

Rolle der Automatisierung bei der Umsetzung klimaoptimierter Anflugprofile

Jörg Buxbaum¹, Lukas Rohrmüller¹, Steffen Flämig², Wolfram Schiffmann², Jan Höra¹

Motivation

Luftverkehr trägt messbar zum menschengemachten Klimawandel bei. Unter anderem aufgrund der zunehmenden gesellschaftlichen Ächtung seiner Hauptverursacher 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 Reise Flughöhe.

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 Umweltdiskussion 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.

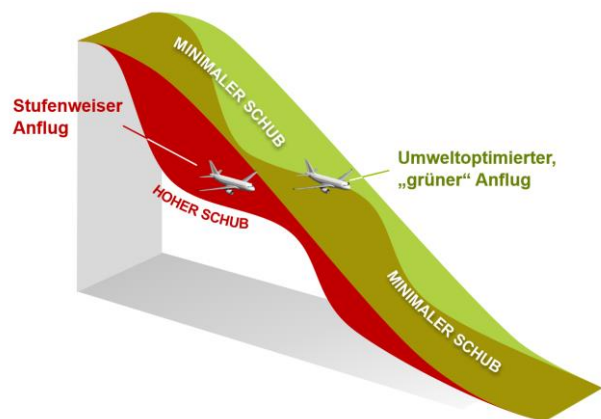


Abbildung 1: Prinzipbild eines stufenweisen Anfluges (rot) und eines umweltoptimierten Anfluges (grün)

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist der Geltungsbereich bzw. das Ziel des CDO. Ein idealer CDO startet am *Top of Descent* (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*

¹ DFS Deutsche Flugsicherung GmbH

² Fernuniversität Hagen

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 so weit 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.

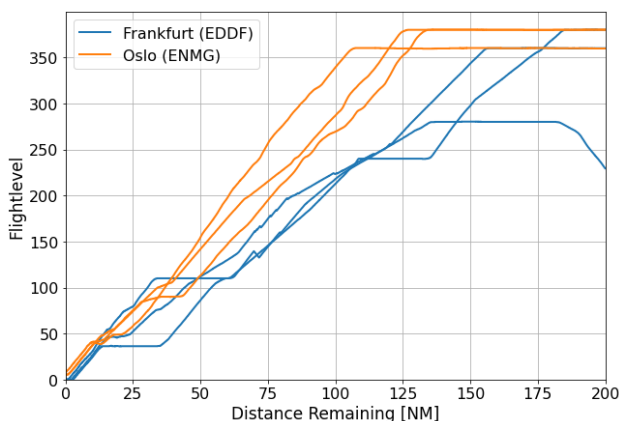


Abbildung 2: Zufällig ausgewählte Anflüge der A320- und B737-Familie auf die Flughäfen Frankfurt und Oslo am 28.03.2023. Daten: OpenSky [3]

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 / Flughafenbereich) 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 *Instrumentlandesystem (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 EUROCONTROL-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 Reiseflug 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*) [5]. 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 [5] 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 flugsicherungsbetrieblichen 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) ist in Abbildung 3 dargestellt.

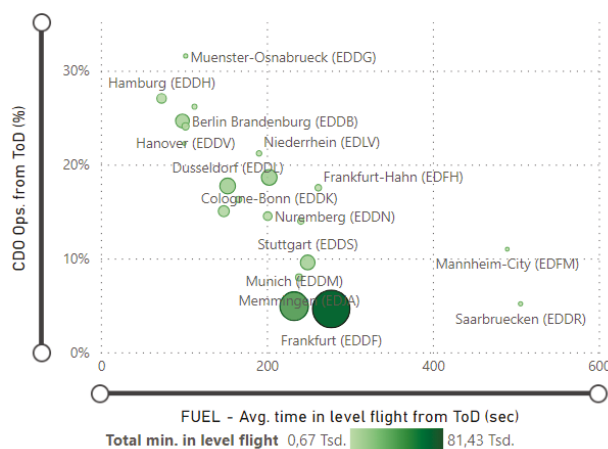


Abbildung 3: Summe von Levelflight-Flugzeiten beim Anflug auf deutsche Flughäfen ab TOD (Quelle: EUROCONTROL, Daten für April 2023 [4])

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 [7]. 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 Staffelung 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 – günstigstenfalls ab Reiseflughöhe – unterliegt zahlreichen Rahmenbedingungen, bezogen auf Flugverkehrsmanagement und der Flugzeugführung. Die Abbildung 4 zeigt eine Auswahl dieser Bedingungen.

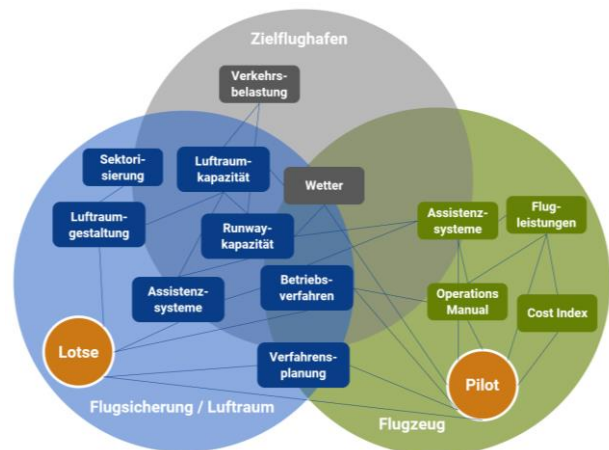


Abbildung 4: Abhängigkeitsdiagramm der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Möglichkeiten einer optimierten vertikalen Flugführung (Ist-Situation)

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 Lufträume.

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 Maschinellen 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 [8]. Der „Spacing Assistant“ berechnet für jedes anfliegende Flugzeuge u.a. unter Berücksichtigung der Höheninformation und Kompressionseffekten auf dem Endanflug eine Trajektorie, die die ideale Position für das Verlassen der Transitions beinhaltet. 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 [6]. 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 [6]. 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)* 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: Kerosinmehrerverbrauch im Vergleich zum optimalen vertikalen Flugverlauf	ATFM-Delay aufgrund verminderteter Bahnkapazität	Flugsicherungsgebührenrate
Auswirkung von CDO-Anflügen ohne weitere technische Unterstützung	-	/	+	--	-
Zielzustand (Assistenzsystem vorhanden, Verfahren, Arbeitsweisen und Prozesse optimiert)	/	/	++	-	--

Abbildung 7: Potentielle Wirkung vermehrter CDO-Anflüge auf die KPI der DFS (auf Grundlage der Vorgaben aus der *SES Performance Scheme Reference Period 3* [10]). Der orange-farbig 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 „Kerosinmehrerverbrauch 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 8 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 8: 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 Kerosin besteht, wenn ein CDO-Anflug ab TOD umgesetzt wird, was mit einer Reduktion von gut 400 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.

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 innereuropäische Flüge eines Airbus A320 exemplarisch der Kerosinverbrauch im Anflug notiert. Die beiden Anflüge sind in Abbildung 9 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.

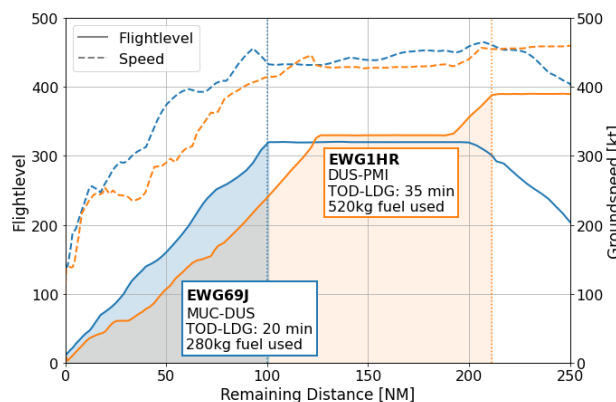


Abbildung 9: Profil zweier Anflüge mit Treibstoffverbrauch zwischen TOD und Landung. EWG69J am 29.08.2023, EWG1HR am 30.08.2023. Verbrauchs- und Zeitdaten von den Piloten notiert, Profil von FlightAware [13].

Das Beispiel verdeutlicht nochmals, dass die geometrische Interpretation vertikaler Flugverläufe allein kaum einen Schluss auf Verbräuche und die Umweltaffizienz von Anflügen zulässt und die Verwendung u.a. von Borddaten und meteorologischen Daten für eine seriöse Bewertung von Umweltaspekten eines Anflugs nötig ist.

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 Flugzeitverlängerung oder Verspätung eines CDO-Anfluges deutlich über 1,5 Minuten (z.B. aufgrund einer geringeren Flugeschwindigkeit 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 Flugdauerverlängerungen durch CDO-Anflüge könnten auch folgende Effekte für wiederholende Flugverbindungen einer Airline resultieren:

- Höhe Flugeschwindigkeit 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 m/s² 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 ≤ 3 NM unterhalb FL 245 bzw. ≤ 5 NM oberhalb FL 245, zusammen mit einer vertikalen Annäherung ≤ 1.000 ft gewertet. Dies entspricht den von der DFS verwendeten Mindeststafelungswerten. Ein beispielhafter Konflikt zwischen

einem fiktiven CDO und einem Abflug ist in Abbildung 10 dargestellt.

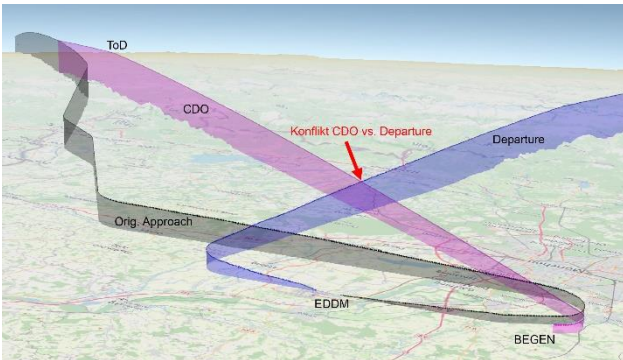


Abbildung 10: Beispiel eines Konfliktes zwischen einem fiktiven CDO und einem Abflug

Ergebnisse

Von den betrachteten 359 fiktiven CDOs wären 119 ohne Konflikt zum FAF gekommen. Bei den anderen 240 CDOs ergaben sich insgesamt 420 Konflikte. Einige dieser Flüge hatten also mehrere Konflikte.

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

Tabelle 1: Konflikttypen und Anzahl

Die meisten Konflikte entstehen zwischen zwei fiktiven CDOs. Diese konzentrieren sich räumlich in der Nähe des FAF, siehe Abbildung 11. 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.

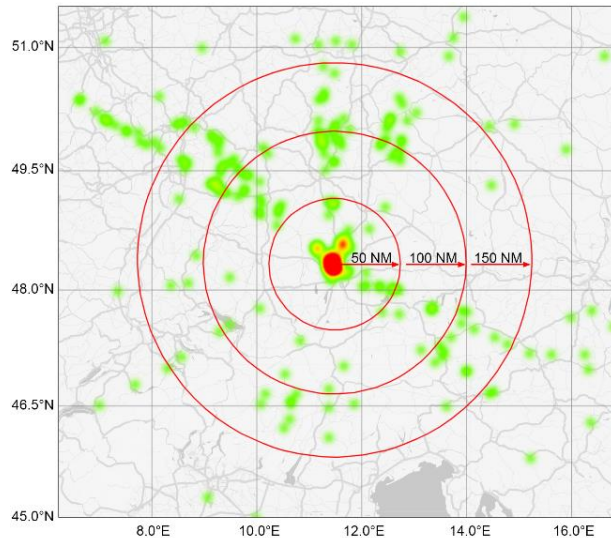


Abbildung 11: Laterale Häufigkeitsverteilung der Konflikte

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 12. Sie treten gehäuft auf den Hauptanflugrouten aus Nord, Nordwest und Südost auf.

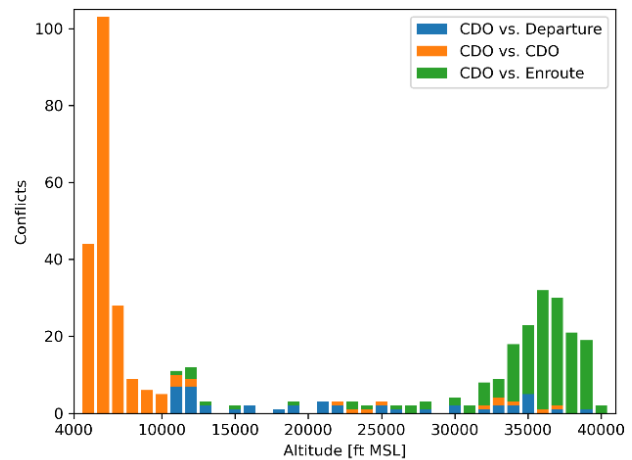


Abbildung 12: Konflikthäufigkeit in Relation zu Höhe und Konflikttyp

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.

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 (Abbildung 13).

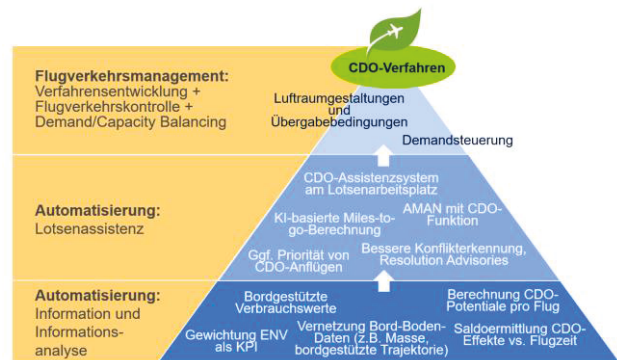


Abbildung 13: Voraussetzungen für die Umsetzung von CDO-konformen Anflügen, unterteilt in die drei Gruppen „Information und Informationsanalyse“ (Automatisierung), „Lotsenassistenten“ (Automatisierung) und Flugverkehrsmanagement.

Ebenfalls lässt sich der aktuelle Stand der Lotsenassistenten bei CDO-Anflügen in der bei SESAR (*Single European Sky ATM Research*) entwickelten *Levels of Automation Taxonomy* [18] auftragen (Abbildung 14):

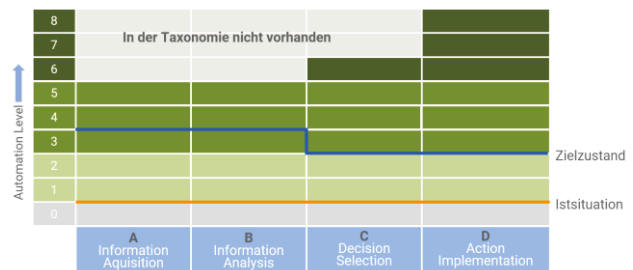


Abbildung 14: Istzustand und möglicher Zielzustand eines CDO-Assistenten für Fluglotsen (vereinfachend) für CDO-Anflüge ab Top of Descent. Der Zielzustand setzt neue Technologien und Verfahren voraus, die es heute noch nicht gibt.

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:

- **Informationsaquisie:** 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.

Rolle der Automatisierung bei der Umsetzung klimaoptimierter Anflugprofile

- **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 15).

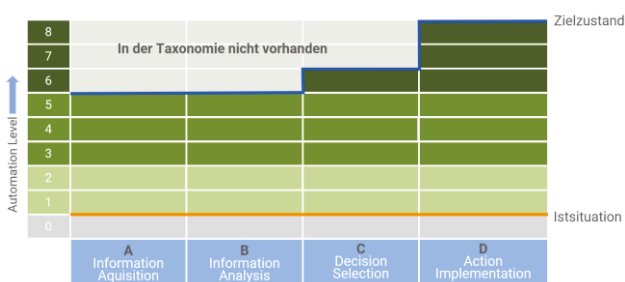


Abbildung 15: Vollautomatisierung eines Prozesses zur Umsetzung von CDO-Anflügen ab Top of Descent. Ein derartiger Ablauf ist aufgrund technologischer Grenzen derzeit nicht absehbar.

Ein derartiger Zielzustand wäre durch folgende Eigenschaften geprägt:

- **Informationsaquire:** 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 umwelloptimierter 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 16), 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].

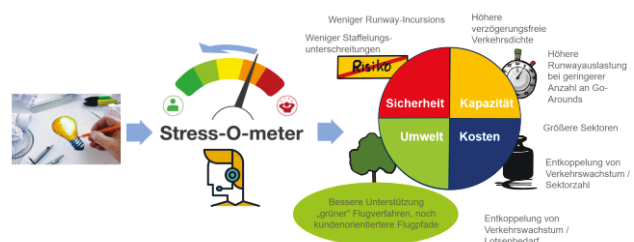


Abbildung 16: Prinzipbild des Zusammenhangs zwischen der Workloadreduktion von Fluglotsen und den verschiedenen Potentialen hinsichtlich relevanter KPI der Flugsicherheit.

Zwar können durch eine Entlastung der Fluglotsen 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.)

Bei der Initiierung und Umsetzung von treibstoffoptimierten Anflügen ist deshalb ein vielschichtiger Prozess zu erwarten (Abbildung 17), 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.

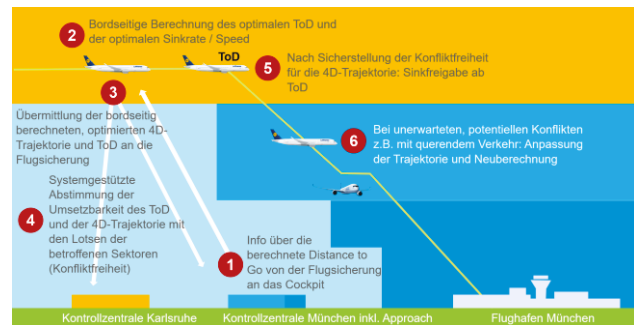


Abbildung 17: Möglicher Prozess eines treibstoffoptimierten Anflugs ab TOD, basierend auf Beschreibungen eines Zukunftsszenarios Flugsicherung für das Jahr 2035 [20].

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 18).

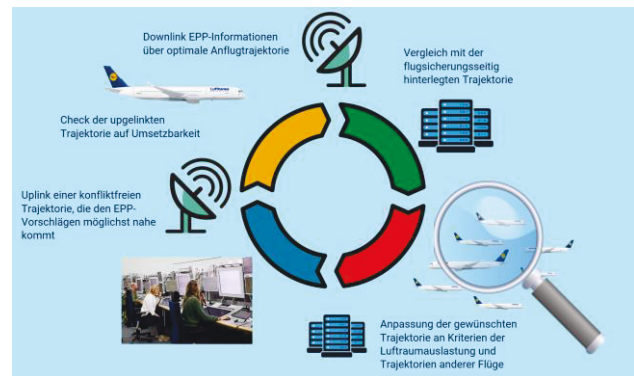


Abbildung 18: Möglicher Kreisprozess einer wiederkehrenden „Verhandlung“ von optimierten Anflugtrajektorien unter Nutzung von EPP-Funktionalitäten.

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 19. 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.

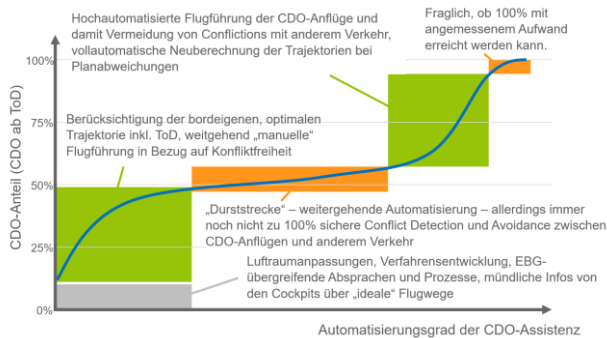


Abbildung 19: Möglicher Verlauf einer zunehmenden Assistenz / Automatisierung bei der Umsetzung von CDO-Anflügen von TOD und der zu erwartende Anteil an CDO-Anflügen beim jeweiligen Automationsstand.

Einordnung des Nutzens von treibstoffoptimierten 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 ist kein relevanter Baustein in Richtung einer klimaneutralen Luftfahrt. 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 [21]. 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 Euro 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.

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 umwelloptimierter 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.

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
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
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
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 Open-Sky: 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] EUROCONTROL (2023). Continuous climb and descent operations performance monitoring dashboard. Aufgerufen am 11.6.2023. Verfügbar unter: <https://ansperformance.eu/efficiency/vfe/>
- [5] 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.
- [6] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH (2023). BA FVM, Ausgabe Januar 2022 / Stand: 18. Mai 2023 (3. Ergänzungslieferung)
- [7] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH (2023). AIP IFR, Stand 07.09.2023.
- [8] Hagg, E., Konopka, J. (2023). Spacing-Assistent for Leipzig and Munich Approach. Innovation im Fokus 1/2023.
- [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/metadatas/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] Graver, B., Zang, K., Rutherford, D. (2019). CO2 emissions from commercial aviation, 2018. International Council on clean transportation.
- [22] 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/>
- [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.lufthansa-group.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.composites-world.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/mobilitaetsbericht2022-internet.pdf/preview-001.jpg?cid=igg.1si7&resize=b3f988%3a280x>