

ROLLE DES LUFTVERKEHRSMANAGEMENTS BEI DER REDUKTION DER KLIMAWANDELWIRKUNG DES LUFTVERKEHRS

Jörg Buxbaum,
DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, Am DFS-Campus 10, 63225 Langen, Deutschland

Zusammenfassung

In der Herausforderung, die weltweite Luftfahrt bis 2050 klimaneutral zu gestalten, kommt dem Luftverkehrsmanagement eine begrenzte, aber wichtige Aufgabe zu. Während die langfristige und hochrelevante Aufgabe der Flugsicherung sein wird, über eine passende Flugführung den contrail-induzierten Strahlungsantrieb der Luftfahrt zu beeinflussen, steht parallel dazu in den kommenden Jahren die weitere emissionsbezogene Optimierung von Verfahren und betrieblicher Arbeitsweisen im Vordergrund. Um hier Fortschritte zu erzielen, braucht es mehr flugbetriebliche Daten, passendere Umweltkennzahlen, Lotsenassistenzsysteme, eine datenbasierte Erfolgskontrolle – und ein transparentes, zwischen den Prozesspartnern abgestimmtes Bild darüber, welche Optimierungspotentiale tatsächlich noch mit einem angemessenen Verhältnis zwischen Nutzen, Aufwand und ggf. potentiellen Einschränkungen für Luftraumnutzer erschließbar sind.

1. HERAUSFORDERUNGEN DER LUFTFAHRT IN BEZUG AUF KLIMAWANDEL

Seit 1940 hat die weltweite Luftfahrt kumuliert über 33 Mrd. Tonnen CO₂ in die Atmosphäre emittiert, allein rund 50% davon in den letzten 20 Jahren [1]. Das entspricht etwa der 45fachen Menge des jährlichen CO₂-Ausstoßes Deutschlands von 2021 [2].

Vor dem Hintergrund des fortschreitenden anthropogenen Klimawandels steht die Luftfahrt wie andere Industrien vor der Herausforderung, ihre seit Jahrzehnten zunehmend wachsenden CO₂-Emissionen (BILD 1) zu begrenzen, zu reduzieren und langfristig möglichst eine Klimaneutralität zu erreichen.

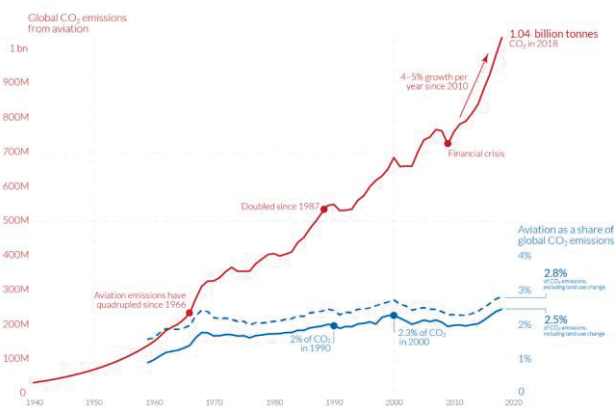


BILD 1. Entwicklung der jährlichen CO₂-Emission des weltweiten Luftverkehrs (inkl. Luftfracht und Militärluftverkehr) von 1940 bis 2018 [3]

Diese Klimaneutralität wird maßgeblich getrieben über neue Triebwerkskonzepte, neuartige Kraftstoffe und dazu passende Luftfahrzeuge. Vordringlichstes Ziel der Industrie ist dabei, die CO₂-Emissionen langfristig zu eliminieren. Da ein großer Teil der Klimawirkung der Luftfahrt aus den Wolkenbildungen aufgrund von Emissionen in Reiseflughöhe resultiert und „nur“ rund ein Drittel durch das emittierte CO₂ selber [4] müssen zusätzlich zur CO₂-Reduktion Maßnahmen in Bezug auf die Flugführung getroffen werden, um klimasensitive Lufträume auszusparen. Dies gilt z.B. auch für mögliche Flüge mit Wasserstoffantrieb. Andernfalls würden nur Teile der Klimawandelwirkung der Luftfahrt berücksichtigt. Forschungsarbeiten hierzu sind Teil des Projekts D-KULT („Demonstrator Klima- und Umweltfreundlicher Lufttransport“) [5], das im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms unter Beteiligung der DFS von 2022 bis 2025 laufen wird. Contrail-induzierte Klimawirkungen stehen in diesem Paper nicht im Fokus.

tierte CO₂ selber [4] müssen zusätzlich zur CO₂-Reduktion Maßnahmen in Bezug auf die Flugführung getroffen werden, um klimasensitive Lufträume auszusparen. Dies gilt z.B. auch für mögliche Flüge mit Wasserstoffantrieb. Andernfalls würden nur Teile der Klimawandelwirkung der Luftfahrt berücksichtigt. Forschungsarbeiten hierzu sind Teil des Projekts D-KULT („Demonstrator Klima- und Umweltfreundlicher Lufttransport“) [5], das im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms unter Beteiligung der DFS von 2022 bis 2025 laufen wird. Contrail-induzierte Klimawirkungen stehen in diesem Paper nicht im Fokus.

2. ERWARTUNGEN AN DAS LUFTVERKEHRSMANAGEMENT

In Strategiedokumenten der Luftfahrt [6] werden die größten Potentiale zur CO₂-Reduktion in neuartigen Antriebskonzepten und Luftfahrzeugen gesehen. Allerdings könnten diese potenziellen Entwicklungen erst in einigen Jahrzehnten Wirkung zeigen. Zum einen, da die Entwicklung viel Zeit kostet und mit noch ungelösten technologischen Fragen verbunden ist. Zum anderen ist aufgrund der typischen Einsatzdauer von Flugzeugen von bis zu 25 Jahren damit zu rechnen, dass konventionell betriebene Flugzeuge auch im Jahr 2050 noch fliegen, sofern keine regulativen Maßnahmen eine vorzeitige Ausmusterung bedingen.

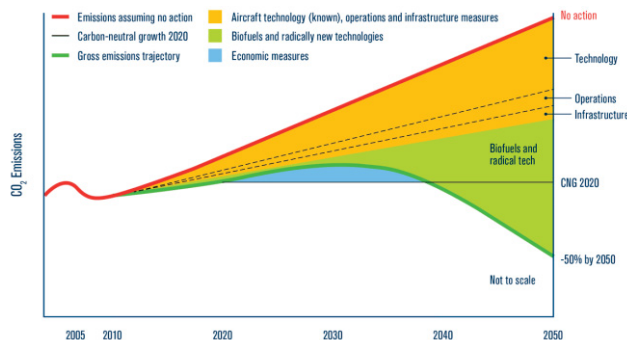


BILD 2. Schematische Darstellung der IATA-CO₂-Emissionsroadmap (International Air Transport Association) bis 2050 (Quelle: [6])

Umso mehr richtet sich aktuell der Blick auf kurzfristige Maßnahmen, die ohne nennenswerte Technologierisiken und ggf. ohne massiven Kapitaleinsatz umsetzbar scheinen. Institutionen wie das Umweltbundesamt [7] und EUROCONTROL [8] rechnen mit einem Einsparpotential von 10% bis 15% an Treibstoff und damit CO₂ durch eine „effizientere Luftraumnutzung“ bzw. Verbesserungen im Luftverkehrsmanagement in Europa. Gemäß EASA (European Union Aviation Safety Agency) [9] entspricht dies rund einer Tonne CO₂ bzw. rund 300 kg Kerosin pro Flug, wovon laut EASA-Berechnungen knapp 40% durch Verkürzung der tatsächlichen Flugwege im Reiseflug erreicht werden könne. EASA benennt ausdrücklich die Rahmenbedingungen für diese Werte: Verzögerungsfreies Taxi-Out, durchgängig kontinuierlicher Steigflug, optimale Reiseflughöhe, Reiseflug über Großkreisentfernung, durchgängig kontinuierlicher Sinkflug, keine Flugwegverlängerung im Flughafennahbereich, keine Verzögerungen beim Taxi-In.

Es gilt als noch offene Forschungsfrage, in welchem Maße es sich bei diesen Potentialen um theoretische Werte handelt, die lediglich in einer idealisierten Welt erschließbar scheinen – und welcher Anteil davon sich tatsächlich mit welchem Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand, unter Beteiligung welcher Prozesspartner und ggf. unter Inkaufnahme von Nachteilen für die Luftfahrt unter welcher Verkehrsbelastung realisieren lässt. Berechnungen wie die der EASA gehen von idealen Einzelflügen aus, allerdings finden pro Tag allein im deutschen Luftraum durchschnittlich bis zu 8.600 Flüge der zivilen Großluftfahrt statt. (Ein Nachteil wäre beispielsweise die Kappung von Verkehrszahlen im Luftraum, da eine Maximalauslastung von Luftraum stets zulasten umweltoptimierter Flugführung stattfindet.) Einige von Institutionen publizierte Zahlenbeispiele für erwartete Flugwegverkürzungen im Streckenbereich halten generell einer Plausibilitätsprüfung nicht stand – siehe auch Kapitel 5.1: Erwartungen von EUROCONTROL an Free Route Airspace.

3. EINFLUSSMÖGLICHKEITEN VON AIR TRAFFIC MANAGEMENT (ATM)

Bezogen auf die von EUROCONTROL [10] verwendeten zeitlichen Vorläufe im Luftverkehrsmanagement bestehen viele Möglichkeiten, Flugverkehr umweltgerechter zu organisieren, z.B.:

Strategisch (bis 7 Tage vor Betriebstag)

Etablierung von „Continuous Climb Operation“ Abflugverfahren (CCO) und „Continuous Descent Operation“ Anflugverfahren (CDO) an Flughäfen
Zeitliche und räumliche Optimierung der Gestaltung und Aktivierung von militärischen Übungsflugräumen (z.B. auch über Military Variable Profile Areas [MVPA], Flexible Use of Airspace [FUA])
Entwurf treibstoffoptimierter Flugverfahren für den Flughafennahbereich unter Abwägung lärmimmissionsrelevanter Aspekte
Etablierung von Direct Routings für große Lufträume (z.B. Free Route Airspace FRA)
Optimierung grenzüberschreitender Routenführungen

Prä-taktisch (1 – 6 Tage vor Betriebstag)

Feinjustierung der Nutzung militärischer Übungsgebiete
Ausarbeitung von Demand-Capacity-Mechanismen und passender Routenführungen auf Grundlage des prognostizierten Verkehrs in Verbindung mit der Wetterprognose

Taktisch (am Betriebstag)

Adäquate Koordination von An- und Abflügen zur optimalen Umsetzung von CCO und CDO insbesondere an hochbelasteten Flughäfen
Berücksichtigung klimarelevanter Höhenschichten bei der Optimierung der Verkehrsflussplanung für den Betriebstag
Vorschlag klimaoptimierter, planmäßiger Flugwege bezogen auf Einzelflüge unter Berücksichtigung von Luftraumbelastungen und Konfliktprognosen
Bevorzugte (Air Traffic Flow Management [ATFM])-Behandlung von klimaoptimierten Flügen und Luftfahrzeugen, die z.B. mit klimafreundlicheren Kraftstoffen betrieben werden

Operativ (Entscheidungen des Lotsen bei der unmittelbaren Flugverkehrskontrolle)

Verringerung von Taxizeiten auf Basis von Arbeitsverfahren, die auf hochentwickelten Rollführungssystemen basieren
Verringerung der Verweildauer in der TMA (Terminal manoeuvring Area) durch optimierte, KI-gestützte (Künstliche Intelligenz) Anflugassistenzsysteme und abstandsmindernde Flugverfahren (Eindrehunterstützung, Abstandhaltung auf dem Endanflug unter Berücksichtigung des Windfeldes, RECAT [Wake Turbulence Recategorization], TBS [Time Based Separation])
Hoher Umsetzungsgrad treibstoff- und lärmoptimierter An- und Abflugverfahren (CCO, CDO)
Verstärkte Nutzung klimaoptimierter Flughöhen zur Verringerung des negativen Effekts von Eiswolken / Cirren
Echtzeiterfassung von Verbrauchsdaten einzelner Flüge und Abgleich mit dem operativ erreichbaren Optimum, Darstellung der Flugführungsalternativen am Lotsenarbeitsplatz

Etliche der Maßnahmen bedürfen neuer und genauerer Informationen mit entsprechendem Vorlauf, z.B.:

- Wetterinformationen (Ist-Situation und Prognose inkl. Nowcast von Windfeldern, Schlechtwetterzonen, Gefahrengebieten)
- Einzelflugbezogene Flugleistungsprognose auf Basis von Borddaten inkl. aktueller Flugzeugmasse
- Borddaten (z.B. optimaler Top of Descent TOD, Cost Index CI, optimale Flughöhe sowie ggf. passender Zeitpunkt für Step-Climbs, aktuelle Masse, Trajektorieninformationen)

4. ENTWICKLUNG VON UMWELTKENNZAHLEN DER FLUGSICHERUNG

Die Relevanz von Umweltkenngrößen in der Aufgabenerfüllung der Flugsicherung ist bei Flugsicherungsorganisationen weltweit in den letzten 25 Jahren gestiegen. Einen Meilenstein stellte dabei in Europa die Gründung der Central Flow Management Unit (CFMU, heute: Network Manager, NM) im Jahr 1995 dar [11], die über zunehmend weiterentwickelte Mechanismen zur Demand-Capacity-Steuerung eine massive Verringerung von Holdingzeiten im europäischen Luftraum erreichte, verbunden mit einer Verminderung des Treibstoffverbrauchs (BILD 3).

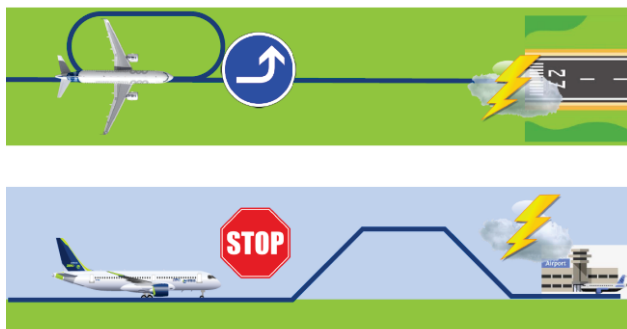


BILD 3. Statt wie früher Warteschleifen anzuweisen (oben), werden heute z.B. bei Schlechtwetter am Zielflughafen Flüge am Ursprungsflughafen zurückgehalten und damit Treibstoff gespart.

Durch die Etablierung eines europäischen ATM-Leistungsregimes und die Einführung von umweltbezogenen Leistungskennzahlen (wie z.B. HFE – Horizontal Flight Efficiency) erhielten Flugsicherungen zusätzlich Anreize, Maßnahmen zu treffen, um noch direktere und umweltgerechtere Flugverläufe anzubieten. Die Einführung von Arrival-Managementsystemen an hochfrequentierten Flughäfen leistete ebenfalls einen Beitrag zur wetter- und verkehrsabhängigen Justierung von Demand-Capacity-Prozessen im Flughafennahbereich.

Auch über eine Intensivierung von grenzüberschreitenden Luftraumgestaltungen und Streckenführungen konnte in Europa eine Verbesserung der HFE erreicht werden. Dies spielt deswegen eine Rolle, da der Großteil der Flüge in Europa grenzüberschreitend stattfindet, im Bereich der DFS etwa 90% [12]. Mittlerweile liegt die mittlere Flugwegabweichung im deutschen Luftraum bei 0,81%, das entspricht 2,9 km Verlängerung im Vergleich zum direkten Flugweg (BILD 4).

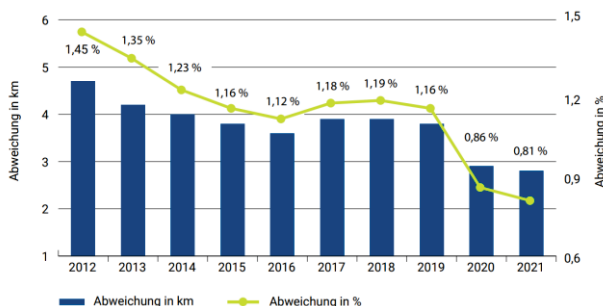


BILD 4. Entwicklung der horizontalen Streckeneffizienz im deutschen Luftraum, 2012 – 2021 [12]

Im europäischen wie im vergleichbar mit zivilem Großluftverkehr frequentierten US-amerikanischen Luftraum liegt die horizontale Streckeneffizienz nahezu gleichauf bei rund 3%, was einer Flugstrecke von etwa 30 km oder 2,5 Minuten Flugzeit entspricht [13]. 2007 hatte dieser Wert noch bei 4% gelegen [14].

➔ Der Wert für die Streckeneffizienz in Deutschland ist deswegen geringer als in Europa, da die Streckeneffizienz per se besser wird, je kleiner der betrachtete Luftraum ist. In einem Flugverkehrskontrollsektor liegt die Streckeneffizienz ohne Holding oder anderer Effekte oft nahe 0%.

Für diese Flugwegverlängerungen gibt es Gründe, die vielfach aufgrund höher priorisierter Zielkennwerte aus anderen KPA (Key Performance Area) bestehen (BILD 5). So resultiert ein Teil der Flugwegverlängerungen aus militärischen Übungsgebieten, die im Gegensatz zu den USA überwiegend zentral und damit in hochfrequentierten Lufträumen liegen. Beispielsweise wirkt die TRA205/305 „Lauter“ (Temporary Restricted Area) südwestlich vom Flughafen Frankfurt massiv auf Ost-West-Flüge in diesem Bereich wie auch auf An- und Abflüge vom Flughafen Frankfurt. Teilweise sind auch umweltrelevante Gründe (Fluglärmimmission) dafür verantwortlich, dass längere Flugrouten gewählt werden. Gerade bei längeren Flügen kann sich positiv auf den Gesamtverbrauch auswirken, wenn eine windoptimierte Flugroute gewählt wird, die ggf. deutlich von einer direkten Verbindung abweicht.



BILD 5. Auswahl möglicher Gründe für Flugwegverlängerungen [15]

Vor dem Hintergrund, dass die aktuellen umweltrelevanten KPI (Key Performance Indicator) für Flüge tatsächlich nur grobe Indikatoren sind, entwickelt die DFS aktuell neue Kennzahlen. Ein möglicher Schwerpunkt solcher, ergänzender Kennzahlen liegt in exakt nachgebildeten Emissionswerten von Flugverkehr in unterschiedlichen Flugsituationen und unter Wettereinfluss (Windfeld). Damit kann sowohl eine realistische Post-Ops-Analyse stattfinden wie auch eine realistische Erfassung, welche Emissionswerte bei „optimaler Flugführung“ (z.B. zur verkehrsschwachen Zeit) überhaupt erwartbar sind und als mögliche Referenz herangenommen werden können. Aus R&D-Sicht (Research & Development) bietet sich langfristig die Möglichkeit, aktuelle Emissionswerte in Bezug auf eine Referenz ggf. zusammen mit angemessenen Handlungsvorschlägen in geeigneter Weise den Fluglotsen an ihrem Arbeitsplatz

anzuzeigen, um ihnen damit die Umsetzung einer umwelt-optimierten Flugführung zu erleichtern.

5. ERKENNTNISSE AUS PROJEKTEN

Aus der Vielzahl abgeschlossener und laufender umweltbezogener Vorhaben im Zuständigkeitsbereich der DFS zeigen folgende sechs Beispiele entsprechende Entwicklungen und den erwarteten bzw. gemessenen oder abgeschätzten klimabezogenen Nutzen.

5.1 Horizontale Flugeffizienz

Projekt COBRA

Im Projekt COBRA (Cooperative Optimisation of Boundaries, Routes and Airspace) entwickelten die Kontrollzentralen Karlsruhe und Maastricht seit 2020 neue grenzüberschreitende Verfahren, die Ende 2021 in Kraft gesetzt wurden. Sie vereinfachen auch den Durchflug durch die TRA „Lauter“ zu Zeiten, in denen die militärische Übungszone nicht aktiv ist. Erwartet wird eine jährliche Reduktion von rund 6.000 Tonnen CO₂ allein durch die Optimierung der Anflüge nach Frankfurt an Wochenenden [16].

Projekt Free Route Airspace FRA

Vor rund 10 Jahren gestartet, hat das europäische Programm zum Ziel, möglichst vielen Flügen direkte bzw. frei wählbare Flugrouten anzubieten. Nach Abschluss soll gemäß EUROCONTROL eine jährliche Ersparnis von 6 Millionen Tonnen Kerosin und 20 Millionen Tonnen CO₂ erreicht werden [17].

➔ Das entspräche einer Reduktion von rund 10% der in Europa jährlich verbrauchten Menge an Kerosin [18] bzw. einer Reduktion von 545 kg Kerosin pro Flug bei einer angenommenen Anzahl von 11 Millionen Flügen jährlich. Angesichts eines typischen Verbrauchs von 2,5 Tonnen Kerosin pro Stunde für einen in Europa gebräuchlichen Airbus A320 [19] und einer Reisegeschwindigkeit von 820 km/h käme dies einer beabsichtigten Streckenreduktion durch „Free Route Airspace“ von 179 km gleich.

Angesichts der derzeitigen Flight Extension von rund 30 km [13] ist dieses Ziel wenig plausibel.

In der DFS startete „Free Route Airspace“ mit dem Projekt „Free Route Airspace Maastricht and Karlsruhe (FRAMaK)“, in dem die Anzahl grenzüberschreitender Flugrouten zwischen den beiden Kontrollzentralen auf 466 direkte Strecken anwuchs. Laut den vom Projekt veröffentlichten Zahlen konnten die jährliche Flugstrecken im betroffenen Luftraum um 1,5 Mio. NM verkürzt werden. Bis zu 9.000 Tonnen Treibstoff wurden eingespart und CO₂-Emissionen um 30.000 Tonnen reduziert. Auf wieviel Flüge sich diese Mengen verteilen ist nicht publiziert. Innerhalb des Zuständigkeitsbereichs des Luftraums von FABEC (Functional Airspace Block European Central) rechnet die DFS langfristig mit etwa 1,9 Mio. Tonnen CO₂-Ersparnis pro Jahr auf Basis der Streckenlängenreduzierung.

Im Folgeprojekt „Free Route Airspace FRA“ konzentrierten sich die Entwicklungen seit 2018 ebenfalls zunächst auf den hochbelasteten oberen Luftraum der Kontrollzentrale Karlsruhe – und in der nötigen Abstimmung u.a. mit an-

grenzenden europäischen Flugsicherungen, den Airlines, der Bundeswehr und dem Network Manager. Begonnen als Arbeitsprinzip für wenig frequentierte Nachtstunden, kann in vielen Lufträumen das Prinzip mittlerweile in Deutschland auch in vielen Lufträumen der Kontrollzentralen Bremen und München über den ganzen Tag angewendet werden. In Zukunft soll auch die Nutzung der im Gebiet der DFS-Kontrollzentralen Bremen und München bestehenden, noch auf die Nachtstunden begrenzten FRA-Lufträume zeitlich ausgeweitet werden. Darüber hinaus strebt die DFS an, in Zusammenarbeit mit den Nachbarstaaten und benachbarter Flugsicherungen weitere grenzüberschreitende FRA-Optionen zu schaffen. So begann ab dem 24. März 2022 die Implementierung einer grenzüberschreitenden Schnittstelle zwischen dem Free Route Airspace Karlsruhe SÜD in Deutschland und dem SECSI FRA (Southeast Europe Common Sky Initiative Free Route Airspace) an der Grenze zu Österreich [20].

So offensichtlich sinnvoll und ambitioniert die Free-Route-Entwicklungen sind – so wenig sind konkrete Messungen verfügbar, die die tatsächlich umgesetzten Einsparungen pro Flug(verbinding) vorher/nachher darlegen. Hier besteht im Sinne der Nachverfolgung von Projektzielen ein Nachholbedarf, es benötigt dazu umfassende individuelle und repräsentative Flugverbrauchsdaten der Airlines und eine dazu passende, sinnvolle Aufarbeitung.

Einführung satellitengestützter Abflugrouten

Satellitengestützte Flugverfahren bieten ein Potential, kürzere und gleichzeitig möglichst fluglärmoptimierte Abflugrouten entwerfen zu können. In einem von INEA geförderten Vorhaben entwickelte die DFS für den Flughafen Düsseldorf eine neue RNP1-Abflugroute (BILD 6), die im Vergleich zu einer konventionellen Abflugroute 20 km (11 NM) Streckenverkürzung bringt. Damit verbunden ist nach Angaben der DFS ca. 25 kg Spritersparnis pro Flug; das entspricht rund 80 kg CO₂. Bei gemittelten 6.000 Flügen pro Jahr entspräche das einer CO₂-Reduktion von rund 480 Tonnen. Es ist zu ergänzen, dass die neue, kürzere Streckenführung aufgrund veränderter Fluglärmbeeinträchtigungen bei den Anrainern zu Diskussionen führt.

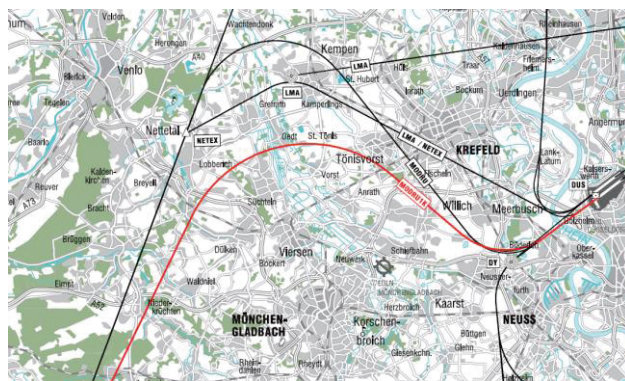


BILD 6. Satellitengestütztes Navigationsverfahren am Flughafen Düsseldorf, Abflugstrecke MODRU (rot)

5.2 Vertikale Flugeffizienz

Angesichts zunehmend ausgeschöpfter Potentiale zur Verkürzung von Flugstrecken kommt der vertikalen Optimierung von Flugverläufen eine wachsende Rolle zu. Dabei sind drei Flugverlaufssegmente zu unterscheiden:

- 1) **Steigflug** – Ziel ist hier ein kontinuierlicher, möglichst energieeffizienter vertikaler Flugverlauf
- 2) **Reiseflug** – günstigstenfalls findet der in der abhängig von der aktuellen Flugzeugmasse optimalen Höhe statt – in Zukunft allerdings auch in Berücksichtigung klimasensitiver Höhenbänder [5]
- 3) **Anflug** – optimal ist hier ein kontinuierlicher Sinkflug ab Top of Descent, der ohne verbrauchsrelevante Horizontalflugphasen auskommt

Während in verkehrsschwachen Zeiten die Umsetzung dieser Ziele oft darstellbar ist, liegt die Herausforderung darin, derartige Flugprofile auch zu Hochlastzeiten für möglichst viele Flüge anzubieten. Exemplarisch zeigt BILD 7 den vertikalen Flugverlauf von Flügen Hamburg-München. Selbst auf dieser vergleichsweise kurzen Strecke (etwa 375 NM) erreichten die Flüge eine Gipfelhöhe von (Flight Level) FL330 bis FL370. Ein einziger, wesentlich tiefer geführter Flug an diesem Tag stellte eine Ausnahme dar und war ggf. die Auswirkung der im Rahmen des Ukraine-Kriegs eingeführten Korridore für Militärflugverkehr. Nennenswerte Horizontalflugphasen im Abflug sind nicht erkennbar. Im Anflug zeigen sich die für einen hochfrequentierten Flughafen typischen Horizontalflugphasen, die u.a. entstehen, um konfliktfrei zu abfliegendem Verkehr zu bleiben sowie wenn Flüge auf Transitions geführt werden und aufgrund des Parallelbahnbetriebs in festen, jeweils unterschiedlichen Höhen auf den Endanflug gedreht werden.

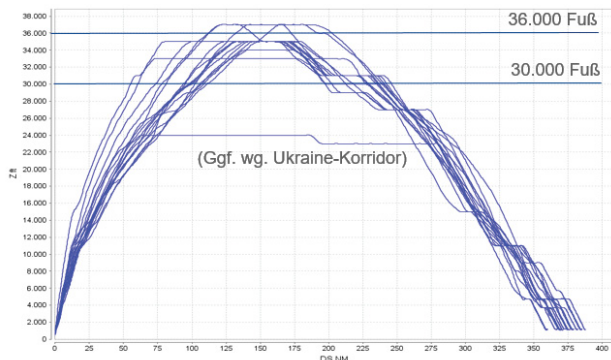


BILD 7. Vertikaler Flugverlauf aller Flüge Hamburg – München am 18. Mai 2022, Quelle: DFS Lage- und Informationszentrum

Seit vielen Jahren werden an Flughäfen in Deutschland sogenannte CDO-Verfahren angeboten und insbesondere zu verkehrsschwachen Zeiten genutzt. CDO steht für „Continuous Descent Operations“ und bedeutet, dass Anflüge im Idealfall ohne schubrelevante Horizontalflugphasen geführt werden sollen [21]. Aufgrund unterschiedlicher örtlicher Rahmenbedingungen ist allerdings die flächendeckende Auswertung, wieviel Anflüge auf deutsche Flughäfen CDO-konform erfolgen, derzeit nicht möglich.

Low Demand Concept (LDC) München und Frankfurt

Der coronabedingte Verkehrseinbruch 2020 bot die Chance einer intensiven Nutzung umweltfreundlicher Anflugverfahren. Lufthansa und DFS entwickelten deshalb im Frühjahr 2020 im Vorhaben LDC ein Verfahren für die Flughäfen München und Frankfurt, so dass Piloten bereits ab

Verlassen des Reisefluges ihren Sinkflug so planen und einleiten konnten, damit dieser idealerweise kontinuierlich bis zum Endanflug verläuft. Zusätzlich wurde die planerische Streckenlänge (Zuführung zum Flughafennahbereich) verkürzt. Flugspurenauswertungen zeigen exemplarisch eine deutlich höhere Nutzungsquote des kontinuierlichen Sinkfluges als 2019 (BILD 8).

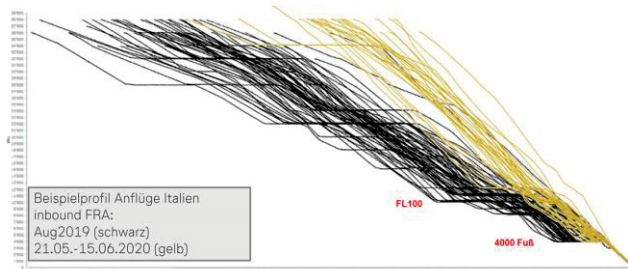


BILD 8. Vertikalprofile für DLH-Anflüge aus Italien kommend nach Frankfurt, Quelle: Lufthansa

Im Sommer 2021 erreichte die Lufthansa Group für Anflüge auf München und Frankfurt nach eigenen Angaben eine Verringerung des Treibstoffverbrauchs im Vergleich zu konventionellen Anflügen um rund 40 Tonnen pro Monat (BILD 9). Unklar ist, auf wieviel Anflüge diese Menge bezogen ist. Seit erneutem Anwachsen der Verkehrszahlen wird daran gearbeitet, die Verfahren des LDC-Konzepts auch bei höheren Verkehrsmengen umsetzen zu können.

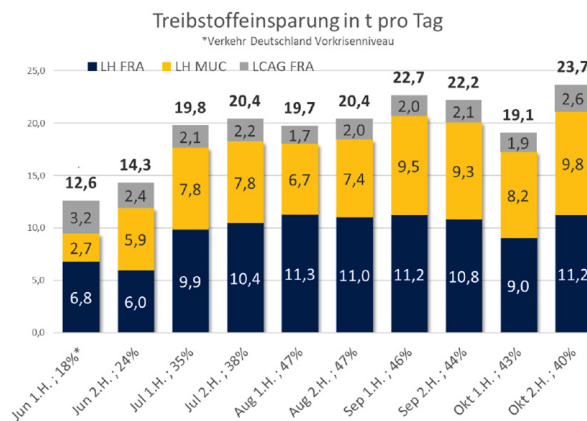


BILD 9. Treibstoffersparnisse durch optimierte Anflüge der DLH auf die Flughäfen München und Frankfurt sowie Lufthansa Cargo in Frankfurt, Juni 2021 – Oktober 2021, Quelle: Lufthansa

Optimized Profile Descend (OPD)

Das OPD-Verfahren für Anflüge aus Süden nach Frankfurt wurde seit 2015 entwickelt und befindet sich seit 2016 in der betrieblichen Erprobung und Weiterentwicklung. Auf der sogenannten EMPAX-Anflugroute wird den Anflügen ermöglicht, kontinuierliche Sinkanflüge ab Verlassen der Reiseflughöhe bis Flughafennahbereich umzusetzen. Gemäß Abschätzung der DFS ergibt sich eine Spriterparnis pro Anflug von etwa 40 kg, das entspricht rund 125 kg CO₂. Bei mehr als 20.000 derartigen Anflügen in 2019 konnte auf Grundlage dieser Werte eine Einsparung von rund 2.500 Tonnen CO₂ erreicht werden.

Grenzen der (insbesondere gleichzeitigen) Optimierung von Steig- und Sinkflügen bestehen unter Hochlastbedin-

gungen aus verschiedenen Gründen. Eine wesentliche Herausforderung ist die Konfliktfreiheit zwischen an- und abfliegendem Verkehr, wenn beide potentiellen Konfliktpartner ihre Steig- bzw. Sinkrate frei wählen können. Potentielle Konfliktpunkte im Flughafennahbereich München zeigt das BILD 10, Flugzeugsymbole sind illustrativ eingebracht.

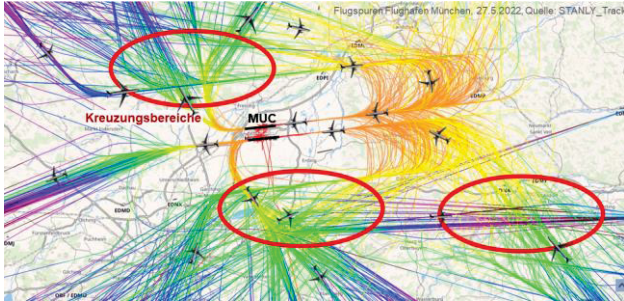


BILD 10. Flugverläufe am Flughafen München, 27. Mai 2022, Betriebsrichtung West, d.h. Landungen von Osten kommend. Quelle: DFS, STANLY_Track

5.3 Rollführung am Flughafen

Seit 2007 arbeitet die DFS im Vorhaben A-CDM (Airport Cooperative Decision Making) daran, die Planung und Koordination von Anlasszeiten, Off-Block-Zeiten und Startzeiten zusammen mit den Fluggesellschaften und den Flughafenbetreibern zu optimieren. Die DFS hat ermittelt, dass seit Ersteinführung von A-CDM in München im Jahr 2007 rund 456.000 t CO₂-Ersparnis erreicht wurde. Etwa 50.000 t jährliche CO₂-Verringerung schätzt die DFS für alle aktuell sechs deutschen A-CDM-Flughäfen durch die optimierten Verfahren.

6. RELATION ZU ANDEREN POTENTIELLEN MAßNAHMEN UND ROLLE DER SYSTEMPARTNER

Luftverkehr ist ein komplexer, vielschichtig verzahnter Prozess. Eine umweltoptimierte Anpassung des Luftverkehrsmanagements und flugbetrieblicher Prozesse setzt die Mitwirkung vieler Prozessbeteiligter voraus. Es bestehen auch Verbesserungspotentiale, zu deren Erschließung die Luftraumnutzer selber in Federführung gehen können, z.B.:

1. Economic Fuel Tankering

„Fuel Tankering“ ist eine Praxis, bei der ein Flugzeug mehr Treibstoff mitführt als für den Flug benötigt wird, um eine Betankung auf dem Zielflughafen zu reduzieren oder zu vermeiden. Grund dafür sind z.B. hohe Treibstoffkosten am Zielflughafen. „Tankering“ erhöht den Treibstoffverbrauch und damit die Menge des ausgestoßenen CO₂ [22].

Gemäß Abschätzung von EUROCONTROL [23] wurde 2018 bei 21 % der Kurz- und Mittelstreckenflüge in Europa Tankering betrieben, was für die Fluggesellschaften in dem Jahr eine Nettoeinsparung von 265 Mio. EUR bedeutete, aber 286.000 Tonnen zusätzlichen Treibstoff verbrannte – d.h. 0,54 % des gesamten in Europa verbrauchten Kerosins. Dabei entstanden über 900.000 Tonnen CO₂

[23]. Airlineseitig stehen derzeit keine belastbaren Zahlen zur Verfügung, in welchem Maße Tankering in Europa durchgeführt wird, aus welchen Gründen und welcher Trend sich über der Zeit in Verbindung mit veränderten Treibstoffkosten ergibt.

Untersuchungen zeigen außerdem, dass mit steigendem SAF-Anteil (Sustainable Aviation Fuel) am Treibstoff und damit verbundenen Mehrkosten im Jahr 2035 fast 80 % der internationalen Flüge von und nach EU-Flughäfen „Tankering“ durchführen könnten. Potentielle Folge wäre eine Reduktion des SAF-Absatzes auf EU-Flughäfen und Reduktion der erwarteten CO₂-Emissionsvorteile um etwa ein Viertel [24].

Angesichts dieser Effekte wäre eine prinzipielle und ggf. wirksame Option, ATM-Mechanismen so anzupassen, dass ökonomisches Tankering zu niedriger Priorität in Verkehrsflusssteuerungen und z.B. Outboundprozessen führt – im Gegenzug könnten Flugzeuge mit einem hohen Anteil an SAF und ohne Tankering entsprechend bevorzugt behandelt werden. Der Rechtsrahmen dafür müsste noch entwickelt werden.

2. Gebühreninduzierte Flugwegverlängerung

Während auf der einen Seite die freie Wählbarkeit direkter bzw. optimaler Routenführungen im Fokus der ATM-Entwicklung in Europa steht, ist andererseits in Untersuchungen durch EUROCONTROL feststellbar, dass Airlines nicht zwingend die kürzeste Flugroute wählen. Vielmehr ist ebenfalls ein Kriterium bei der Flugplanung, welche Kosten durch die Flugsicherungsgebühren auf dem Weg entstehen. Da diese in Europa von Staat zu Staat variieren, können durch Vermeidung von „Hochpreisgebieten“ und moderater Verlängerung des Flugweges u.U. im Saldo Flugkosten reduziert werden.



BILD 11. Illustration der Änderung der auf Flugsicherungsgebühren billigsten Flugrouten von 2021 zu 2022 am Beispiel der Verbindung EKBI-LEBL (Billund-Barcelona), Quelle: EUROCONTROL

Simulationen von EUROCONTROL zeigen, dass trotz Flugwegverlängerung (+11,1 NM) und damit verbundenen Mehrverbrauch und -emission (+50 kg Kerosin, +159 kg CO₂) mit einer Flugroute, die die hochpreisigen Lufträume der Niederlande und Belgiens auspart, günstigere Flugbetriebskosten erreicht werden können (BILD 11).

Gemäß EUROCONTROL sind gebührenkostenoptimierte Flugrouten in Europa gebräuchlich, insbesondere zu verkkehrsschwachen Zeiten. Folge sind betrieblich unnötige

Flugwegverlängerungen und (teilweise nicht prognostizierbare) Änderungen von Flugströmen von Jahr zu Jahr in Abhängigkeit der länderbezogenen Gebührenentwicklungen.

Um derartige Planungen und die damit verbundenen umweltrelevanten Auswirkungen zu vermeiden, kann eine Harmonisierung der Flugsicherungsgebühren sinnvoll sein. Bisher sind Ansätze dazu gescheitert, ein Grund dafür kann darin bestehen, dass eine Harmonisierung zwar einem Anteil der Fluggesellschaften verminderte Betriebskosten brächte (insbesondere in Zentraleuropa), einem anderen Anteil jedoch deutliche Kostensteigerungen. EUROCONTROL schätzt letztere auf bis zu 70 Millionen EUR jährlich pro Airline [25]. Es bestehen keine Pläne für Ausgleichsmechanismen, um diese potentiellen Effekte bei einer „Common Unit Rate“ zu kompensieren.

Beide Beispiele machen deutlich, dass auch den Luft-raumnutzern selber eine signifikante Rolle zukommt, bestehende Optimierungspotentiale zu heben. Sie haben darüber hinaus auf vielfältige Weise die Möglichkeit, die Flugsicherungen bei ihren umweltbezogenen Initiativen zu unterstützen, z.B. durch

- einzelflugbezogene Messung von Treibstoffverbräuchen
- Lieferung flugbetrieblich relevanter Informationen (z.B. aktuelle Abflugmassen, Cost Index)
- Unterstützung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben durch Beratung, Daten, Flugversuche
- langfristige Unterstützung neuartiger Flugführungskonzepte, die einen umfangreichen Datenaustausch Bord-Boden in Echtzeit voraussetzen (ADS-C EPP [Automatic Dependent Surveillance Contract - Extended Projected Profile] u.a.)

7. TECHNISCHE ENABLER

Derzeitige Projekte zur umweltbezogenen Optimierung kommen größtenteils ohne nennenswerte technische Änderungen am Lotsenarbeitsplatz, im Cockpit oder im Datenaustausch Bord-Boden aus. Als eine der Ausnahmen könnten Arrival-Management-Systeme gelten: Im Projekt XMAN (Extended Arrival Management System) wurde im Bereich des FABEC eine systemgestützte und optimierte Koordinierung und Synchronisierung der Anflugströme zu den verkehrsreichsten Flughäfen umgesetzt. Durch die damit erreichte Verkürzung von Anflugwegen errechnete die DFS eine jährliche CO₂-Ersparnis von bis etwa 110.000 bis 215.000 Tonnen innerhalb des FABEC-Luftraums.

Folgende Assistenzsysteme könnten beispielsweise umweltgerechtere Flugführungen unterstützen:

- Informationssystem für Fluglotsen, das KI-gestützt die verbleibende Restflugstrecke bis zum Endanflug berechnet und damit eine CDO-konforme Vertikalführung unterstützt
- Prognosesysteme, die den Beginn des Startlaufs sowie die 4-D-Abflugtrajektorie von Einzelflügen berechnet und damit den Lotsen unterstützt, CDO-konforme Anflüge zu CCO-konformen Abflügen zu staffeln

- Assistenzsystem zur Optimierung der tatsächlichen Abstände auf dem Endanflug unter Berücksichtigung des herrschenden Windfelds – Forschungsarbeiten dazu hat die DFS im Projekt FUTURE („Fluglotsenunterstützung Endanflug“) durchgeführt das 2022 abgeschlossen wurde. Als Nutzen einer derartigen Lotsenassistenz konnte eine Verkürzung von Flugwegen in der TMA beobachtet werden.
- Informationssystem für Fluglotsen, um eisgesättigte Lufträume zu vermeiden – inkl. Empfehlungen einer alternativen Führung unter Berücksichtigung einzelflugbezogener Verbräuche und Emissionen. (Vorarbeiten dazu finden aktuell im LuFo-Vorhaben D-KULT statt [5].)

Die für diese Systeme nötigen Daten liegen teilweise der Flugsicherung nicht vor und müssten in Echtzeit und in ausreichender Genauigkeit zur Verfügung stehen.

Langfristig ist zu erwarten, dass eine Verbesserung des Datenaustauschs zwischen Bord und Boden auch umweltgerechtere Flugführungen unterstützen kann – allerdings ist bei maßgeblichen Entwicklungen (z.B. ADS-C EPP) nicht mit einer Einsatzreife bezogen auf die weltweite Luftverkehrsflotte in den nächsten 5 – 10 Jahren zu rechnen. Umso wichtiger scheint, den „Early Adoptern“ im Sinne eines „Best equipped, best served“-Prinzips zu begegnen. Entsprechende betriebliche Konzepte dafür sind noch zu erstellen. Ähnlich verhält es sich mit dem avisierten digitalen, latenzfreien, kombinierten Sprach-Datenaustausch zwischen Bord und Boden, mit dessen betrieblichem und flächendeckenden Einsatz nicht vor 2035 gerechnet werden kann.

Mittelbar kann eine weitergehende Automatisierung der Flugverkehrskontrolle über die damit angestrebte Workloadreduktion zu einem höheren Anteil an umweltoptimierten Flugführungen beitragen (BILD 12): Die durch die Arbeitserleichterung bei den Fluglotsen erschlossenen kognitiven Potentiale können genutzt werden, um Einzelflügen umweltgerechtere Flugpfade anbieten zu können.

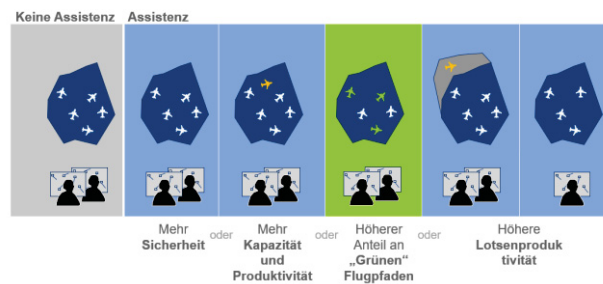


BILD 12. Schematische Darstellung, in welcher Weise eine Workloadreduktion durch Lotsenassistenz genutzt werden kann

In Realzeitsimulationen gemessen wurde dieser Effekt in dem DLR-Projekt AcListant (Active Listening Assistant), unter Beteiligung von DFS-Approachlotsen. Durch Nutzung von Spracherkennung zur Dokumentation von Freigaben anstelle händischer Eingaben an einem simulierten Lotsenarbeitsplatz für die Anflugkontrolle Düsseldorf zeigte sich eine durchschnittliche Anflugverkürzung von 77 Sekunden, was einem Minderverbrauch von 40 bis 52 kg Kerosin pro Anflug gleichgesetzt wurde [26].

8. AUSBLICK

In den letzten Jahren wurden viele Anstrengungen unternommen, Luftverkehr energieeffizienter und umweltgerechter zu führen. Teils in regional bezogenen Projekten, teilweise im großen Maßstab und in grenzüberschreitender Zusammenarbeit. Die zielgerichtete Fortführung dieser Aktivitäten ist eine Aufgabe von wachsender Relevanz für das Luftverkehrsmanagement. Als Fokus bietet sich dabei die weitere Verbesserung der vertikalen Flugeffizienz an. Die Zusammenarbeit zwischen den Prozesspartnern – namentlich Flugsicherung und Airlines – ist in diesen Entwicklungen essentiell.

Das Ziel einer Klimaneutralität kann zwar mit diesen Optimierungen nicht maßgeblich unterstützt werden. Bei angenommenen 3% Verkehrswachstum wäre eine Verminderung der spezifischen CO₂-Emissionen pro Flug von z.B. 6% bereits nach rund 2 Jahren hinsichtlich der absoluten CO₂-Emission kompensiert. Allerdings stellen diese Entwicklungen einen wichtigen Baustein dar, um überhaupt die offenbar trotz Corona global weiterwachsenden CO₂-Emissionen der Luftfahrt in einem ersten Schritt und ohne nennenswerten, ggf. disruptiven Technologieeinsatz begrenzen helfen zu können.

→ Ob angesichts absehbarer Wachstumsszenarien ohne eine zahlenmäßige Deckelung des weltweiten Luftverkehrs in den nächsten 15 Jahren eine Reduktion der absoluten Emissionswerte in der Luftfahrt möglich wird, scheint selbst bei Annahme einiger sehr ambitionierter Optimierungspotentiale im laufenden Betrieb fraglich.

Dessen unbenommen genießt selbst bei neuartigen Flugzeugen (z.B. mit Wasserstoffantrieb oder elektrisch betrieben) eine klimaoptimierte Trajektorie im Flugbetrieb eine hohe Relevanz, da sie neben der Umwelt- und Kostenrelevanz auch eine Bedeutung für sicher planbare Reichweiten hat. Energieeffizient zu fliegen wird aus diesem Grund auch mit „grünen“ Antrieben ein wichtiges Ziel bleiben – unter Einschluss aller ATM-Prozesse.

Im Rahmen dieser weiteren betrieblichen Optimierungen besteht zum einen ein deutlicher Verbesserungsbedarf in der realistischen Abschätzung, welche flugbetrieblichen Potentiale in welchen Flugphasen noch erschlossen werden können. Hier braucht es einen gemeinsamen, einvernehmlichen Blick aller Prozesspartner und Interessengruppen auf Basis nachvollziehbarer Zahlen – in ganz Europa, denn rund neun von zehn Flügen überfliegen mindestens eine Ländergrenze.

Zum anderen zeigt sich sehr deutlich, dass es an der einzelflugbezogenen Messung von Verbesserungen mangelt. Nur konkrete Messungen können bei der Abschätzung helfen, wieviel von den (einvernehmlich ermittelten) Potentialen durch einzelne Maßnahmen tatsächlich gehoben worden sind – inwieweit sich Effekte unterschiedlicher Maßnahmen addieren oder ggf. gegenseitig kompensieren - und wieviel Potential noch verbleibt. Angesichts der geringen Einsparungen pro Flug können diese Daten vielfach nicht über Simulationen erfasst werden, da Simulatoren – selbst, wenn sie mit Messwerten aus Flugversuchen kalibriert sind – ggf. nicht die erforderliche Genauigkeit bieten und in den meisten Fällen wesentliche Parame-

ter nicht berücksichtigen (CI, Powersetting, Klappensetzung, FMS-Eingaben (Flight Management System), aktuelle Flugzeugmasse, Windfeld). Die erforderlichen, maßnahmenbegleitenden Messungen sollten einem mindestens europäisch oder auf FAB-Ebene (Functional Airspace Block) abgestimmten Muster folgen und allen europäischen Prozesspartnern im Luftverkehr zur Verfügung stehen.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A-CDM	Airport Collaborative Decision Making
AcListant	Active Listening Assistant
ADS-C EPP	Automatic Dependent Surveillance Contract - Extended Projected Profile
ATFM	Air Traffic Flow Management
ATM	Air Traffic Management
CCO	Continuous Climb Operation
CDO	Continuous Descent Operation
CFMU	Central Flow Management Unit
CI	Cost Index
COBRA	Projekt "Cooperative Optimisation of Boundaries, Routes and Airspace"
DFS	DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
D-KULT	Projekt „Demonstrator Klima- und Umweltfreundlicher Lufttransport“
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EU	Europäische Union
FABEC	Functional Airspace Block
FABEC	Functional Airspace Block European Central
FL	Flight Level
FMS	Flight Management System
FRA	Free Route Airspace
FRAMaK	Projekt "Free Route Airspace Maastricht and Karlsruhe"
FUA	Flexible Use of Airspace
FUTURE	Projekt „Fluglotsenunterstützung Endanflug“
HFE	Horizontal Flight Efficiency

IATA	International Air Transport Association
KI	Künstliche Intelligenz
KPA	Key Performance Area
KPI	Key Performance Indicator
LDC	Low Demand Concept
MVPA	Military Variable Profile Area
NM	Network Manager ODER Nautical Miles
OPD	Optimized Profile Descend
R&D	Research & Development
RECAT	Wake Turbulence Recategorization
SAF	Sustainable Aviation Fuel
SECSI	Southeast Europe Common Sky Initiative Free Route Airspace
TBS	Time Based Separation
TMA	Terminal manoeuvring Area
TOD	Top of Descent
TRA	Temporary Restricted Area
XMAN	Extended Arrival Management System

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Lee D. S., Fahey D. W., Skowron A., Allen M. R., Burkhardt U., Chen Q., Doherty S. J., Freeman S., Forster P. M., Fuglested J., Gattelman A., DeLeon R. R., Lim L. L., Lund M. T., Millar R. J., Owen B., Penner J. E., Pitari G., Prather M. J., Sausen R. and Wilcox L. J. (2020) "The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing in 2018."
- [2] Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung> abgerufen 4.9.2022
- [3] Ritchie, H., "Climate change and flying: what share of global CO₂ emissions come from aviation?", Our World in Data, <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation> abgerufen 2.9.2022
- [4] EASA-Report (2020). Updated analysis of the non-CO₂ climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to the EU Emissions Trading System Directive Article 30(4). Arrowsmith et al, 23.11.2020.
- [5] Leemüller, R., „Von der Forschung zur Inbetriebnahme am Beispiel von klimaoptimierten Flugrouten“, Beitrag zum Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2022
- [6] IATA Aircraft Technology Roadmap 2050, <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/Technology-roadmap-2050.pdf> abgerufen 2.9.2022
- [7] Umweltbundesamt, „Umweltschonender Luftverkehr lokal – national – international“, 2019, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-06_texte-130-2019_umweltschonender_luftverkehr_0.pdf abgerufen 4.9.2022
- [8] EUROCONTROL Think Paper #16 - Reducing aviation emissions by 55% by 2030, <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-think-paper-16-reducing-aviation-emissions-55-by-2030> abgerufen 4.9.2022
- [9] EASA European Aviation Environmental Report 2019, https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/user_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_HI-RES_190311.pdf abgerufen 4.9.2022
- [10] Crawford, K., EUROCONTROL Network Management Operations Centre <https://www.icao.int/MID/Documents/2019/ACAO-ICAO%20ATFM%20Workshop/1.3.1-%20EUROCONTROL%20Experience.pdf> abgerufen 4.9.2022
- [11] EUROCONTROL, Central Flow Management Unit (CFMU) Creation <https://skybrary.aero/articles/central-flow-management-unit-cfmu> abgerufen 4.9.2022
- [12] DFS Mobilitätsbericht (2021) Luftverkehr in Deutschland. Mobilitätsbericht 2021 <https://www.dfs.de/homepage/de/medien/publikationen/luftverkehr-in-deutschland-mobilitaetsbericht-2021.pdf?cid=gvb> abgerufen 4.9.2022
- [13] Buxbaum, J., Einbindung des Luftverkehrs in intermodale Reisen, Internationales Verkehrswesen, 9/2022
- [14] Performance Review Report 2007, EUROCONTROL, 2008 <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/pr-2007.pdf> abgerufen 4.9.2022
- [15] Buxbaum, J., „Leistungskennzahlen der Flugsicherung und ihre Wechselwirkung“, DLR Kolloquium Flugsicherung 2015 https://www.kolloquium-flugfuehrung.de/wp/wp-content/uploads/2015/02/2015-02-24_Leistungskennzahlen.pdf abgerufen 12.8.2022
- [16] Pressemitteilung der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, „DFS kooperiert mit Eurocontrol bei der Optimierung von grenznahen Lufträumen“, 16.11.2021
- [17] EUROCONTROL, "Free Route Airspace" <https://www.eurocontrol.int/concept/free-route-airspace> abgerufen 4.9.2022
- [18] Renewable Carbon News "Can the European Union's kerosene demand be met by the amount of biomass produced in the EU?" <https://renewable-carbon.eu/news/can-the-european-unions-kerosene-demand-be-met-by-the-amount-of-biomass-produced->

[in-the-eu/#:~:text=In%202018%2C%20the%20consumption%20of,to%202%2C895%20million%20GJ2](#) abgerufen 4.9.2022

- [19] W Aviationinfo.net, "A320 Fuel Burn Per Hour | Airbus A320 Fuel Consumption"
<https://aviationinfo.net/a320-fuel-burn-per-hour-airbus-a320-fuel-consumption/> abgerufen 4.9.2022
- [20] Pressemitteilung Austro Control, 4.3.2022
https://www.austrocontrol.at/unternehmen/medien/presse_news/detail/fab_ce_-_fabec_-_erweiterung_des_grenzueberschreitenden_freien_luftraums_fuer_einen_klimaschonenden_flugverkehr#:~:text=Die%20neue%20grenz%C3%BCberschreitende%20Schnittstelle%20wird,M%C3%A4rz%202022 abgerufen 4.9.2022
- [21] ICAO, „Continuous Descent Operations Manual“, 2010,
https://applications.icao.int/tools/ATMiKIT/story_content/external_files/102600063919931_en.pdf abgerufen 4.9.2022
- [22] EUROCONTROL Think Paper #1 "Fuel Tankering: economic benefits and environmental impact"
<https://www.eurocontrol.int/publication/fuel-tankering-european-skies-economic-benefits-and-environmental-impact> abgerufen 4.9.2022
- [23] EUROCONTROL Think Paper #10 "Flying the 'perfect green flight': How can we make every journey as environmentally friendly as possible?"
<https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-think-paper-10-flying-perfect-green-flight> abgerufen 4.9.2022
- [24] Tabernier, L., Deransy, R. (EUROCONTROL), Rutherford, D., (ICCT), "Economic Fuel Tankering: A Threat to Aviation Decarbonisation", ICAO Environmental Report, 2021
- [25] EUROCONTROL Think Paper #18 "One size fits all – A common unit rate for Europe?", 6.9.2022
- [26] Helmke, H., Ohneiser, O., Buxbaum, J., Kern, C., "Increasing ATM Efficiency with Assistant Based Speech Recognition", Twelfth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2017)