an Informationen nicht umsetzbaren Zielzustand zeichnen folgende Eigenschaften aus:

- **Informationsaquisition:** Alle flugzeugseitigen, CDO-relevanten Informationen liegen den Lotsinnen und Lotsen am Arbeitsplatz vor.
- **Informationsanalyse:** Die Informationen sind so aufbereitet und manuell abrufbar, dass die Lotsen relevante Schlüsse für ihre weiteren Entscheidungen ohne weitergehende Interpretation ableiten können.
- **Auswahlentscheidung:** Das System berechnet bei Bedarf mehrere Optionen für mögliche, CDO-konforme und gemäß Trajektorienberechnung konfliktfreie Anflugwege und schlägt diese der Fluglotsin vor. Die Fluglotsin kann sich für eine der Optionen entscheiden, eine eigene Option umsetzen oder ganz auf einen CDO-konformen Anflug verzichten.
- **Handlungsausführung:** Die Ausführung geschieht mittels Freigaben von Transitions oder Wegpunktfolgen, ggf. unterstützt durch die Nutzung von Datalink / CPDLC (Controller Pilot Datalink Communications).

Größte Umsetzungsdefizite bestehen bei diesem Szenario hinsichtlich der Verfügbarkeit CDO-relevanter Informationen und der verlässlichen Berechnung von konfliktfreien Trajektorien. Diese müssen auch die optimale Speed-Gestaltung der CDO-Anflüge berücksichtigen, was in derzeitigen Konflikterkennungssystemen nicht hinterlegt ist.

Prinzipiell besteht (sehr) langfristig das Potential, alle vier Säulen der Automatisierung gleichzeitig zu maximieren (Abbildung 14).

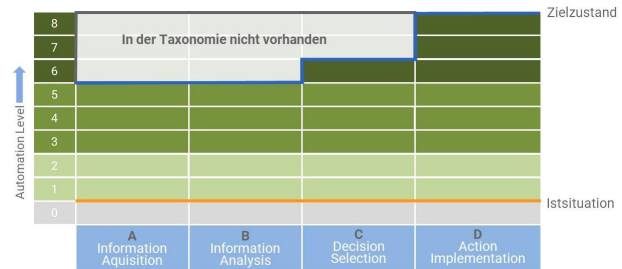


Abbildung 14: Vollautomatisierung eines Prozesses zur Umsetzung von CDO-Anflügen ab Top of Descent. Ein derartiger Ablauf ist aufgrund technologischer Grenzen derzeit nicht absehbar.

Ein derartiger Zielzustand wäre durch folgende Eigenschaften geprägt:

- **Informationsaquisition:** Alle CDO-relevanten Informationen liegen dem System vor, werden dem Fluglotsen bzw. der Fluglotsin allerdings nicht zur Anzeige gebracht.
- **Informationsanalyse:** Alle Prozesse zur Ermittlung von geeigneten Kandidaten für CDO-Anflüge, Abwägungen und Berechnungen von Flugwegen finden im System statt, ohne Zutun des Fluglotsen und ohne die Möglichkeit des Nachvollziehens oder Plausibilisierens.
- **Auswahlentscheidung:** Die Entscheidung, welcher Flug CDO-konform geführt wird und welche nicht, trifft allein das System. Der Fluglotse wird über die Auswahl nicht informiert. Er hat keine Möglichkeit, diese Festlegungen zu revidieren.
- **Handlungsausführung:** Die Freigabe umwelt-optimierter Flugwege an das Flugzeug bzw. an die Flugzeugbesatzung wird vom System ohne Einbezug der Fluglotsinnen und Fluglotsen automatisch vorgenommen, z.B. über ein hochentwickeltes CPDLC-System. Entsprechend werden auch Revisionen der Freigaben ohne Einfluss der Lotsen übermittelt.

Abgesehen davon, dass schon technologisch zur Umsetzung dieses Zustandes Systeme eingeführt werden müssten, die derzeit noch nicht einmal erkennbar in der Diskussion sind, wendet sich dieser Ablauf komplett vom Gedanken des „Human-in-the-Loop“ ab. Dies kann schon allein deswegen heikel sein, da das System eine Optimierung vornimmt, die zwei KPI unterschiedlicher Wertigkeit (Sicherheit und Umwelt) berücksichtigt und keinerlei

Kontrolle mehr möglich ist, inwieweit die ermittelte Lösung dieser Wertigkeit Rechnung trägt.

Es stellt sich ebenfalls die Frage, inwieweit die Cockpitbesatzung bei einem derartig automatisierten Prozess in die Abläufe eingebunden ist und ob sich eine – zudem noch „exogen“ getriggerte – Vollautomatisierung der Flugwegfestlegung damit verträgt, dass Pilotinnen und Piloten die letzte Verantwortung für die sichere Flugdurchführung ihres Fluggeräts haben.

Die zielgerichtete Unterstützung von CDO-Anflügen steht im Fokus dieser Publikation und spielt bei Konzepten zum Thema eine zentrale Rolle. Nicht ganz so prominent ist ein zweiter möglicher Weg der Förderung von CDO-Anflügen, der eine Alternative oder eine Ergänzung darstellen kann: Wird die kognitive Last der Lotsinnen und Lotsen durch andere Maßnahmen am Arbeitsplatz reduziert (Abbildung 15), wird Zeit gewonnen, die für die weitergehende Optimierung von Flugprofilen aufgewendet werden kann. Entsprechende Effekte waren im DLR-Projekt (Deutsches Forschungszentrum für Luft- und Raumfahrt) „AcListant“ (Active Listening Assistant) gemessen worden [19].

Zwar können durch eine Entlastung der Fluglotsen



Abbildung 15: Prinzipbild des Zusammenhangs zwischen der Workloadreduktion von Fluglotsen und den verschiedenen Potentialen hinsichtlich relevanter KPI der Flugsicherung.

nicht beliebig viele kognitive Ressourcen für die Umsetzung von CDO-Anflügen erschlossen werden. Allerdings besteht die Möglichkeit, dass bei vielen Anflügen eine bereits geringe Entlastung der Lotsinnen und Lotsen eine Umsetzung von CDO-Anflügen ermöglicht, die ansonsten aufgrund fehlender Entlastung einfach zu viel Belastung darstellen würde.

Beispiele für solche Entlastungen finden sich in [20]:

- Nutzung von Spracherkennung für Systemeingaben und Menüsteuerung

- Vereinfachung von Übergaben, Koordinationen, Informationen an die Cockpitbesatzungen (Wetter, Frequenzen u.ä.) sowie
- vermehrte Nutzung von Datalink.

Prozessausgestaltung für energieeffiziente Landeanflüge

Die Entwicklung energieeffizienter Landeanflüge beschränkt sich nicht nur auf Verfahren, Arbeitsweisen, Technologien und die Sicherstellung einer sinnvollen Messbarkeit. Relevant sind ebenfalls chronologische Aspekte:

- Welches System oder welcher Prozessbeteiligte „triggert“ einen CDO-Anflug ab TOD, wenn nicht alle Flüge entsprechend geführt werden können?
- Welche Informationen können verwendet werden, um passende Anflüge zu identifizieren?
- In welcher Abfolge werden bodenseitige Berechnungen mit den bordseitigen Berechnungen (z.B. idealer TOD abhängig von der DtG) zusammengebracht?
- Auf welche Weise stehen die unterschiedlichen Beteiligten in den DFS-Kontrollzentralen in Verbindung, um Flüge treibstoffoptimiert zu führen?
- Welche Systeme unterstützen die Fluglotsen bei der konfliktfreien Umsetzung von treibstoffoptimierten Anflügen und wie kann die Flugführung an geänderte Bedingungen angepasst werden? (Z.B. unerwarteter Konflikt entlang des Flugweges.)

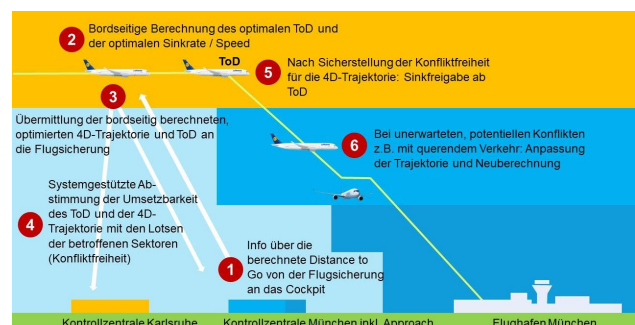


Abbildung 16: Möglicher Prozess eines treibstoffoptimierten Anflugs ab TOD, basierend auf Beschreibungen eines Zukunftsszenarios Flugsicherung für das Jahr 2035 [20].

Bei der Initiierung und Umsetzung von treibstoffoptimierten Anflügen ist deshalb ein vielschichtiger Prozess zu erwarten (Abbildung 16), der mehrere feste Bedingungen aufweist:

- Klare Zuständigkeiten von Cockpit und Flugsicherung, dort heruntergebrochen auf einzelne Rollen in unterschiedlichen Kontrollzentralen
- Vorliegen aller relevanter Informationen bei den Prozesspartnern in (nahezu) Echtzeit und unmittelbare Aktualisierung der Informationen bei allen Partnern gleichzeitig, falls Änderungen auftreten
- Zentrales System, das die holistische Betrachtung der zu erwartenden Flugpfade in dem relevanten Luftraum (Konflikterkennung) in Verbindung bringt mit der auf den Einzelflug bezogenen Trajektorienberechnung (Optimierung Treibstoffverbrauch) und beide Zielgrößen nutzt, um eine treibstoffoptimierte, konfliktfreie Trajektorie zu berechnen.

Aufgrund der Abhängigkeiten des optimalen Flugverlaufs von dynamischen Faktoren (Entwicklung Konfliktfreiheit, ggf. Änderung der Windverhältnisse gegenüber den Prognosen) ist davon auszugehen, dass dieser Prozess nicht einmalig durchlaufen wird, sondern wiederkehrend ist (Abbildung 17).

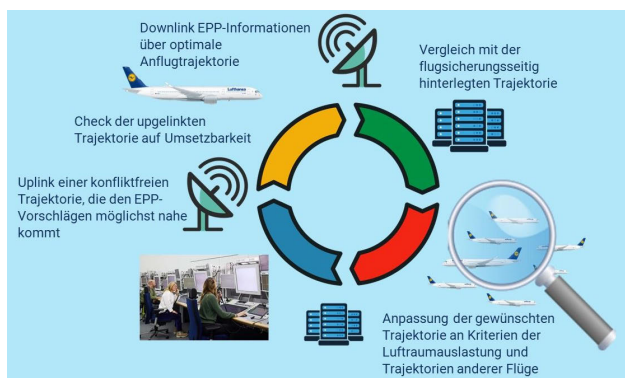


Abbildung 17: Möglicher Kreisprozess einer wiederkehrenden „Verhandlung“ von optimierten Anflugtrajektorien unter Nutzung von EPP-Funktionalitäten.

Es ist nicht damit zu rechnen, dass eine Automatisierungsunterstützung für CDO-Anflüge ab TOD in einer einzigen technischen wie betrieblichen Phase eingeführt wird und sprunghafte Anstiege der CDO-Anteile zur Folge hat. Eher ist davon auszugehen, dass eine derartige Assistenz schrittweise in die Flugverkehrskontrolle Eingang findet.

Dies ist sicherlich auch dem Umstand geschuldet, dass sowohl bei der Nutzung von Borddaten (EPP) als auch bei der Zuverlässigkeit von Konflikterkennung und -lösung Neuland betreten werden wird. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass eine schrittweise Zunahme der Lotsenassistenz nicht im gleichen Maße zu einer Zunahme der CDO-Anteile an einem Flughafen führen wird, einen

möglichen Verlauf zeigt die Abbildung 18. Die dargestellte Annahme umfasst fünf Phasen zu, die jeweils (mit Ausnahme der letzten Phase in Richtung 100%) gravierende Änderungen bei der Lotsenarbeit zur Folge haben.

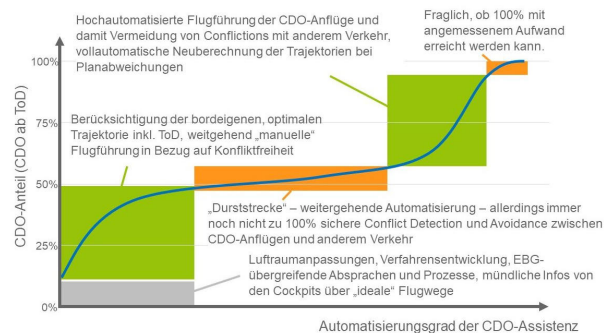


Abbildung 18: Möglicher Verlauf einer zunehmenden Assistenz / Automatisierung bei der Umsetzung von CDO-Anflügen von TOD und der zu erwartende Anteil an CDO-Anflügen beim jeweiligen Automationsstand.

Einordnung des Nutzens von treibstoff-optimierten Anflügen zu anderen CO₂-bezogenen Maßnahmen in der Luftfahrt

Im Kapitel über die Wirkung von CDO-Anflügen auf die KPI von Airlines und Flugsicherung ist bereits die Größenordnung des finanziellen und umweltbezogenen Benefits dargestellt worden.

2018 stieß gemäß International Council on clean Transportation ICCT die weltweite Luftfahrt bei 39 Millionen kommerziellen Flügen in Summe 918 Millionen Tonnen CO₂ aus, also im Mittel gut 23 Tonnen CO₂ pro Flug [21]. Eine angenommene Einsparung von 400 kg CO₂ pro Anflug [12] entspräche einer Reduktion von 1,7% oder 15,6 Millionen Tonnen CO₂. Tatsächlich dürfte der Wert sogar noch geringer sein, da für die Messungen in Schiphol das Muster Boeing 737-800 verwendet wurde, das deutlich mehr Passagiere transportieren kann als die mittlere Anzahl an Passagieren pro Flug weltweit.

Eine flächendeckende Einführung von CDO-Verfahren ab TOD kann demzufolge lediglich als eine Systemoptimierung betrachtet werden. Sie kann als eine begleitende Maßnahme gesehen werden, um die Klimawandelwirkung der Luftfahrt zu senken. Der Effekt von 100% weltweit umgesetzten CDO-Anflügen ab TOD würde bereits nach einem halben Jahr durch die Luftverkehrszunahme kompensiert, gemäß der 3,4% Wachstumsrate, die von IATA bis 2040 erwartet wird [22]. Da IATA Passagierzahlen

betrachtet, setzt diese Rechnung voraus, dass Sitzladefaktor und durchschnittliche Röhrengöße des eingesetzten Fluggeräts konstant bleiben, was derzeit nicht feststeht.

Der potenzielle Benefit ist deutlich geringer als das Optimierungspotential in der Antriebstechnik. So ist der Airbus A320neo insbesondere aufgrund moderner Triebwerke 15% – 20% treibstoffeffizienter als sein direkter Vorgänger, der Airbus A320 [23][24].

Auch über geringe Anpassungen der Aerodynamik an Bestandsflugzeugen lässt sich eine Treibstoffreduktion erreichen, die von der Dimension her den von CDO-Anflügen entspricht: So hat die Firma „Aero Design Labs“ für das Muster Boeing 737 ein Aerodynamic Drag Reduction System (ADRS 1) entwickelt und erwartet davon eine 1,5-prozentige Reduktion des Kerosinverbrauchs. Das System besteht u.a. aus aerodynamisch optimierten Ersatzbauteilen für die Struktur zwischen Tragfläche und Rumpf sowie aus verlängerten Landeklappenschienenverkleidungen [25].

Absolut betrachtet ließen sich unter der Annahme von 400 kg CO₂ Einsparungen pro Anflug bei den rund 800.000 jährlichen Anflügen auf Deutsche Verkehrsflughäfen [26] maximal rund 320.000 Tonnen CO₂ einsparen.

Das entspricht rund der zehnfachen Menge, die von der DFS selbst über Energiebezug und Fuhrpark im Rahmen ihrer Geschäftstätigkeit generiert wird. (30.929 Tonnen CO₂ gemäß DFS-interner EMAS-Erhebung 2022. EMAS = Eco-Management and Audit Scheme) Dieser Faktor zehn kann eine Rolle spielen beim Vergleich der Umweltrentabilität von DFS-Maßnahmen, die verbunden mit einem Aufwand entweder zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes von Luftverkehr beitragen oder zur Reduktion des CO₂-Footprints der DFS selber.

Auf Basis der aktuellen CO₂-Kompensationswerte [15] in Geld ausgedrückt entsprechen die rund 320.000 Tonnen CO₂ einem Wert von rund 76 Mio EUR p.a.. Bei einer Gleichgewichtung klimawandelverursachter Wohlfahrtseinbußen heutiger und zukünftiger Generationen ergibt sich ein Kostensatz von 809 EUR pro Tonne CO₂ und damit eine Kostensumme von knapp 260 Mio EUR p.a., die als „theoretisches Budget“ für Maßnahmen maximal verwendet werden könnte, um alle Anflüge Deutschlands CO₂-optimiert zu führen. [15] Dabei handelt es sich um eine Vereinfachung, da u.a. Anflüge auf deutsche Flughäfen oft bereits außerhalb Deutschlands ihren optimalen TOD haben.

Beim zunehmenden Einsatz von PtL würde sich die Berechnung in mehrerlei Hinsicht verändern. Zum einen würden die Schadenskosten minimiert, da PtL bei der Herstellung die gleiche Menge CO₂ bindet, die später bei der Verbrennung wieder freigesetzt wird. Bei Verwendung von 100% PtL in Flugzeugen liegt die Schadenssumme demnach zumindest in der Theorie bei 0 EUR. Gleichzeitig steigt durch das teurere PtL die durch CDO-Anflüge einsparbare Treibstoffkosten – im Fall von 800.000 Anflügen pro Jahr von 50 Mio EUR (Kerosin) auf dann rund 172 Mio EUR (PtL) jährlich [27][28].

In der Energiesumme ausgedrückt könnte sich durch flächendeckende Umsetzung von CDO-Anflügen in Deutschland ab Reiseflughöhe eine Ersparnis von 1250 GWh (Brennstoffenergieaufwand) ergeben. Grundlage dafür sind die eingesparten 130 kg Kerosin pro Anflug. Beim Einsatz von 100% PtL (rund 33 kWh Aufwand für 1 kg Treibstoff mit dem Energiegehalt von Kerosin [27]) ergeben sich rund 3432 GWh Energieersparnis jährlich. Das entspricht in etwa der Energieerzeugung von 228 Windkraftanlagen mit einem Jahresertrag von jeweils 15 GWh (z.B. einer VESTAS V136–3.45 MW bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 7,8 m/s) [29].

Zusammenfassung und Ausblick

Es besteht ein erkennbares Potential, Anflugprofile ab TOD umweltgerechter und CO₂-optimierter zu führen als derzeit. Allerdings handelt es sich bei dieser Aufgabe nicht um einen „Quick Win“ oder eine „Low hanging fruit“.

Es sind zahlreiche technische und betriebliche Entwicklung zu tätigen, um den Anteil an CDO-Anflügen in dieser kompletten Flugphase deutlich zu steigern. Einige Voraussetzungen sind überhaupt noch nicht erfüllt, wie z.B. die zwischen Bord und Boden abgestimmte Berechnung umwelt-optimierter Anflugprofile unter Berücksichtigung der Anfluggeschwindigkeiten. Selbst ein einheitliches Verständnis, wie ein „perfekter“ CDO-Anflug gemessen werden kann, gibt es nicht.

Derzeit bestehen auch keinerlei Assistenzsysteme, um Fluglotsinnen und Fluglotsen die Umsetzung derartiger Flugprofile zu erleichtern. Diese sind allerdings nötig, um die Flüge gleichzeitig sicher und umweltgerechter zu führen, ohne negative Rückwirkungen auf die Luftraum- oder Pistenkapazität zu generieren. Die in der Arbeit dargestellten Konfliktpotentiale von CDO-Anflügen mit umgebendem Verkehr im Flughafennahbereich aber auch besonders im oberen Luftraum illustrieren hier eine relevante Handlungsnotwendigkeit.

Auch die Messbarkeit derartiger Verbesserungen hinsichtlich aller relevanter Faktoren muss mit der Entwicklung von Prozeduren und Systemen Schritt halten, da ansonsten der Effekt der Einsparung an Treibstoff und CO₂ ggf. durch die Verlängerung der Flugzeit überkompensiert wird. Auch die zeitliche Wirkung auf Folgeflüge nach Turn-Around oder der geplanten Blockzeit für Verbindungen ist dabei zu beachten.

Obwohl der maximal erreichbare Nutzen von CDO-Anflügen ab TOD in der Größenordnung von unter 2% der Treibstoffmenge eines Durchschnittsfluges liegt, ergibt sich über die CO₂-Kompensationswerte ein signifikanter finanzieller Handlungsspielraum für Entwicklung und Betrieb von Verfahren und Systemen.

Im großen Bild einer zukünftigen, möglichst CO₂-neutralen Luftfahrt sind CDO-gerechte Anflüge einerseits nur ein kleiner Baustein, andererseits langfristig betrachtet eine Selbstverständlichkeit, da unbenommen des Energieträgers für Flugzeuge die Flüge in Zukunft möglichst energieeffizient geführt werden müssen.

Anmerkungen zur Veröffentlichung

Beim vorliegende Artikel handelt es sich um einen Reprint aus [30], der um zwei Passagen zur Energiebetrachtung, sowie um eine aktualisierte Beschreibung des Spacing Assistenten ergänzt wurde.

Abkürzungsverzeichnis und Referenzen

AcListant	Active Listening Assistant
ADRS 1	Aerodynamic Drag Reduction System
ADS-C EPP	Automatic Dependent Surveillance – Contract (ADS-C) Extended Projected Profile (EPP)
ACE	ATM Cost Effectiveness
AGL	Above Ground Level
APM	Aircraft Performance Model
ATC	Air Traffic Control
ATFM	Air Traffic Flow Management
ATS	Air Traffic Services
APM	Aircraft Performance Model
BADA	Base of Aircraft Data
CCO	Continuous Climb Operations

CDO	Continuous Descent Operations
CI	Cost Index
CPDLC	Controller Pilot Datalink Communications
DFS	DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
DLR	Deutsches Forschungszentrum für Luft- und Raumfahrt
DtG	Distance to go
EBG	Einsatzberechtigungsgruppe
EMAS	Eco-Management and Audit Scheme
EPP	Extended Projected Profile
ETAS	Enhanced Trajectory Analysis System
FAF	Final Approach Fix
FAP	Final Approach Point
FL	Flight Level
FMS	Flight Management System
ft	Feet
FUTURE	Projekt „Fluglotsenunterstützung Endanflug“
IAS	Indicated Airspeed
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICCT	International Council on Clean Transportation
ILS	Instrumentenlandesystem
KPI	Key Performance Indicator
kt	Knoten
min	Minuten
MSL	Mean Sea Level
NM	Nautical Miles
OPD	Optimized Profile Descent
PtL	Power to Liquid
RWY	Runway
SES	Single European Sky
SESAR	Single European Sky ATM Research
STA	Scheduled Time of Arrival
STAR	Standard Arrival Route
STD	Scheduled Time of Arrival
TAS	True Airspeed

TCAS	Traffic Alert and Collision Avoidance System
TOD	Top of Descent
UBA	Umweltbundesamt

Referenzen:

- [1] ICAO (2010). Doc 9931: Continuous Descent Operations (CDO) Manual – First Edition
- [2] EUROCONTROL (2020). European CCO / CDO Action Plan
- [3] Schafer, M., et al. (2014). Bringing up OpenSky: A large-scale ADS-B sensor network for research. In Proceedings of the 13th IEEE/ACM International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), pages 83–94.
- [4] Fricke, H., Vogel, M., and Standfuss, T. (2021). Reducing Europe's Aviation Impact on Climate Change using enriched Air Traffic Forecasts and improved Efficiency Benchmarks. FABEC Research Workshop Climate Change and the Role of Air Traffic Control, Vilnius.
- [5] EUROCONTROL (2023). Continuous climb and descent operations performance monitoring dashboard. Aufgerufen am 11.6.2023. Verfügbar unter: <https://ansperformance.eu/efficiency/vfe/>
- [6] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH (2023). AIP IFR, Stand 07.09.2023.
- [7] Haugg, E., Konopka, J. (2023). Spacing-Assistant for Leipzig and Munich Approach. Innovation im Fokus 1/2023.
- [8] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH (2023). BA FVM, Ausgabe Januar 2022 / Stand: 18. Mai 2023 (3. Ergänzungslieferung)
- [9] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH (2023). Betriebsanordnung 2023/007 Verfahren EBG10.
- [10] EUROCONTROL (2019). SES Performance Scheme Reference Period 3. Aufgerufen am 11.9.2023. Verfügbar unter: <https://www.eurocontrol.int/prudata/dashboard/metadata/rp3/>
- [11] European Cockpit Association ECA (2016). Saving fuel at all costs. Aufgerufen am 11.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.eurocockpit.be/news/ryanair-metamorphosis-hardly-possible>
- [12] Ellerbroek, J., Inaad, M., & Hoekstra, J. (2018). Fuel and Emission Benefits for Continuous Descent Approaches at Schiphol. International Conference on Research in Air Transportation: Barcelona, Spain, 2018.
- [13] FlightAware (2023). Aufgerufen am 06.09.2023. Verfügbar unter: <https://de.flightaware.com>.
- [14] EUROCONTROL (2022). ACE 2020 Benchmarking Report with 2021–2024 outlook. Aufgerufen am 11.9.2023. Verfügbar unter: <https://www.eurocontrol.int/publication/air-traffic-management-cost-effectiveness-ace-benchmarking-report-2020>
- [15] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2023). Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen. Aufgerufen am 11.9.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#klimakosten-von-treibhausgas-emissionen>
- [16] Olive, X. (2019). Traffic, a toolbox for processing and analysing air traffic data. In Journal of Open Source Software (Bd. 4, Issue 39, S. 1518). The Open Journal.
- [17] Flämig, S., Graefenhan, M., & Schiffmann, W. (2023). Modelling of aircraft trajectories for emergency landing using kinematoid chains. In CEAS Aeronautical Journal (Bd. 14, Issue 3, S. 679–692). Springer Science and Business Media LLC.
- [18] Save, L., Feuerberg, B. (2014). Designing Human-Automation Interaction: a new level of Automation Taxonomy.
- [19] Rataj, J., Helmke, H., Oneiser, O. (2019). AcListant with Continuous Learning: Speech Recognition in Air Traffic Control. EIWAC 2019.
- [20] Haugg, E., Buxbaum, J., Et al. (2023). Zukunftsszenario Flugsicherung: Wie werden Fluglotsen im Jahr 2035 (wahrscheinlich) arbeiten? Innovation im Fokus 1/2023.
- [21] IATA (2023). Global Outlook for Air Transport. Abgerufen am 11.9.2023. Verfügbar unter: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/global-outlook-for-air-transport---june-2023/>
- [22] Graver, B., Zang, K., Rutherford, D. (2019). CO2 emissions from commercial aviation, 2018. International Council on clean transportation.
- [23] Appel, H. (2016). Innovationsschub. FAZ, 3.2.2016, Abgerufen am 11.9.2023, Verfügbar unter: <https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/airbus-a320-neo-innovations-schub-14044384.html>
- [24] Deutsche Lufthansa AG (2023). Flottenentwicklung. Abgerufen am 11.9.2023. Verfügbar unter: <https://www.lufthansagroup.com/de/themen/flottenentwicklung.html>
- [25] Nehls, G. (2022). New composites-based drag reduction kit for Boeing 737 NG receives FAA STC, cuts fuel burn. CompositesWorld. 16.06.2022. Abgerufen am 11.9.2023. Verfügbar unter: <https://www.compositesworld.com/news/new-composites-based-drag-reduction-kit-for-boeing-737-ng-receives-faa-stc-cuts-fuel-burn>

- [26] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH (2023). Luftverkehr in Deutschland, Mobilitätsbericht 2022. Abgerufen am 11.9.2023. Verfügbar unter <https://www.dfs.de/homepage/de/medien/publikationen/mobilitaets-bericht2022-internet.pdf/preview-001.jpg?cid=igg.1si7&resize=b3f988%3a280x>
- [27] Zeit Online „Sprit aus Strom ist machbar, aber zu teuer“, 13.3.2018. Abgerufen am 3.11.2023. Verfügbar unter <https://www.zeit.de/mobilitaet/2018-03/synthetischer-kraftstoff-e-fuels-diesel-strom-verkehrswende>
- [28] Bauermann, Tom: Abschätzung der Gestehungskosten und ihrer Entwicklung für die grüne Stromproduktion in Deutschland, Europa und den USA, IMK Policy Brief, Düsseldorf. Abgerufen am 3.11.2023. Verfügbar unter https://www.boeckler.de/fpdf/HBS-008687/p_imk_pb_157_2023.pdf
- [29] VESTAS, Broschüre 4MW-Plattform, 2017. Abgerufen am 3.11.2023. Verfügbar unter https://www.vestas.de/content/dam/vestas-com/de/Brosch%C3%BCre_4MW_Plattform_DE_screen.pdf.coredownload.inline.pdf
- [30] Buxbaum, J., Rohrmüller, L., Flämig, S., Schiffmann, W. & Höra, J. (2023). Rolle der Automatisierung bei der Umsetzung klimaoptimierter Anflugprofile. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Lilienthal-Oberth e.V.. (Text). <https://doi.org/10.25967/610098>. urn:nbn:de:101:1-2023111011510021825445.

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: 13.12.2023

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 © 2023 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

Günter Achatz, Bereichsleitung
Planung & Innovation

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

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

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

Anschrift der Redaktion:

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

Nachdruck nur mit Genehmigung.

