

BEWERTUNG DER EFFIZIENZ VON FLUGZEUGEN MIT HYBRIDLAMINARHALTUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON WOLKENEINFLÜSSEN

A. A. Pohya, K. Wicke und V. Gollnick
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,
Institut für Lufttransportsysteme
Blohmstraße 20, 21079 Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die operationelle und ökonomische Effizienz von Flugzeugen mit Hybridlaminarhaltung zu bewerten. Im Vordergrund steht dabei die Frage, wie kritisch die Degradation der Laminarität durch Wolkeneinflüge ist und welche Gegenmaßnahmen zur Minderung des Einsparpotenzialverlustes geeignet sind. Dazu wurden zwei Mittel-Langstreckenflugzeuge mit Hilfe von meteorologischen Atmosphärenrendaten des European Centre for Medium-Range Weather Forecast hinsichtlich ihrer Effizienz untersucht. Neben der Erstellung einer globalen und auf die Luftfahrt bezogenen Wolkenklimatologie wurden vom DLR entwickelte Tools zur Trajektorienimulation genutzt, um das reale Einsparpotenzial von Flugzeugen mit Hybridlaminarhaltung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kraftstoffplanungsstrategien zu ermitteln. Zudem wurde eine Umgebung zur Trajektorienoptimierung verwendet, um die Frage zu beantworten, inwieweit und unter welchen Bedingungen alternative laterale Streckenführungskonzepte geeignet sind, um durch die Vermeidung von Wolkendurchflügen die Laminaritätsdegradation zu vermindern und den ökonomischen Vorteil der Technologie zu maximieren.

NOMENKLATUR

BL	Baseline Design (Referenzflugzeug)	TCM	Trajectory Calculation Module
COC	Cash Operating Costs	TIC	Time in Cloud (allgemein)
DOC	Direct Operating Costs	TIC _{flight}	Flugspezifische TIC
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecast	TIC _w	Flugspezifische und gewichtete TIC
ERA	European Reanalysis Interim Program	TOM	Trajectory Optimization Module
ETOPS	Extended-Range Twin-Engine Operational Performance Standard	UTC	Universal Coordinated Time
GASP	Global Atmospheric Sampling Program	cc_{rel}	Relative Wolkenbedeckung in ERA
GC	Großkreistrajektorie	C_D	Reibungsbeiwert
HLFC	Hybrid Laminar Flow Control	$C_{D,lam}, C_{D,turb}$	Reibungsbeiwert (laminar, turbulent)
LEFT	Leading Edge Flight Test Program	t_{cr}	Reiseflugzeit
NASA	National Aeronautics and Space Administration	d_{cr}	Reiseflugdistanz
OSP	Optimalsteuerungsproblem	v_{TAS}	Fluggeschwindigkeit (True Air Speed)
OT	Optimierte Trajektorie	Δ_{CE}	Änderung des Einsparpotenzials durch Wolkenbegegnungen (Cloud Encounter)

1. EINLEITUNG

Vor dem Hintergrund begrenzter Rohstoffvorkommen und ambitionierter ökologischer Ziele auf europäischer und internationaler Ebene [1, 2] nimmt die Relevanz von Technologien zur Steigerung der Kraftstoffeffizienz von Verkehrsflugzeugen stetig zu. Seitens der Aerodynamik konzentrieren sich die Forschungsaktivitäten vor allem auf die Laminarhaltung, die auf eine Reduzierung des Reibungswiderstandes abzielt, der mit ca. 50% einen Großteil am Gesamtwiderstand ausmacht (s. BILD 1).

Studien zur Applikation der Hybridlaminarhaltung (Hybrid Laminar Flow Control, HLFC) an Tragflügeln, den Leitwerken sowie den Triebwerksgondeln zeigen Kraftstoffeinsparungen von 9-12%, wenn ideale operationelle Randbedingungen vorausgesetzt werden. Der reale Airline Betrieb ist jedoch durch unterschiedliche Faktoren gekennzeichnet, die zu einer Degradation der Laminarhaltung führen und somit das Einsparpotenzial reduzieren. Zu den kritischen

Einflussfaktoren gehören die Kontamination der Flügel durch Insekten während der Start- und Landephase [3–5] sowie Wolkenbegegnungen auf Reiseflughöhe [6–8].

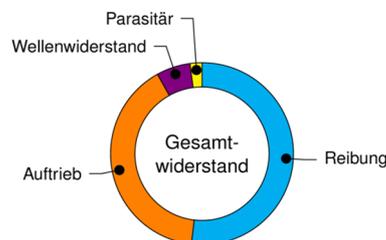


BILD 1. Typische Anteile des Gesamtwiderstands von Verkehrsflugzeugen im Reiseflug (nach [9])

Für eine kommerziell erfolgreiche Durchsetzung der Hybridlaminarhaltung bedarf es einer möglichst realistischen und damit einer Degradationseffekte berücksichtigenden Technologiebewertung auf ökologischer und ökonomischer Ebene [10]. Dazu werden in den folgenden

Abschnitten dieses Kapitels einige Grundlagen, Randbedingungen und Werkzeuge vorgestellt, die den Einfluss- und Effizienzanalysen zugrunde liegen. In den darauf folgenden drei Kapiteln folgen Erläuterungen und Ergebnisse zu jeweils durchgeführten Untersuchungen, die folgende Fragen thematisieren:

- Welche Wolkenverweildauer ist auf typischen Flugrouten zu erwarten? Wovon ist diese im Wesentlichen abhängig? (Kapitel 2)
- Wie hoch ist die Kraftstoffeffizienz von Flugzeugen mit HLFC (unter der Annahme von Großkreisstrajektorien), wenn die Degradation durch Wolken berücksichtigt wird? Welchen Einfluss haben dabei unterschiedliche Kraftstoffplanungsstrategien? (Kapitel 3)
- Inwieweit eignen sich laterale Routenoptimierungen, um dem Degradationseffekt hinsichtlich der anfallenden Betriebskosten entgegenzuwirken? (Kapitel 4)

1.1. Degradation der laminaren Umströmung durch Wolkeneinflüge

Der Betrieb von Flugzeugen mit HLFC geht mit einer erhöhten Sensitivität hinsichtlich operativer Einflussfaktoren einher. So haben beispielsweise Flugversuche der NASA gezeigt, dass atmosphärische Partikel (primär Eiskristalle in hohen Wolken) zu einer verfrühten Transition des der laminaren Umströmung führen. Dieser Effekt wird auf Mikroturbulenzen zurückgeführt, die durch den Nachlauf der Eiskristalle ausgelöst werden, die durch die laminare Grenzschicht wandern [11]. Es konnte gezeigt werden, dass der Degradationseffekt von verschiedenen Parametern wie z.B. der Eiskristallgröße, der Partikelkonzentration oder der Geometrie der Flügelvorderkante abhängt [6, 11, 12]. Während Flugmesskampagnen wurden sowohl partielle, als auch vollständige Verluste der Laminarität beobachtet, die sich jedoch auf die Zeit beschränken, in der sich das Flugzeug innerhalb von Zirruswolken oder leichtem Dunst befindet. Aus diesem Grund kann die flugspezifische Wolkenverweildauer TIC_{flight} als ein zusätzlicher relevanter Parameter in der Beschreibung der Kraftstoffeffizienz von Flugzeugen mit HLFC angesehen werden [5] (s. Gleichung (1)):

$$(1) \quad TIC_{flight} = \frac{1}{t_{cr}} \sum TIC_{abs}$$

Die heute zur Verfügung stehenden Statistiken zu Wolkenbegegnungen und der dazugehörigen Verweildauer auf typischen Airline-Routen beschränken sich auf Daten des Global Atmospheric Sampling Program (GASP) sowie dem Leading Edge Flight Test Program (LEFT) der NASA aus den 1970er und 1980er Jahren. Im GASP wurden meteorologische Daten mit Hilfe von mehreren speziell ausgerüsteten Boeing 747 auf insgesamt 1748 Flügen aufgezeichnet, die zum Großteil auf der Nordhalbkugel durchgeführt wurden (etwa 75% der Flüge befanden sich zwischen 20°N und 60°N). Die statistische Analyse dieser Daten ergab eine starke Abhängigkeit der TIC vom Breitengrad sowie der Flughöhe bzw. des vertikalen Abstandes zur Tropopause, wohingegen die saisonale Variation vergleichsweise gering ausfiel. Im Durchschnitt wurde eine Wolkenverweildauer von ca. 6,2% ermittelt [7].

1.2. ECMWF Wolkendaten

Die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen basieren auf Atmosphärendaten aus dem European Reanalysis Interim Programm (ERA), die vom European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) zur Verfügung gestellt

werden [13]. In ERA werden atmosphärische Parameter wie z.B. Windgeschwindigkeiten¹, Temperaturen sowie die relative Wolkenbedeckung cc_{rel} in einer lateralen Auflösung von 0,75° und auf 60 vertikalen Ebenen (von der Erdoberfläche bis zu einer Druckhöhe von 0,1 hPa) berechnet. Das in ERA hinterlegte Modell zur Wolkenrepräsentation beschreibt mit cc_{rel} für jeden Datenpunkt den volumetrischen Anteil der zugrundeliegenden Gitterbox, der bewölkt ist. Da keine Informationen zur lokalen Wolkenposition und -verteilung innerhalb der Box verfügbar sind, kann dieser Parameter als Wahrscheinlichkeit interpretiert werden, beim Durchflug auf eine Wolke zu treffen² (s. BILD 2). Durch die fehlende physikalisch messbare Relation zwischen cc_{rel} und der Wolkenpartikelgröße oder -dichte ist ein direkter Vergleich der GASP-Ergebnisse mit denen der ECMWF-Analysen nur bedingt möglich.

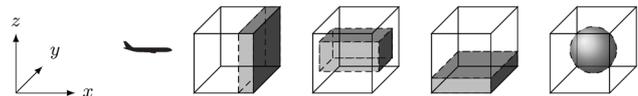


BILD 2. Illustration des Durchfluges von Gitterboxen mit $cc_{rel} = 0,25$

Betrachtet man die Bewölkung für einen exemplarischen Transatlantikflug, wie sie in BILD 3 gezeigt ist, lässt sich erkennen, dass die Werte von cc_{rel} von den äußeren Grenzen der beiden großen Wolkenfelder zum Wolkenzentrum hin zunehmen. Unter der Annahme, dass die Wolkenintensität (Partikeldichte und -konzentration) im Zentrum einer Wolke tendenziell höher ist als an ihren äußeren Grenzen, kann der Wolkenparameter aus ERA auch als Indikator für die Intensität der Wolke interpretiert werden. Darauf basierend wird die gewichtete Wolkenverweildauer gemäß

$$(2) \quad TIC_{flight} = \frac{1}{t_{cr}} \int cc_{rel}(t) dt$$

definiert. Damit entspricht Gleichung (2) der Fläche unterhalb der Kurve in BILD 3. Die Gewichtung erfolgt mit dem Zahlenwert von cc_{rel} und berücksichtigt somit indirekt und unter der oben genannten Annahme die Intensität der Wolke. Für das betrachtete Beispiel ergibt sich eine gewichtete Wolkenverweildauer von 46%, die sich aus den zwei großen Wolkendurchflügen zusammensetzt.

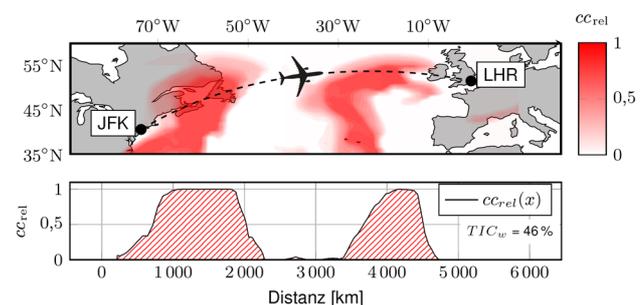


BILD 3. ECMWF Bewölkung für einen Großkreisflug von JFK nach LHR auf FL375 am 25.12.2014 um 12 Uhr (UTC)

¹ Um eine isolierte Betrachtung des Wolkeneffektes zu gewährleisten, wurden Winde in den in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen und Untersuchungen vernachlässigt.

² Diese Interpretation wurde durch Gespräche mit den Fachexperten des ECMWF und des Deutschen Wetterdienstes für die Wolkenmodellierung bestätigt.

1.3. Trajektorien-simulation und -optimierung

Im Folgenden sollen die in dieser Arbeit genutzten Simulations- und Optimierungswerkzeuge kurz vorgestellt werden.

1.3.1. Trajectory Calculation Module (TCM)

Die Simulation der Flugmissionen erfolgt mit dem Trajectory Calculation Module (TCM)³, welches bereits im Rahmen zahlreicher interdisziplinärer Projekte für die Analyse und Bewertung der Auswirkungen neuer Technologien und Strategien auf das Lufttransportsystem verwendet wurde [14–17]. Das TCM berechnet für eine vorgegebene Route die Trajektorie inkl. der Informationen zur aktuellen Flughöhe, dem Breiten- und Längengrad, der zurückgelegten Strecke und Flugzeit sowie relevante Flugzustandsgrößen (z.B. aktuelles Gewicht, Geschwindigkeit, Schub und Kraftstoffverbrauch) [14]. Als Eingangsparameter werden Flugzeuginformationen wie z.B. das Flugzeuggewicht sowie Aerodynamik- und Triebwerks-Leistungskennfelder benötigt.

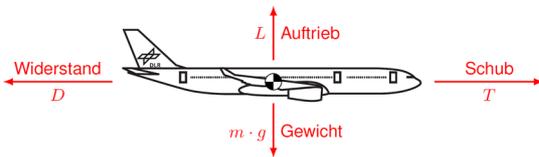


BILD 4. Auf das als Punktmasse betrachtete Flugzeug wirkende Kräfte nach dem Total Energy Model

Die Grundlage für die Regulierung von Beschleunigung, Steiggeschwindigkeit und Schubkraft bildet im TCM das Total Energy Model, bei dem das Flugzeug vereinfachend als Punktmasse betrachtet wird. Weiterhin wird angenommen, dass der Leistungsüberschuss, der aus den auf das Flugzeug wirkenden Kräften resultiert, gleich der Summe der Zuwachsraten an potentieller und kinetischer Energie ist [18] (s. BILD 4 und folgende Gleichung).

$$(3) \quad \underbrace{(T - D) v_{TAS}}_{\text{Leistungsüberschuss}} = \underbrace{mg \cdot \frac{dH}{dT}}_{\text{Zuwachsrates an potentieller Energie}} + \underbrace{mv_{TAS} \cdot \frac{dv_{TAS}}{dt}}_{\text{Zuwachsrates an kinetischer Energie}}$$

1.3.2. Trajectory Optimization Module

Für die in den Analysen durchgeführte Optimierung von Flugrouten wurde das Trajectory Optimization Module (TOM)³ genutzt, welches auf dem Ansatz von Optimalsteuerungsproblemen basiert [19].

$$(4) \quad \mathcal{J}(x(t), u(t), t) = c_{\Upsilon} \Upsilon(t_0, t_f, x(t_0), x(t_f)) + c_{\Psi} \int_{t_0}^{t_f} \Psi(x(t), u(t), t) dt$$

$$(5) \quad \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t)$$

$$(6) \quad u(t) \in [u_{\min}; u_{\max}]$$

$$(7) \quad x(t) \in [x_{\min}; x_{\max}]$$

$$(8) \quad p(t) \in [p_{\min}; p_{\max}]$$

$$(9) \quad x(t_0) \in [x_{\min,0}; x_{\max,0}]$$

$$(10) \quad x(t_f) \in [x_{\min,f}; x_{\max,f}]$$

Dabei wird die Bewegung des Flugzeuges durch eine

Zustandsvariable $x(t)$ (z.B. aktuelle Position) beschrieben, die durch einen Steuerungsvektor $u(t)$ (z.B. Schub) beeinflusst wird. Optimaltrajektorien werden errechnet, indem ein Eingangsvektor $u(t)$ ermittelt wird, für den ein vorher definiertes Kostenfunktional \mathcal{J} (s. Gleichung (4)) minimal wird. Dabei müssen dynamische Randbedingungen sowie Limitierungen bezüglich der Steuerungs-, Zustands und Pfadvektoren als auch bezüglich der Anfangs- und Endbedingungen eingehalten werden (s. Gleichung (5)–(10)).

1.3.2.1. Kostenfunktional \mathcal{J}

Das generische Kostenfunktional \mathcal{J} in Gleichung (4) ist aus einer ersten Straffunktion Υ , die vom Anfangs- und Endzustand des Flugzeuges abhängt, sowie einer zweiten, über die Flugzeit zu integrierenden Straffunktion Ψ zusammengesetzt. Für die durchzuführenden Analysen muss diese allgemeine Form des Kostenfunktionals mit Hilfe der Straffunktionen in eine problemspezifische Form überführt werden. Die Koeffizienten c_{Υ} und c_{Ψ} fungieren dabei als Gewichtungsfaktoren. In den folgenden Untersuchungen ist das Kostenfunktional wie folgt definiert:

$$(11) \quad \mathcal{J} = \text{COC}(t_f - t_0, m_f - m_0)$$

Das hier verwendete Modell zur Bestimmung der Cash Operating Costs (COC) basiert auf Liebeck et al. [20] und benötigt neben einigen flugzeugspezifischen Informationen hauptsächlich die Flugzeit und den verbrannten Missionkraftstoff.

1.3.2.2. Lösen des Optimalsteuerungsproblems

Das durch die Gleichungen (4) – (10) definierte Optimalsteuerungsproblem (OSP) wird der MATLAB Toolbox *GPOPS-II* übergeben. Diese nutzt einen direkten Ansatz, der auf der Anordnungsmethode von Legendre-Gauss-Radau basiert, um das kontinuierliche OSP in ein diskretes und nichtlineares Problem zu überführen. Dieses wird anschließend mit dem Solver IPOPT [21] gelöst.

Für eine detailliertere Beschreibung des TOM sei auf Lührs et al. [19] verwiesen.

1.3.3. Implementierung der Wolkendegradation in TCM und TOM

Sowohl das TCM als auch das TOM wurden im Rahmen der Untersuchungen um einen Algorithmus erweitert, mit dem der erhöhte Kraftstoffverbrauch von Flugzeugen mit HLFC bei Wolkendurchflügen berücksichtigt wird. Ausgangslage sind hier je Flugzeug zwei Aerodynamikkennfelder: Eines bei voll funktionsfähiger Laminarhaltung und eines mit Kompletterverlust der Laminarhaltung. Für die Implementierung der Degradation durch Wolken wird in jedem Punkt der Simulation der Widerstandsbeiwert durch eine Interpolation zwischen turbulentem ($C_{D,turb}$) und laminarem ($C_{D,lam}$) Widerstandsbeiwert berechnet, wobei der relative Wolkenbedeckungsgrad cc_{rel} als Interpolationsgewichtung verwendet wird, (s. folgende Gleichung):

$$(12) \quad C_D = C_{D,lam} + cc_{rel} \underbrace{(C_{D,turb} - C_{D,lam})}_{\Delta C_D}$$

Daraus folgt, dass sich bei klarem Himmel ein Widerstandsbeiwert von $C_{D,lam}$ einstellt, während ein Durchflug einer Wolke mit $cc_{rel} = 1$ zu einem Beiwert von $C_{D,turb}$ führt.

³ Entwickelt bei DLR Lufttransportsysteme

Die Folge der Laminaritätsdegradation auf den momentanen Kraftstoffverbrauch ist in BILD 5 dargestellt. Die zugrunde liegende Bewölkung entlang der Route entspricht dem transatlantischen Flug aus BILD 3, mit den zwei großen Wolkenfeldern und einer Wolkenverweildauer von 46%. Es ist zu erkennen, dass der sich einstellende Kraftstoffverbrauch ($\dot{m}_{f,interp}$, schwarz) stets zwischen dem Verbrauch bei maximaler Laminarität ($\dot{m}_{f,lam}$, grün) und Kompletterverlust der Laminarhaltung ($\dot{m}_{f,turb}$, rot) befindet. Der aktuelle Wert des Kraftstoffverbrauchs stellt sich je nach Wolkenbedeckungsgrad cc_{rel} ein.

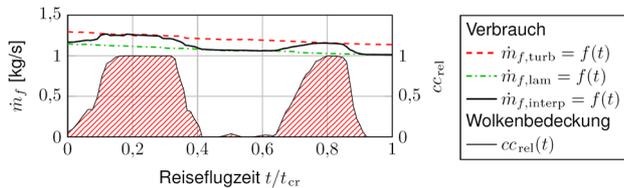


BILD 5. Kraftstoffverbrauch unter Berücksichtigung der Laminaritätsdegradation durch Wolken

2. ANALYSE DER WOLKENVERWEILZEITEN

Um die Eignung der Atmosphärendaten des ECMWF bewertend zu prüfen und die Kritikalität von Wolkenbegegnungen einschätzen zu können, werden in der ersten Analyse dieser Arbeit – vergleichbar zum GASP der NASA – die Wolkenverweilzeiten auf typischen Mittel- und Langstreckenflügen untersucht.

2.1. Randbedingungen

Basis der Untersuchung ist das im Jahr 2012 geflogene Streckennetzwerk aller Airbus A330 Flugzeuge aus der Airport Data Intelligence Datenbank Sabre. Die 750 selektierten Streckenpaare repräsentieren ca. 99% aller von der A330 angebotenen Sitzplatzkilometer (s. BILD 6). Das Streckennetzwerk wurde mit Hilfe von Atmosphärendaten von 2013 und 2014 auf Wolkenverweilzeiten hin untersucht. Dabei wurde neben einem trapezförmigen Vertikalprofil eine über den Reiseflug konstante Flughöhe unterstellt. Um dennoch den höhen-spezifischen Einfluss der Wolkenaufkommen zu erfassen, wurde jeder Flug auf vier verschiedenen Reiseflughöhen untersucht. Damit beläuft sich die Anzahl der insgesamt untersuchten Flüge auf 2,19 Millionen Fälle.

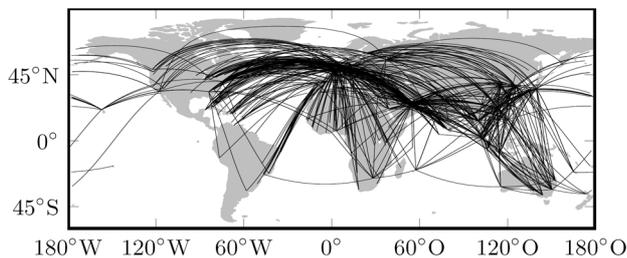


BILD 6. Selektierte Flüge des A330 Streckennetzwerks

2.2. Ergebnisse der TIC Analyse

Die über alle untersuchten Flüge gemittelte gewichtete Wolkenverweildauer beträgt ca. 10,1%, der Median liegt bei ca. 6,6%. Verglichen mit den Werten von GASP ($\bar{\varnothing} \approx 6,2\%$) und LEFT ($\bar{\varnothing} \approx 8,3\%$) zeigt die vorliegende Analyse einen höheren Mittelwert. Mögliche Ursachen umfassen zum einen die Art der Wolkendetektion (physikalische Messung vs. numerisches Vorhersagemodell),

aber auch die Anzahl und Verteilung der untersuchten Flüge (z.B. deutlich mehr Flüge im asiatischen Raum in der vorliegenden Analyse).

BILD 7 zeigt die relative Häufigkeitsverteilung der Wolkenverweildauer aus der ECMWF Analyse (grau) im Vergleich mit den Daten aus GASP (rot) [5]. Grundsätzlich ist eine gute Übereinstimmung auszumachen. In beiden Untersuchungen ist der Bereich zwischen 0 und 5% dominant. Zudem sinkt die Häufigkeit mit steigender Wolkenverweildauer drastisch, sodass Werte von TIC_w über 40% vernachlässigbar erscheinen.

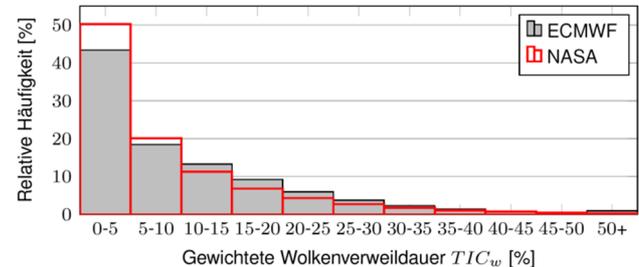


BILD 7. Vergleich der relativen Häufigkeitsverteilung der Wolkenverweilzeiten

Neben der gesamtheitlichen Ergebnisbetrachtung wurden die ermittelten Daten sowohl regional, als auch saisonal und flughöhen-spezifisch analysiert. Während die Variabilität der Wolkenbegegnungen mit wechselnden Jahreszeiten vergleichsweise gering ausfällt, zeigt die TIC Analyse eine starke Abhängigkeit von der beflogenen Region und gewählten Flughöhe. Wie BILD 8 zeigt, ist es dabei nicht möglich, eine allgemeingültige Aussage bezüglich zu bevorzugender Flughöhen zu treffen. Der Graph zeigt die mittleren Wolkenverweilzeiten für Routen für 13 betrachtete Regionskombinationen.

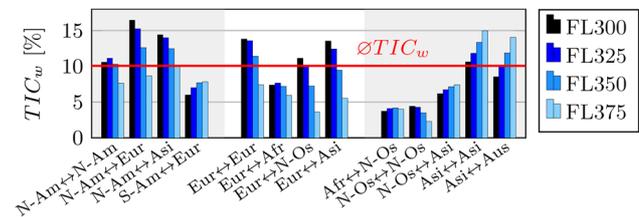


BILD 8. Flughöhen-spezifische mittlere TIC_w für betrachtete Regionskombinationen⁴

Während auf Flügen zwischen einigen Regionen wie z.B. zwischen Afrika und dem Nahen Osten flughöhen-unabhängig mit geringeren Wolkenverweilzeiten zu rechnen ist, zeigen andere Regionen für verschiedene Fluglevel deutliche Unterschiede. So weisen Strecken zwischen Nordamerika und Europa auf höheren Flughöhen geringere TIC_w auf, während sich dieser Effekt auf Routen innerhalb Asiens sowie zwischen Australien und Asien umkehrt. Dieser Effekt kann größtenteils auf die Breitengradabhängige Höhe der Tropopause zurückgeführt werden.

⁴ Abkürzungen:

N-Am: Nordamerika, S-Am: Südamerika, Eur: Europa, Afr: Afrika, N-Os: Naher Osten, Asi: Asien, Aus: Australien

3. KRAFTSTOFFEFFIZIENZ VON FLUGZEUGEN MIT HLFC UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON WOLKEN

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse zweier Analysen vorgestellt werden, mit denen das Kraftstoffeinsparpotenzial von Flugzeugen mit HLFC unter Berücksichtigung der Laminaritätsdegradation durch Wolken quantifiziert werden kann. Da die Kraftstoffeffizienz auch davon abhängt, wieviel Kraftstoff zuvor getankt wurde, wird in der ersten Analyse eine *ideale*⁵ Kraftstoffplanung unterstellt, um das maximale Einsparpotenzial ohne Reservekraftstoffnutzung zu ermitteln. In der zweiten Analyse werden dann mögliche Strategien zur Berücksichtigung der Wolkendegradation in der Betankung untersucht.

3.1. Verwendete Flugzeug- und Analysemodelle

3.1.1. Flugzeugmodelle

Allen folgenden Analysen liegen zwei für diese Arbeit Flugzeugentwürfe zugrunde, die mit Hilfe der Entwurfsumgebung MICADO [22] erstellt wurden⁶. Beim ersten Modell mit der Bezeichnung *Baseline* (BL) handelt es sich um ein typisches Mittel- und Langstreckenflugzeug mit klassischer Triebwerks- und Leitwerksanordnung, s. BILD 9. Mit einer Auslegungsreichweite von 6000 NM und der Reisemachzahl von 0,82 ist sie an eine A330-200 angelehnt. Das BL Modell weist keine Systeme zur Hybridlaminarhaltung auf und fungiert als Referenzmodell für den späteren Vergleich mit dem HLFC-Modell.

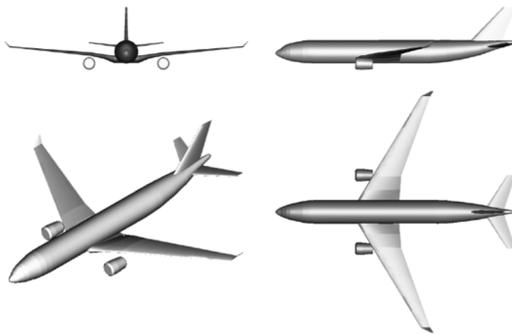


BILD 9. Isometrische und Dreiseitenansicht des turbulent umströmten Baseline Modells

Basierend auf der BL wurde – unter den gleichen Auslegungskriterien – ein zweites Flugzeugmodell mit HLFC auf der Flügeloberseite sowie den Leitwerken (beidseitig) entworfen. Dieses wird im Folgenden mit HLD (Hybrid Laminar Design) abgekürzt. Die HLFC Systeme inkl. aller Subkomponenten (Pumpen, Rohre, etc.) wurden im HLD mit einer zusätzlichen Masse von 500 kg angenommen und implementiert. Zudem wurde ein zusätzlicher Energiebedarf der Hybridlaminarhaltung von 100kW, der den Triebwerken während des Reisefluges entnommen wird, angenommen. Für das Aerodynamikkennfeld, welches im TCM für die Berechnung der Zustandsgrößen benötigt wird, wurde die Laminarhaltung in der Weise implemen-

⁵ Die *ideale* Kraftstoffplanung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der benötigte Missionskraftstoff (inkl. der Berücksichtigung der Degradation durch Wolken) a priori bekannt ist und das Flugzeug mit dieser Menge zzgl. der Reserven betankt wird.

⁶ An dieser Stelle sei Dr. Kristof Risse vom DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik für das Erstellen der Flugzeugentwürfe und die Zusammenarbeit herzlich gedankt.

tiert, dass der viskose Anteil des Reibungsbeiwertes $C_{D,visc}$ um 0,0025 im Vergleich zum turbulent umströmten Kennfeld verringert wurde. Für den Schutz vor Insektenkontamination sind Krügerklappen als Hochauftriebshilfen vorgesehen [23]. Die quantitativen Werte basieren auf vorherige Langstreckenflugzeugentwürfe mit HLFC und einer Transitionsposition bei ca. 50% der Flügelsehnenlänge [22, 23]. Durch ein sog. *resizing* im Entwurfsprozess, welches unter der Bedingung konstanter Flügelflächenbelastung sowie konstantem Schub-Gewichtsverhältnis das Design des HLD Modells iteriert und Schneeballeffekte berücksichtigt, weist das HLD gegenüber dem BL Modell ca. 6% kleinere Flügelflächen und ca. 6% leistungsschwächere Triebwerke auf. Dadurch ist das Betriebsleergewicht des BL Entwurfs um ca. 3% kleiner als das des HLD. Für eine detailliertere Darstellung sei auf [24] und [25] verwiesen.

3.1.2. Analysemodelle

Um in den folgenden Analysen ein vollständiges Gesamtbild des Wolkeneinflusses zu erhalten, wird jeder Flug im TCM mit vier verschiedenen Analyseinstellungen simuliert, s. Tabelle 1.

Tabelle 1. Gewählte Analysemodelle zur Quantifizierung des Kraftstoffeinsparpotenzials

Name	Ref	HLD _{turb}	HLD _{ideal}	HLD _{real}
Flugzeug	BL	HLD	HLD	HLD
Umströmung	Turbulent	Turbulent	Laminar	Partiell

Da das erste Modell auf dem Baseline Entwurf basiert und hier kein HLFC System vorhanden ist, bleiben jegliche Wolkenbegegnungen unberücksichtigt. Auch beim HLD_{turb} und HLD_{ideal} Modell ist eine Berücksichtigung der Degradation in den Wolken nicht notwendig, da diese die Extremfälle (vollturbulente bzw. maximallaminare Umströmung) repräsentieren. Erst im vierten Modell, dem HLD_{real}, wird der in Gleichung (12) beschriebene Algorithmus zur Laminaritätsdegradation umgesetzt.

Mit Hilfe dieser Analysemodelle ist es je nach Vergleich nicht nur möglich das reale Kraftstoffeinsparpotenzial eines HLFC-Flugzeuges gegenüber der Baseline zu ermitteln (HLD_{real} vs. Ref), sondern auch den durch die Wolkenbegegnungen induzierte Verlust an Einsparpotenzial isoliert zu quantifizieren (HLD_{real} vs. HLD_{ideal}). Dies ist deshalb notwendig, da die beiden zugrundeliegenden Flugzeugentwürfe (BL und HLD) durch das *resizing* ein unterschiedliches Betriebsleergewicht aufweisen und daher bei identischer Mission – unabhängig von HLFC – eine unterschiedliche Kraftstoffmenge benötigen.

Weiterhin wurde die Anzahl der zu untersuchenden Flüge aus Gründen der Rechenzeit auf etwa 40000 reduziert, die sich auf ca. 200 Routen, 100 Atmosphären Daten und zwei Flughöhen (FL350 und FL375) aufteilen.

3.2. Kraftstoffeffizienz bei idealer Betankung

Die folgenden Ergebnisse basieren auf einer Betankungsstrategie, bei der bereits vor dem Flug exakt bekannt ist, wann und wo mit Wolkenbegegnungen zu rechnen ist und wieviel Missionskraftstoff verbrannt wird. Dadurch handelt es sich bei den Ergebnissen um das maximale Einsparpotenzial unter Berücksichtigung von Wolkendegradationen und der Voraussetzung, dass Reservekraftstoffe unangestastet bleiben.

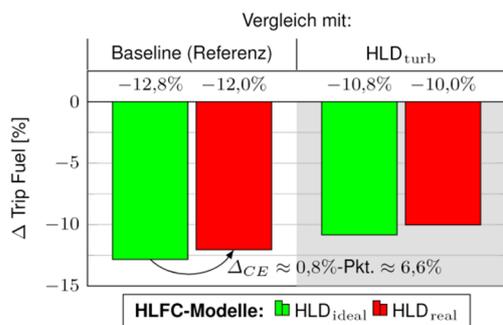


BILD 10. Kraftstoffersparnis untersuchter Modelle bei idealer Betankung

BILD 10 zeigt, dass das Flugzeug mit HLFC bei Vernachlässigung von Wolken (grüner Balken - HLD_{ideal}) eine Kraftstoffersparnis von 12,8% aufweist (linke Spalte), wenn die Baseline als Referenz herangezogen wird. Darin sind ca. 2,2% Kraftstoffeinsparung inkludiert, die das HLD Modell allein durch den Gewichtsvorteils gegenüber BL aufgrund des Resizings mit sich bringt. Wird nun die Laminaritätsdegradation in Wolken berücksichtigt (roter Balken - HLD_{real}), verschlechtert sich das Einsparpotenzial um 0,8 Prozentpunkte auf 12%. Relativ gesehen entspricht das einem Differenz in der Einschätzung der Kraftstoffersparnis von $\Delta_{CE} \approx 6,6\%$. Wird nun das turbulent umströmte HLD_{turb} Modell als Vergleichsbasis herangezogen (rechte Spalte), stellen sich ähnliche Verhältnisse ein. Das Einsparpotenzial ist hier durch die identischen Flugzeuggewichte etwas geringer (10,8 bzw. 10%), die Differenz in der Effizienzvorhersage mit $\Delta_{CE} \approx 8\%$ dagegen höher.

3.3. Einfluss unterschiedlicher Strategien bei der Kraftstoffplanung

Im Betrieb von Flugzeugen mit Hybridlaminarhaltung stehen nun mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, die Laminaritätsdegradation durch Wolken und den damit verbundenen und zeitlich begrenzten Mehrverbrauch in der Betankungsplanung zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Einflüsse von sechs Strategien auf das Einsparpotenzial sowie den Verbrauch von Reservekraftstoffen untersucht.

3.3.1. Untersuchte Strategien

3.3.1.1. Turbulente Planung

Bei der turbulenten Planung (TP) wird für einen bevorstehenden Flug die Kerosinmenge getankt, die das HLFC-Flugzeug benötigen würde, wenn die Laminarhaltung für die Dauer des gesamten Fluges aussetzt. Dieser Fall repräsentiert eine äußerst konservative Planung, da weder in GASP, LEFT oder der vorliegenden TIC-Analyse eine Wolkenverweilzeit von 100% gemessen bzw. ermittelt wurde.

3.3.1.2. Laminare Planung

Die laminare Planung (LP) fungiert als Gegenstück zur TP. Jegliche Degradation durch Wolkenbegegnungen oder andere Ereignisse werden in der Abschätzung des Kraftstoffbedarfs vernachlässigt. Die getankte Kraftstoffmenge ist bei dieser Strategie die geringste, wodurch das Einsparpotenzial durch das geringe Kerosingewicht das höchste ist. Die LP ist vergleichsweise riskant, da der getankte Missionskraftstoff (ohne Reserven) je nach Wolkenaufkommen bereits vor Landung aufgebraucht sein

kann, sodass auf Reserven zurückgegriffen werden muss.

3.3.1.3. Knockdown Planung

Der erste Ansatz zur Berücksichtigung der Degradation wird über die sog. Knockdown Planung (S_{KD}) untersucht. Dabei wird der Gesamtdurchschnitt der Wolkenverweilzeit als Abschlags- bzw. Interpolationswert zwischen der turbulenten und laminaren Planung genutzt. In dieser Analyse entspräche das dem Mittelwert von 10,1%. BILD 11 illustriert das Vorgehen.

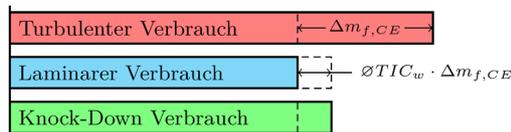


BILD 11. Vorgehen bei der Knockdown Planung

Verbraucht ein Flugzeug auf einer vorgegebenen Route beispielsweise 50t Kraftstoff, wenn die Umströmung durchgängig turbulent ist, und 45t Kerosin, wenn die Hybridlaminarhaltung über den gesamten Flug voll funktionsfähig ist, wird die zu betankende Menge wie folgt berechnet:

$$(13) \quad m_{\text{fuel}} = 45t + 0,101(50t - 45t) = 45,5t$$

3.3.1.4. Planung mit unterschiedlichen statistische Abdeckungsgraden

Auf Basis der ausführlichen Statistiken der TIC-Analyse aus Kapitel 2 ist es möglich, einen für den bevorstehenden Flug spezifischeren Abschlagsfaktor in der Kraftstoffplanung zu wählen. Der Grundgedanke liegt hier in der Erkenntnis, dass Wolkenbegegnungen eine hohe Variabilität aufzeigen und der Verlust an Einsparpotenzial durch eine passendere Betankungsstrategie reduziert werden kann, während Risiken bezüglich des Verbrauchs von Reservekraftstoffen verringert werden können. Dabei wird für jeden bevorstehenden Flug anhand der kumulierten und relativen Häufigkeitsverteilung der jeweiligen regions- und flughöhenspezifischen TIC-Statistik ermittelt, mit welcher Wolkenverweilzeit zu rechnen ist. Es wurden drei Abdeckungsgrade definiert: $S_{50\%}$, $S_{90\%}$ und $S_{99\%}$. Mit ihnen ist es möglich, einen zu TIC-Wert zu finden, der 50%, 90% oder 99% aller untersuchten Wolkenverweilzeiten abdeckt. Je höher dieser Abdeckungsgrad, desto konservativer ist die Planung. BILD 12 illustriert das Vorgehen exemplarisch.

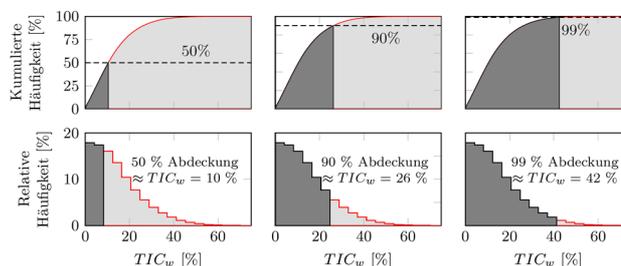


BILD 12. Ermittlung der Abschlagsfaktoren für Flüge zwischen Nordamerika und Europa auf FL350

3.3.2. Ergebnisse

Tabelle 2 zeigt die mittlere Kraftstoffersparnis bei unterschiedlichen Betankungsstrategien des HLFC-Flugzeugs (Analysemodell HLD_{real}) im Vergleich zur Baseline als Referenz. Während turbulente und laminare Planung mit

10,7 und 12,1% die Unter- und Obergrenzen des Einsparpotenzials bilden, zeigen die Strategien mit Abschlagsfaktoren Ersparnisse zwischen 11,6 und 12,1%. Insbesondere S_{KD} , $S_{50\%}$ und $S_{90\%}$ liegen in dieser Analyse sehr nah an der maximal möglichen Ersparnis.

Tabelle 2. Ergebnisse der untersuchten Strategien zur Kraftstoffplanung

Strategie	TP	LP	S_{KD}	$S_{50\%}$	$S_{90\%}$	$S_{99\%}$
Kraftstoffersparnis [%]	10,7	12,1	12	12,1	11,9	11,6

Für eine gesamtheitliche Bewertung der untersuchten Strategien muss auch das dem Einsparpotenzial gegenüberstehende Risiko berücksichtigt werden. Dazu wurde ein Softwaretool zur Reservekraftstoffplanung entwickelt, mit dem nach gültigen Regeln der EU-OPS die notwendigen Mengen des gesetzlich vorgeschriebenen Contingency und Alternate Fuels, des Final Reserve Fuels sowie des Taxi Fuels ermittelt werden. Damit ist es möglich, im Anschluss einer TCM Simulation, den Anteil der verbrannten Reservekraftstoffe zu ermitteln. BILD 13 zeigt Boxplots der knapp 40000 untersuchten Flüge für alle untersuchten Strategien. Der grüne Bereich des Graphen repräsentiert die Fälle, in denen sich bei der Landung noch das gesamte Contingency Fuel sowie ein Teil des Missionskraftstoffes in den Tanks befinden. Im weißen Bereich ist der Missionskraftstoff aufgebraucht und das Contingency Fuel (CF) teilverbraucht. Datenpunkte im roten Bereich repräsentieren Fälle, bei denen das gesamte CF bereits vor der Landung aufgebraucht wurde und die weiteren, dafür nicht vorgesehenen Reservekraftstoffanteile, wie das Alternate oder Final Reserve Fuel, teilverbraucht werden.

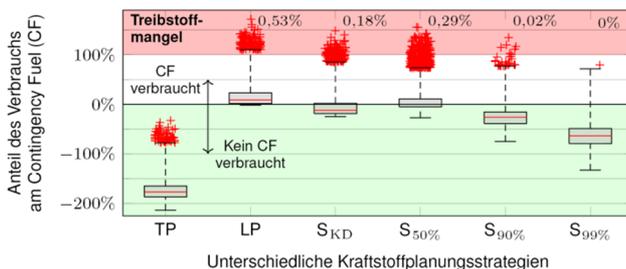


BILD 13. Boxplots des Contingency Fuel Verbrauchs unterschiedlicher Kraftstoffplanungsstrategien

Die Planung mit turbulenter Annahme TP führt in keinem Fall zum Teil- oder Komplettverbrauch des CF, da hier grundsätzlich zu viel getankt wird. Bei der laminaren Planung hingegen gibt es nahezu keinen Flug, bei dem das CF unberührt geblieben ist. Bei etwa 0,5% der Fälle kam es sogar zum vollständigen Verbrauch. Das kann dazu führen, dass ein Zwischenstopp zur Wiederbetankung notwendig wäre, was für die dauerhafte Durchsetzung der HLFC-Technologie seitens der Fluggesellschaften kritisch ist [10]. Ähnliche Größenordnungen sind bei der S_{KD} und $S_{50\%}$ Strategie zu erkennen. Erst die $S_{90\%}$ und $S_{99\%}$ Strategien zeigen deutlich weniger bzw. keine Flüge mit komplettem CF Verbrauch.

Insgesamt erweist sich die turbulente Planung für Flugzeuge mit HLFC als nicht optimal. Sie gilt zwar als die sicherste, da sie kein Contingency Fuel aufbraucht, zeigt jedoch aufgrund des erhöhten Kraftstoffgewichts die auch geringste mittlere Ersparnis. Auch die Betankung unter der Annahme einer volllaminaren Strömung während des gesamten Reiseflugs wird bei HLFC Flugzeugen nicht

empfohlen. Die Berücksichtigung von Wolken mit Hilfe des Gesamtmittelwertes der TIC (S_{KD}) zeigt ein ähnlich gutes Einsparpotenzial wie die volllaminare Planung und ist gleichzeitig weniger risikobehaftet. Die $S_{50\%}$ Strategie führt gegenüber S_{KD} im Mittel weder zu einer besseren Kraftstoffeffizienz, noch zu einer Reduzierung des Risikos eines vollständig verbrannten Contingency Fuels. Im direkten Vergleich von S_{KD} , $S_{90\%}$ und $S_{99\%}$, spielt die grundsätzliche Risikobereitschaft der betreibenden Fluggesellschaft die entscheidende Rolle.

4. FLUGROUTENOPTIMIERUNG

In diesem Kapitel werden laterale Flugroutenvariationen zur Verminderung von Wolkenbegegnungen als mögliche Maßnahme untersucht, um dem Einsparpotenzialverlust durch die Laminaritätsdegradation entgegenzuwirken. Als zu optimierende Zielgröße im TOM werden dabei die COC pro Flug gewählt. Da diese auch von der geflogenen Flugzeit und -strecke abhängen, ist es sinnvoll, zunächst einige Grundüberlegungen bezüglich des Einflusses der Wolkenposition und -ausdehnung auf die Sensitivität der Optimierung aufzustellen.

Bei einer durch O und D definierten Großkreistrajektorie⁷ und einem ungünstig liegenden Wolkenfeld mit konstantem Bedeckungsgrad (BILD 14 oben) würden potenzielle Ausweichrouten zu keiner kompensierenden Verringerung der TIC führen. Flüge auf diesen Routen würden demnach eher zu einem erhöhten Kraftstoffbedarf sowie einer längeren Flugzeit und damit höheren Kosten führen. Verringert sich der Wolkenbedeckungsgrad orthogonal zum Flugweg (BILD 14

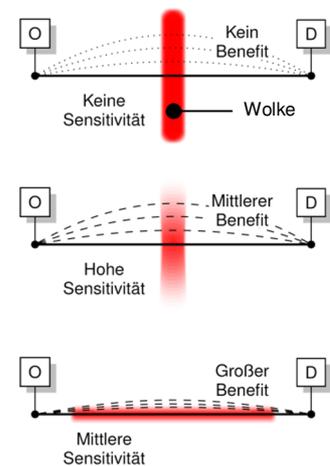


BILD 14. Theoretische Grenzfälle der Position und Ausdehnung von Wolken

mitte), ist es möglich, dass Abweichungen von der Großkreistrajektorie zu einer COC Reduktion führen. Entscheidend dabei ist das Verhältnis zwischen eingesparten Kraftstoffkosten infolge der verringerten Laminaritätsdegradation zu den zusätzlichen Kosten durch den Umweg. Der vielversprechendste Fall wäre eine um die Großkreistrajektorie befindliche Wolke mit geringer lateraler Ausdehnung (BILD 14 unten). Ein geringer Umweg würde bereits zu einer erheblichen TIC Reduktion führen, sodass in solchen Fällen die größten COC Einsparungen zu erwarten sind.

4.1. Sensitivitätsanalyse

Aufgrund der Kerosinpreisabhängigkeit der nach COC zu optimierenden Trajektorien wurde eine Sensitivitätsanalyse mit fünf Szenarien von 25 bis 400% ($P_{f,25\%} \dots P_{f,400\%}$) des Kerosinpreises vom Sommer 2016 ($\approx 0,23$ US\$/kg) [26] durchgeführt. BILD 14 zeigt die Großkreis- sowie die

⁷ O: Origin, D: Destination

optimierten Trajektorien für einen exemplarischen transatlantischen Flug.

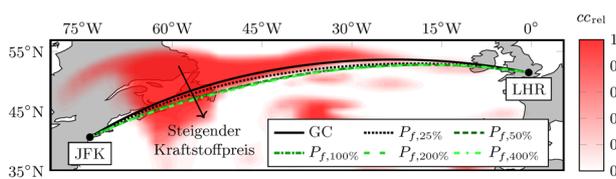


BILD 15. COC optimierte Trajektorien für einen Flug von JFK nach LHR am 11.12.2014 um 24 Uhr (UTC) auf FL350

Mit steigendem Kraftstoffpreis vergrößert sich der Umweg der optimierten Trajektorien, in diesem Fall in südliche Richtung. Die gegenüber der Großkreistrajektorie zusätzlich zurückgelegte Strecke reicht dabei von 0,12% bis 0,24%. Die ursprünglich hohe Wolkenverweildauer von 50,7% konnte dabei auf bis zu 24% verringert werden.

Der Einfluss der wolkenausweichenden Streckenführung auf die COC ist in BILD 16 dargestellt. Für jedes Preisszenario zeigen die grauen Balken die anfallenden Kosten pro Flug auf der Großkreistrajektorie, während die grün schraffierten den Flug auf der optimierten Trajektorie repräsentieren. Zusätzlich ist der Kraftstoffkostenanteil durch den dunkel hinterlegten Bereich in jedem Balken zu sehen. Dieser reicht von nahezu vernachlässigbaren 6% für den günstigsten Kerosinpreis bis hin zu knapp 50% im höchsten Preisszenario.

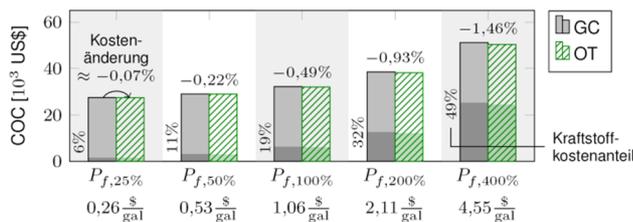


BILD 16. COC der Großkreis- (GC) und Optimaltrajektorien (OT) für betrachtete Kerosinpreise

Durch den vergleichsweise kleinen Umweg und den geringen Kraftstoffkostenanteil bei $P_{f,25\%}$ führt ein Flug auf der Optimaltrajektorie nur zu einer minimal besseren Kostenbilanz. Mit höherem Kerosinpreis steigt auch die insgesamt zu erwartende COC Einsparung, die bei $P_{f,400\%}$ ca. 1,5% erreicht. Erwähnenswert ist hierbei, dass bei fast allen Szenarien der prozentuale Anteil der reinen Kerosineinsparung nahezu identisch ist (ca. 3,5%). Die steigende Gesamteinsparung lässt sich somit auf den steigenden Kraftstoffkostenanteil zurückführen.

4.2. Globale Analyse und Bewertung der Wolkenvermeidungsstrategien

Um den Nutzen wolkenausweichender Streckenführungen in einem globalen Kontext bewerten zu können, wurde die Routenoptimierung mit Hilfe unterschiedlicher Atmosphärendaten auf verschiedenen Strecken durchgeführt. Um die durchaus zeitintensive Optimierung sinnvoll zu begrenzen, beschränkt sich die globale Betrachtung auf fünf Routen je Regionenpaar sowie den fünf Tagen mit höchster Wolkenverweildauer. Die Auswahl dieser ca. 200 Flüge resultiert hinsichtlich der Effizienzbewertung von Ausweichflügen in einer *best-case-Betrachtung*, da es sich für die betrachteten Routen um Flüge mit höchstem Einsparpotenzial handelt. Dabei wurden mit $P_{f,100\%}$ und $P_{f,400\%}$ zwei Preisszenarien zugrunde gelegt, um auch hier unter-

schiedliche Kraftstoffkostenszenarien zu berücksichtigen.

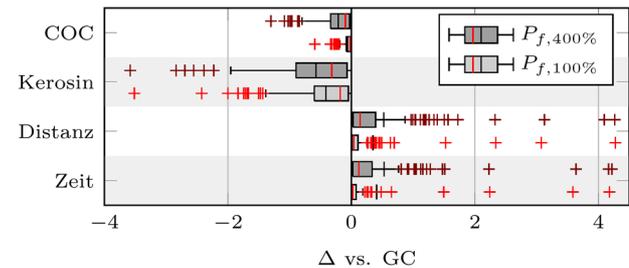


BILD 17. Relative Änderung der Parameter COC, Kerosin, Flugstrecke und -zeit auf den optimierten Trajektorien gegenüber der Großkreistrajektorie. Roter vertikaler Strich: Median

Wie BILD 17 zeigt, führen Flüge auf einer COC-optimierten Trajektorie mit dem heutigen Kraftstoffpreis im Mittel zu einer zeitlichen Verlängerung von $\Delta t(P_{f,100\%}) = 0,41\%$. Legt man den höheren Kerosinpreis zugrunde, beträgt die zeitliche Verlängerung $\Delta t(P_{f,400\%}) = 0,52\%$. Die Kosteneinsparung auf der Optimaltrajektorie beträgt im Mittel $\Delta \text{COC}(P_{f,100\%}) = -0,41\%$ bzw. $\Delta \text{COC}(P_{f,400\%}) = -0,57\%$.

Es lässt sich abschließend sagen, dass Flüge auf COC-optimierten Trajektorien, die mit dem aktuellen Kraftstoffpreis generiert wurden, nur in sehr seltenen Fällen zu einer nennenswerten Einsparung an COC führen. So weisen über 60% der betrachteten Flüge eine vernachlässigbare COC-Reduzierung von 0,05% auf. Da es sich in der globalen Analyse um eine *best-case-Betrachtung* handelte, ist zu erwarten, dass die insgesamt auftretende und reale Einsparung durch das Ausweichen von Wolken im Schnitt nochmals deutlich geringer ist. Erst wenn sich der Kraftstoffpreis sich auf das Vierfache des aktuellen Preises erhöht, sind durch die alternative Streckenführung Einsparungen zu erwarten, die für betreibende Fluggesellschaften einen nennenswerten ökonomischen Vorteil bieten.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Einfluss von Wolken auf die HLFC-Technologie zu analysieren und diesen in einem Gesamtkontext zu bewerten. Als Grundlage dazu wurde in einer ersten Analyse von über 2 Mio. Flügen die Wolkenverweildauer TIC (Time in Cloud) thematisiert. Die mit Hilfe des globalen Streckennetzwerks der Airbus A330 und Atmosphärendaten des ECMWF berechnete mittlere TIC betrug ca. 10,1% und wies in ihrer Häufigkeitsverteilung eine starke Übereinstimmung mit den Ergebnissen des GASP der NASA auf. Weiterhin zeigte sich, dass in den meisten Gebieten der Erde größere Flughöhen zu geringeren Wolkenverweildauern führen. Dieser Effekt intensivierte sich insbesondere dort, wo sich die untersuchten Fluglevel außerhalb der Troposphäre befanden.

Auf Basis zweier für diese Arbeit entworfener Flugzeugentwürfe wurden in zwei weiteren Analysen ca. 40000 Flüge auf den Mehrwert der Hybridlaminarhaltung analysiert. Unter idealisierten operationellen Bedingungen konnte eine Kraftstoffeinsparung des Flugzeugmodells mit HLFC von knapp 13 % gegenüber dem Referenzmodell ohne HLFC erreicht werden. Floss die Berücksichtigung der Wolkendegradation in die Bewertung mit ein, verringerte sich die Ersparnis um etwa einen Prozent-

punkt auf 12 %. In einer zweiten Analyse wurde der zusätzliche Einfluss unterschiedlicher Kraftstoffplanungsstrategien zur Wolkendegradationsberücksichtigung untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine Vernachlässigung von Wolken bei der Betankung von HLFC-Flugzeugen in 96,5 % der Fälle zu einem partiellen oder kompletten Verbrauch des Contingency Fuels führt. Eine für HLFC-Flugzeuge geeignete Kraftstoffplanungsstrategie konnte unter Zuhilfenahme der zuvor erarbeiteten Wolkenspezifische entwickelt werden, indem die flughöhen- und regionsspezifische TIC zur Bestimmung des zusätzlich zu tankenden Reservekraftstoffes herangezogen wurde. Dabei konnte eine nahezu gleichbleibende Kraftstoffersparnis erreicht werden, während die Reservekraftstoffe in keinem der untersuchten Flüge komplett aufgebraucht wurden.

Abschließend wurde anhand mehrerer Analysen mit einem Trajektorienoptimierer untersucht, inwieweit sich eine laterale Routenoptimierung eignet, um dem Verlust an Einsparpotenzial der HLFC-Technologie im Rahmen einer Betriebskostenbewertung entgegenzuwirken. Bei Untersuchungen exemplarischer Routen zeigten Flüge auf wolkenvermeidenden Trajektorien gegenüber den jeweiligen Orthodromen Kerosineinsparungen von bis zu 3 %, die - je nach zugrunde gelegtem Kraftstoffpreis - in einer COC-Ersparnis von bis zu 1,5 % resultierten. Eine weitere globale Untersuchung von ca. 200 Flügen bestätigte, dass alternative Streckenführungen zur lateralen Wolkenvermeidung nur in seltenen Fällen (ca. 2 %) zu einem nennenswerten Vorteil ($\Delta\text{COC} > 1\%$, $\Delta m_f > 2,5\%$) führen.

Um die Technologiebewertung auf Gesamtsystemebene zu vervollständigen, können in weiterführenden Studien Systemausfälle der HLFC-Komponenten berücksichtigt werden und in Verbindung mit den entwickelten Kraftstoffplanungsstrategien in neuen Streckenführungskonzepten oder -regeln ähnlich der ETOPS münden. Eine auf realistischen meteorologischen und operationellen Betriebsbedingungen basierende Vorhersage über das Einsparpotenzial der Hybridlaminarhaltung - vor allem auf Flottenniveau - sollte bestehende Unsicherheiten seitens der Flugzeugbetreiber beachtlich minimieren und einen positiven Beitrag zur Durchsetzung der Hybridlaminarhaltung leisten.

SONSTIGES

Die Autoren bedanken sich für die Zusammenarbeit bei ihren Kollegen des Instituts für Luft- und Raumfahrt der RWTH Aachen. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Einflussanalyse von Wolken und der Effizienzbewertung entstammen dem Clean Sky 2 Projekt ECHO.

REFERENZEN

- [1] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION: *Annual Review 2016*. 2016
- [2] ACARE: *Flightpath 2050 : Europes Vision for Aviation*. 2011
- [3] MADDALON, D. V. ; WAGNER, R. D.: *Operational Considerations for Laminar Flow Aircraft*. In: *Laminar Flow Aircraft Certification* (1986), S. 247–268
- [4] WICKE, K.: *Bewertung der natürlichen Laminarhaltung an Verkehrsflugzeugen im operationellen Umfeld*. Hamburg, Germany, Technische Universität Hamburg, Institut für Lufttransportsysteme. Dissertation. 2016
- [5] YOUNG, T. M.: *Investigations into the operational effectiveness of hybrid laminar flow control aircraft*. Cranfield, Cranfield University, UK, School of Engineering. Dissertation. 2002
- [6] DAVIS, Richard E. ; MADDALON, Dal V. ; WAGNER, Richard D. ; FISHER, David F. ; YOUNG, Ronald: *Evaluation of cloud detection instruments and performance of laminar-flow leading-edge test articles during nasa leading-edge flight-test program*. Langley Research Center, Hampton, VA, United States, 1989
- [7] JASPERSON, William H. ; NASTROM, Gregory D. ; DAVIS, Richard E. ; HOLDEMAN, James D.: *GASP Cloud Encounter Statistics - Implications for Laminar Flow Control Flight*. In: *Journal of Aircraft* 21 (1984), Nr. 11, S. 851–857
- [8] JASPERSON, William H. ; NASTROM, Gregory D. ; DAVIS, Richard E. ; HOLDEMAN, James D.: *Variability of Cloudiness at Airline Cruise Altitudes from GASP Measurements*. In: *Journal of Climate and Applied Meteorology* 24 (1985), Nr. 1, S. 74–82
- [9] SCHRAUF, G.: *Status and perspectives of laminar flow*. In: *The Aeronautical Journal* 109 (2005), Nr. 1102, S. 639–644
- [10] MEIFARTH, K. U. (Hrsg.); HEINRICH, S. (Hrsg.): *The environment for aircraft with laminar flow technology within airline service*, 1992 (DGLR-Symposium)
- [11] HALL, G. R.: *On the mechanics of transition produced by particles passing through an initially laminar boundary layer and the estimated effect on the LFC performance of the X-21 aircraft*. Washington D.C., United States, 1964
- [12] FISCHER, David F. ; FISCHER, Michael C.: *Development flight tests of JetStar LFC leading-edge flight test experiment*. NASA Dryden Flight Research Facility, Edwards, CA, United States, 1987
- [13] DEE, D. P. ; UPPALA, S. M. ; SIMMONS, A. J. ; BERRISFORD, Paul ; POLI, P. ; KOBAYASHI, S. ; ANDRAE, U. ; BALMASEDA, M. A. ; BALSAMO, G. ; BAUER, P.: *The ERA-Interim reanalysis : Configuration and performance of the data assimilation system*. In: *Quarterly Journal of the royal meteorological society* 137 (2011), Nr. 656, S. 553–597
- [14] KOCH, Alexander ; LÜHRS, Benjamin ; DAHLMANN, Katrin ; LINKE, Florian ; GREWE, Volker ; LITZ, Markus ; PLOHR, Martin ; NAGEL, Björn ; GOLLNICK, Volker ; SCHUMANN, Ulrich: *Climate impact assessment of varying cruise flight altitudes applying the CATS simulation approach* (3rd International Conference of the European Aerospace Societies (CEAS)). Venedig, Italien, 26.-28.10.2011
- [15] LÜHRS, Benjamin ; LINKE, Florian ; GOLLNICK, Volker: *Erweiterung eines Trajektorienrechners zur Nutzung meteorologischer Daten für die Optimierung von Flugzeugtrajektorien* (63. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2014 (DLRK)). Augsburg, Deutschland, 16.-18.09.2014
- [16] NIKLAß, M. ; GREWE, V. ; GHOSH, R. ; LÜHRS, B. ; LINKE, F. ; SCHMITT, A. R. ; LUCKOVA, T. ; GOLLNICK,

V.: *A Methodology to Assess the Cost-Benefit Potentials of Climate Optimal Trajectories* (63. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2014 (DLRK)). Augsburg, Deutschland, 16.-18.09.2014

- [17] WICKE, K. ; LINKE, F. ; GOLLNICK, V. ; KRUSE, M.: *Insect Contamination Impact on Operational and Economic Effectiveness of Natural-Laminar-Flow Aircraft*. In: *Journal of Aircraft* 53 (2016), Nr. 1, S. 158–167
- [18] ALLIGIER, R. ; GIANAZZA, D. ; DURAND, N.: *Energy rate prediction using an equivalent thrust setting profile* (5th International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT)). Berkeley, California, 22.-25.05.2012
- [19] LÜHRS, Benjamin ; NIKLAß, Malte ; FRÖMMING, Christine ; GREWE, Volker ; GOLLNICK, Volker: *Cost-benefit assessment of 2d and 3d climate and weather optimized trajectories* (16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO)). Washington D.C., United States, 13.-17.06.2016
- [20] LIEBECK, Robert H. ; ANDRASTEK, Donald A. ; CHAU, Johnny ; GIRVIN, Raquel ; LYON, Roger ; RAWDON, Blaine K. ; SCOTT, Paul W. ; WRIGHT, Robert A.: *Advanced subsonic airplane design and economic studies* (1995)
- [21] WÄCHTER, A. ; BIEGLER, L. T.: *On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming*. In: *Mathematical programming* 106 (2006), Nr. 1, S. 25–57
- [22] RISSE, K. ; STUMPF, E.: *Conceptual aircraft design with hybrid laminar flow control*. In: *CEAS Aeronautical Journal* 5 (2014), Nr. 3, S. 333–343
- [23] RISSE, K.: *Vorentwurf von Flugzeugen mit hybrider laminarer Strömungskontrolle*. Aachen, RWTH, Lehrstuhl und Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme. Dissertation. 2016
- [24] WICKE, K. ; LINKE, F. ; LAU, A. ; RISSE, K. ; POHYA, A. A. ; LÜHRS, B. ; SWAID, M.: *Impact of Cloud Encounter Mitigation Procedures on Operational and Economic Effectiveness of HLFC Aircraft* (AIAA Science and Technology Forum and Exposition (SciTech 2017)). Grapevine, Texas, United States, 09.-13.01.2017
- [25] POHYA, A. A.: *Bewertung von Flugzeugen mit Hybridlaminarhaltung unter Berücksichtigung von Wolkeninflüssen*. Hamburg, Germany, Technische Universität Hamburg, Institut für Lufttransportsysteme. Masterarbeit. 2017
- [26] US DEPARTMENT OF ENERGY: *Energy Information Administration : Independent Statistics & Analysis*. URL www.eia.gov – Überprüfungsdatum 2016-08-08