

ENTWICKLUNG UND EVALUIERUNG EINES ALGORITHMUS ZUR KOSTENEFFIZIENTEN DURCHFÜHRUNG VON FLÜGEN MIT ZEITBESCHRÄNKUNGEN

S.M. Sprengart,

TU Darmstadt, Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik, Otto-Berndt-Straße 2,
64287 Darmstadt, Deutschland

Zusammenfassung

Das Luftverkehrsaufkommen wird in den nächsten Jahrzehnten deutlich ansteigen. Heutige Air Traffic Management (ATM) Prinzipien werden nicht mehr in der Lage sein, die erhöhten Anforderungen zu erfüllen; die Kapazitätsgrenze des Luftraums wird bald erreicht sein. Trajektorie basierte Operationen (TBO), räumlich und zeitlich definierte Trajektorien, sind Gegenstand aktueller Forschung um diesem Problem entgegenzuwirken. Durch das Ersetzen herkömmlicher Trajektorien durch TBO werden Flugbewegungen vorhersagbarer und ermöglichen neue Optimierungsansätze.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Algorithmus zur Erstellung von kostenoptimierten Trajektorien mit Zeitbeschränkung (Required Time of Arrival (RTA)) entwickelt. Aufbauend auf einer Analyse zukünftiger Luftraumkonzepte und heutigen Methoden der Generierung von Trajektorien werden Anforderungen an den zu entwickelnden Algorithmus formuliert, welche die Konzipierungsphase leiten. Unterstützt durch das Base of Aircraft Data (BADA) Performance Model von EUROCONTROL werden der konzipierte Algorithmus und eine Flugsimulation in C++ implementiert und getestet.

Der entwickelte Algorithmus verwendet den A* Suchalgorithmus zur Erstellung einer kostenoptimierten Trajektorie unter Zeitbeschränkungen, indem das Höhen- und Geschwindigkeitsprofil der Trajektorie variiert wird. Eine Kostenfunktion zur Berechnung von Trajektorie-spezifischen Kosten wird vorgestellt. Erste Tests zeigen, dass der entwickelte Algorithmus in der Lage ist, unter der Einhaltung mehrerer RTA beschränkter Wegpunkte eine Trajektorie zu generieren. Im Vergleich mit einer Referenztrajektorie wurden Kosteneinsparungen von knapp 2% erreicht.

ABKÜRZUNGEN

ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management
BADA	Base of Aircraft Data
GFS	Global Forecast System
ISA	Internationale Standard Atmosphäre
NextGen	Next Generation Air Transportation System
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
RTA	Required Time of Arrival
SESAR	Single European Sky ATM Research Programme
TBO	Trajektorie basierte Operationen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1. EINLEITUNG

Der in dieser Veröffentlichung behandelte Inhalt ist eine Zusammenfassung der Master Thesis des Autors. In den folgenden Abschnitten wird die Entwicklung eines Algorithmus zur kostenoptimierten, zeitbeschränkter Flugroutengenerierung beschrieben, sowie die Ergebnisse einer daran angeschlossenen Evaluation. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde an verschiedenen Stellen auf eine ausführlichere Beschreibung verzichtet, es wird hierbei auf die im Zusammenhang stehenden Arbeiten [1, 2] verwiesen. Weiterführende Arbeiten finden sich unter [3, 4].

1.1. Motivation

Im Laufe der kommenden Jahrzehnte ist ein deutlicher Anstieg des globalen Luftverkehrs prognostiziert. Schätzungen belaufen sich zuweilen auf einen Anstieg der Flugbewegungen über Europa von 73% im Vergleich zwischen 9,2 Millionen Flugbewegungen im Jahr 2005 auf bis zu 15,9 Millionen Flugbewegungen im Jahr 2030 [5]. Dieser Anstieg stellt das jetzige Luftverkehrssystem vor eine Herausforderung. Heutige Air Traffic Management (ATM) Prinzipien werden nicht mehr in der Lage sein die gesteigerten Anforderungen zufriedenstellend zu erfüllen. Die Kapazitätsgrenzen des heutigen Luftraumes werden bald erreicht sein, neue Ansätze zur Lösung dieses Problems sind erforderlich. [6] Mit diesem Ziel wurden verschiedene Forschungsinitiativen ins Leben gerufen. Auf Europäischer Seite wird im Rahmen des Single European Sky ATM Research Programme (SESAR) [5, 7] an zukünftigen operationellen Konzepten gearbeitet. Im Rahmen des Next Generation Air Transportation System (NextGen) werden in den Vereinigten Staaten durch die Federal Aviation Administration (FAA) ähnliche Ziele verfolgt [8].

Eine der zentralen Lösungsansätze zur Bewältigung der zukünftigen Herausforderungen ist die Einführung Trajektorie basierter Operationen (TBO), räumlich und zeitlich fest definierte Flugtrajektorien [5]. Durch TBO wird eine bessere Vorhersagbarkeit von Flugbewegungen erreicht, was einerseits zu einer erhöhten Kapazität des Luftraums durch Planungssicherheit führt. Zum anderen werden neue Optimierungsansätze durch freiere

Gestaltung von Trajektorien ermöglicht. Um dieses Potential nutzen zu können sind neue technologische Entwicklungen notwendig, wozu auch der in dieser Arbeit entwickelte Algorithmus zählt.

1.2. Ziel

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Evaluation eines Algorithmus zur Generierung zeitbeschränkter Trajektorien. Dieser soll in der Lage sein unter Einbeziehung aktueller Wetterdaten und der Flugleistung eine kostenoptimale Lösung entlang eines vorgegebenen Flugpfades zu finden.

1.3. Vorgehen

Der angewandte Entwicklungsprozess orientiert sich an dem in der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) Norm 2221 [9] beschriebenen Prozess. Zunächst wird der Nutzungskontext des zu entwickelnden Algorithmus untersucht, eine Einführung in die Grundlagen der TBO wird gegeben. Darauf folgend werden Anforderungen, Einschränkungen und Annahmen für die Entwicklung definiert. Das daraus entwickelte Konzept wird anschließend implementiert und evaluiert. Die gewonnenen Ergebnisse werden genutzt um den Erfüllungsgrad der Anforderungen zu erfassen. Abschließend wird der durchlaufene Prozess zusammengefasst und mögliche zukünftige Entwicklungen umrissen.

2. GRUNDLAGEN

Im Folgenden wird eine kurze Übersicht über das Konzept der TBO gegeben, welches für die Entwicklung des Algorithmus betrachtet wird.

2.1. Trajektorie basierte Operationen

Unter dem Begriff der Trajektorie basierten Operationen wird die Verhandlung und Durchführung von zeitlich und räumlich definierten Flugtrajektorien verstanden. Trajektorien werden individuell durch Luftverkehrsteilnehmer erstellt und zwischen den verschiedenen Akteuren (bspw. Flughägen, andere Airlines, oder der Luftverkehrskontrolle) verhandelt. Als Resultat dieser Verhandlungen steht eine Trajektorie zu deren präziser Durchführung sich der Luftverkehrsteilnehmer verpflichtet. Im Gegenzug hierzu wird die fortwährende Freigabe und Unterstützung der Trajektorie durch Air Traffic Control (ATC) garantiert. [10, 11] Während die räumliche Definition über eine Reihe von Wegpunkten entlang des Flugpfades erfolgen kann, wird die zeitliche Definition über zeitliche Beschränkungen an Wegpunkten umgesetzt. Durch diese Beschränkungen kann ein Erreichen des Wegpunktes zu, vor, oder nach einer bestimmten Zeit festgelegt werden. Diese Zeitbeschränkungen werden als Required Time of Arrival (RTA) bezeichnet. [12]

3. ENTWICKLUNG

Die Konzeptentwicklung wird in unterschiedlichen Stufen durchgeführt. Zunächst werden Anforderungen und Einschränkungen an den Algorithmus definiert. Darauf folgend findet eine Identifikation der benötigten Funktionen, sowie Ein- und Ausgabeparameter, statt. Aus diesen werden einzelne Module abgeleitet, welche dann den gesamten Algorithmus zur kostenoptimalen Generierung zeitbeschränkter Trajektorien bilden.

3.1. Ableiten von Anforderungen und Einschränkungen

Die im Folgenden definierten Anforderungen leiten die Entwicklung des Konzeptes. Auf die Erfüllung dieser Anforderungen hin findet die abschließende Evaluation des Algorithmus statt. Darüber hinaus werden die, die Entwicklung des Algorithmus betreffenden, Annahmen und Einschränkungen definiert.

3.1.1. Anforderungen

Aus der vorhergehenden Analyse zukünftiger Luftverkehrskonzepte und bereits existierenden Algorithmen zur Generierung von Trajektorien wurden die in TAB 1 aufgelisteten Anforderungen abgeleitet.

TAB 1. Anforderungen an den zu entwickelnden Algorithmus.

ID	Beschreibung
R1	(Mehrere) RTA Beschränkungen müssen innerhalb der vorgegebenen zeitlichen Toleranz erreicht werden.
R2	Leistungsgrenzen des Flugzeugs und ATC Anweisungen dürfen nicht verletzt werden.
R3	Die entwickelte Lösung muss kostengünstiger als eine vergleichbare nicht optimierte Lösung sein.
R4	Aktuelle Wettervorhersagen müssen in die Generierung der Trajektorie einbezogen werden.

3.1.2. Einschränkungen und Annahmen

In TAB 2 aufgeführt sind die Annahmen und Einschränkungen, welche zum einen getroffen wurden um die Komplexität des Entwicklungsprozesses in dieser Stufe zu reduzieren, und zum anderen mögliche Lösungen nicht zu früh im Entwicklungsprozess auszuschließen.

TAB 2. Für den Entwicklungsprozess relevante Annahmen und Einschränkungen.

ID	Beschreibung
L1	Keine Beschränkungen hinsichtlich der Hardwareauswahl auf heutige Flughardware (bspw. CPU und Speicherkapazität).
L2	Es werden keine ATC Freigaben für Manöver benötigt, Verkehr ist nicht vorhanden.
L3	Aktuelle und präzise Wetterdaten sind dauerhaft verfügbar.
L4	Der Umfang der betrachteten Flugdynamik beschränkt sich auf die durch die Simulation bereitgestellten Parameter (siehe 3.5.3).

3.2. Definition der Funktionen

Aus den im vorgehenden Abschnitt festgelegten Anforderungen ergeben sich die unterschiedlichen Systemfunktionen, welche durch den Algorithmus zu erfüllen sind. Beeinflusst durch die Anforderungen R1-R2 wird die erste Funktion wie folgt definiert:

Generierung einer Trajektorie, welche in der Lage ist zeitbeschränkte Wegpunkte unter Berücksichtigung von ATC Beschränkungen und/oder Luftfahrzeugleistung in einer vorgegebenen Toleranz zu erreichen.

Nun ist das entwickelte System in der Lage eine Trajektorie zu generieren, die Kostenoptimalität ist jedoch noch nicht sichergestellt (R3). Hieraus ergibt sich die zweite erforderliche Funktion:

Evaluation der generierten Trajektorien hinsichtlich Gesamtkosten und Auswahl der günstigsten Lösung als Optimum.

Das Einbeziehen aktueller Wettervorhersagen (R4) wird hierbei als integraler Teil beider Funktionen betrachtet.

3.3. Ein- und Ausgabeparameter

Zur Erfüllung der zuvor definierten Funktionen werden durch den Algorithmus verschiedene Eingabeparameter benötigt. Aus diesen Eingangsgrößen wird eine passende Lösung generiert, welche dann an die automatische Flugsteuerung übergeben wird. Diese Ein- und Ausgabeparameter sind schematisch in BILD 1 dargestellt.

3.3.1. Eingabeparameter

Auf der Eingabeseite werden der aktuelle Flugzustand (aktuelle Position oder Performancedaten), und missionsrelevante Informationen (Flugplan, Ankunftszeiten, Wetterinformationen) benötigt. Zudem wird ein Set von Parametern zur Bewertung der Gesamtkosten einer generierten Lösung übergeben.

3.3.2. Ausgabeparameter

Die Ausgabe des Algorithmus ist eine Beschreibung des Zielflugpfades, welche an eine automatische Flugsteuerung übergeben wird. Hierbei wird, vom Startpunkt ausgehend, die Trajektorie mit Höhe, Kurs und Geschwindigkeit beschrieben. Zusätzlich ist ein Signal vorgesehen, welches ausgelöst wird, wenn keine gültige Lösung durch den Algorithmus gefunden wird.

3.4. Konzeptionelle Funktionsweise

Grundsätzlich kann das Generieren einer kostenoptimalen Trajektorie auf verschiedene Arten erfolgen. Eine Möglichkeit wäre, alle möglichen Trajektorien zwischen dem aktuellen Start- und Zielpunkt zu generieren, indem Höhe, Kurs und Geschwindigkeit des Luftfahrzeugs variiert werden. Obwohl eine global kostenoptimale Lösung so gefunden werden kann ist dieser Anwendungsfall für die Praxis aufgrund der erforderlichen Rechenleistung ungeeignet.

Aus diesem Grund wird eine gerichtete Suche bevorzugt. Diese erfolgt durch den Einsatz eines Pfadsuche Algorithmus. Ein solches Gesamtkonzept ist in BILD 1 schematisch dargestellt.

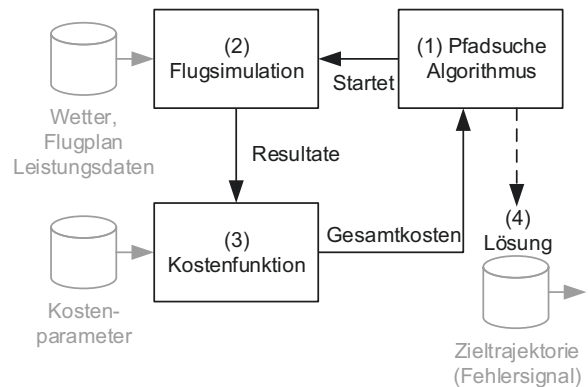


BILD 1. Schematische Darstellung des Gesamtkonzeptes.

Hierbei initiiert der Pfadsuche Algorithmus (1) die Simulation einzelner Flugsegmente. In diese Simulationen (2) werden Wetter- und Flugzeugleistungsdaten mit einbezogen. Ausgehend von den Resultaten der einzelnen Simulationsabschnitte werden abschnittsweise Kosten durch eine Kostenfunktion (3) ermittelt. Diese Gesamtkosten dienen wiederherum als Informationsgrundlage für den Pfadsuche Algorithmus, um unterschiedliche Lösungen gegeneinander zu gewichten. Dieser Prozess wird wiederholt bis eine gültige, kostenoptimale Lösung (4) gewonnen wird.

3.5. Modulbeschreibungen

Im Folgenden werden die in BILD 1 eingeführten Module eingehender beschrieben.

3.5.1. Suchalgorithmus

Als Pfadsuche Algorithmus wird der, auf dem Dijkstra-Algorithmus basierende, A* Algorithmus genutzt, ein Graphen-basierter Suchalgorithmus. Erstmals beschrieben wurde A* 1968 durch Hart, Nilsson et al. [13]. Dieser ursprünglich für die autonome Roboternavigation entwickelte Algorithmus findet heutzutage Anwendung in verschiedenen Systemen, wie beispielsweise Navigationsgeräten oder Computerspielen [14]. A* wird zur Gruppe der informierten Suchalgorithmen gezählt. Während Anfangs lediglich Start- und Zielknoten auf einem Graphen dem Algorithmus bekannt sind, findet während der Pfadsuche eine gerichtete Exploration des Graphens statt. Das Ziel ist hierbei den günstigsten¹ Pfad entlang des Graphen zu finden. Diese Exploration findet unter Zuhilfenahme einer Heuristik-Funktion statt, welche die günstigsten geschätzten Kosten ausgehend vom aktuellen Knoten ermittelt und somit eine gerichtete Exploration ermöglicht. [13] Neben der bereits erwähnten weiten Verbreitung und der damit verbundenen Verfügbarkeit von Dokumentationen, werden die Eigenschaften der Vollständigkeit, Optimalität und Geschwindigkeit als vorteilhaft für A* als Pfadsuche Algorithmus betrachtet [13]:

Vollständigkeit

Sofern eine Lösung existiert, wird diese gefunden.

Optimalität

Sollte eine Lösung gefunden werden ist garantiert, dass

¹ Günstig beschreibt hierbei die favorisierte Lösung für den geplanten Anwendungsfall und kann auch beispielsweise den schnellsten oder kürzesten Pfad bedeuten.

keine günstigere Lösung existiert. Dies ist gültig unter der Voraussetzung, dass eine gültige Heuristik verwendet wird, welche die Kosten nicht überschätzt.

Geschwindigkeit

Verglichen mit dem Dijkstra-Algorithmus, auf welchem A* aufbaut, ist A* mindestens genauso schnell oder schneller unter der Verwendung einer geeigneten Heuristik².

3.5.2. Netzgenerator

Nicht dargestellt in BILD 1 ist der Netzgenerator. Dieser wird genutzt um eine durchsuchbare Struktur für den Algorithmus zu generieren, den Graphen. Ein solcher Graph ist eine abstrahierte Darstellung der Umgebung in Form von Knoten und Kanten. Kanten sind hierbei die Verbindungen zwischen Knoten, während an Knoten die Möglichkeit besteht auf eine andere Kante zu wechseln. Die Bewegungen innerhalb dieses Netzwerks, entlang einer Kante, sind mit Kosten verbunden, den so genannten Kantengewichten.

Während die Abstrahierung eines Straßennetzwerks noch vergleichsweise einfach erfolgen kann (Straßen sind Kanten, Kreuzungen werden als Knoten abgebildet), stellt die Abstrahierung des Luftraumes entlang einer Flugroute ein komplexeres Problem dar. Hierbei wird zwischen zwei Faktoren abgewogen: zum einen muss der Graph die möglichen Freiheitsgrade eines Luftfahrzeugs abbilden können um die Trajektoriengenerierung nicht zu sehr einzuschränken. Zum anderen darf der erstellte Graph nicht zu hochauflösend sein, da sonst die Rechenzeit während der Pfadsuche negativ beeinträchtigt wird. Unter der Annahme dass keine lateralen Änderungen des geplanten Flugpfades vorgenommen werden, findet folgender Abstrahierungsprozess statt [1, 2]:

1. Über jedem Wegpunkt des Flugplans werden Knoten mit konstantem vertikalen Abstand platziert.
2. Knoten auf gleicher Höhe werden mit in Flugrichtung gerichteten Kanten verbunden. Zusätzlich werden nachfolgende Knoten auf höheren und tieferen Höhen mit Kanten verbunden.
3. Knoten und Kanten über der maximalen Flughöhe des gewählten Luftfahrzeugs werden entfernt.
4. Knoten und Kanten unterhalb der Mindesthöhen und in gesperrten Bereichen werden entfernt.

Durch dieses Vorgehen ergibt sich ein Graph mit fester vertikaler Auflösung und variabler horizontaler Auflösung entlang des Flugpfades. Als Folge dessen kann die Trajektorie in Bereichen mit einer vergleichsweise hohen Dichte an Wegpunkten (bspw. Flughafennahbereich) freier gewählt werden als beispielsweise auf einem transatlantischen Segment mit geringerer Wegpunktdichte.

3.5.3. Flugsimulation

Als Flugsimulation wird eine auf der Base of Aircraft Data (BADA) Library von EUROCONTROL [15] aufgebaute Simulation verwendet. In der BADA Library 3 können nahezu 100% der Luftfahrzeugtypen im europäischen Luftraum als performance-basierte Flugmodelle abgebildet werden [16].

² Bisher konnte noch keine geeignete Heuristik entwickelt werden, um diesen Vorteil nutzbar zu machen [1, 2].

3.5.4. Kostenfunktion

Die Gewichtung der Kanten im Suchgraph erfolgt über eine Kostenfunktion. Hierfür wird ein variables Set an Parametern verwendet, die sogenannten Kostenparameter. Diese Parameter beschreiben den Zusammenhang zwischen einzelnen Merkmalen einer simulierten Trajektorie und einem Kostenwert. Als Beispiel würde der Parameter Treibstoff die Relation zwischen verbrauchter Kerosinmenge (*kg*) und den entstehenden Treibstoffkosten (€) in der Einheit €/kg beschreiben. Diese Parameter können entweder statisch sein (Treibstoffkosten) oder dynamische Funktionen (Flugzeit). In TAB 3 ist eine Auswahl möglicher Parameter gelistet:

TAB 3. Mögliche Kostenparameter für die Kostenfunktion und beispielhafte korrespondierende Trajektorie Merkmale.

Parameter	Trajektorie Merkmal
Treibstoff	Verbrauchte Kerosinmenge entlang eines Segments.
Wartung	Belastung der Triebwerke (Schublevel), Wetter entlang der Route (Einfluss von Hagel, Vulkanasche).
Komfort	Turbulenzen entlang der Route, Anzahl/Intensität von Höhen- und Geschwindigkeitsänderungen.
Umwelt	Überflogene Regionen, Triebwerkseinstellungen, Flughöhe, Wetter.
Crew	Dienstzeit der Crew, Hotelkosten, Standby Planung.
Flugzeit	Anfallende Kosten im Falle einer Verspätung, Strafzahlungen, Kompensationszahlungen für Passagiere.
Netzwerk	Einzelne Trajektorieänderungen mit Einfluss auf das Netzwerk der Fluggesellschaft und Verbindungsflüge.
Andere	Sonstige missionsspezifische Kosten, beispielsweise Überfluggelühren.

Die für die Erstellung einer Trajektorie tatsächlich verwendeten Parameter können hierbei an das jeweilige Szenario angepasst werden. So wäre es beispielsweise denkbar, dass für einen reinen Frachtflug Pünktlichkeit und Treibstoffersparnis höher gewichtet werden als bei einem Charterflug bei welchem Komfort höher gewichtet wird. Ein vergleichbarer Ansatz für eine Kostenfunktion findet sich bei Rippel et al. [17]. Für eine weiterführende Betrachtung der Kostenfunktion wird an dieser Stelle auf [2] verwiesen.

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Parameter der Kostenfunktion sind Treibstoff und Flugzeit, welche mit einer dimensionslosen Kosteneinheit *C* von $0,4 C/kg$, sowie $0,24 C/s$ gewichtet werden.

3.6. Gesamtprozess

Die Generierung einer Trajektorie mit mehreren zeitbeschränkten Wegpunkten erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst wird der gesamte Flugplan in einzelne Teilflugpläne unterteilt, zwischen den einzelnen zeitbeschränkten Wegpunkten (RTA Wegpunkte). Im nächsten Schritt beginnt die eigentliche Pfadsuche.

Hierzu beginnt der Algorithmus am Startknoten und erkundet die umliegenden, durch Kanten angebotenen, Knoten. Dieser Prozess nennt sich Expansion. Zu jedem dieser Nachbarknoten wird mittels des Simulationsmodells ein Flugsegment simuliert. Hierzu wird zunächst aus der aktuellen Flugzeit, der Wegstrecke zum Zielknoten, und der zu erreichenden RTA (dem Flugplan entnommen) die notwendige Geschwindigkeit unter Einbeziehen der aktuellen Windvorhersage entlang der Flugroute berechnet. Mittels dieser Geschwindigkeit wird das aktuell betrachtete Segment simuliert bis der benachbarte Knoten erreicht wird.

Aus den gewonnen Simulationsdaten wird durch die Kostenfunktion ein Kostenwert für dieses Flugsegment errechnet (Katengewicht). Zusätzlich werden, durch die Heuristik, für den erreichten Knoten die voraussichtlichen Kosten zum Zielknoten abgeschätzt.

Aus der Summe der bisherigen Flugkosten, dem Katengewicht und dem Schätzwert werden die vorläufigen Gesamtkosten ermittelt. Nachdem alle benachbarten Knoten erkundet worden wird der anfangs expandierte Knoten als expandiert markiert. Der kostengünstigste Pfad zu diesem Knoten ist nun bekannt, eine weitere Expansion dieses Knotens ist nicht nötig. Danach startet der Expansionsprozess von Neuem mit dem Knoten, welcher die bisher niedrigsten vorläufigen Gesamtkosten aufweist. Dieser Prozess wird wiederholt bis der Zielknoten expandiert werden soll, in diesem Moment stoppt der Algorithmus, da nun der optimale Pfad zum Zielknoten, beziehungsweise RTA Wegpunkt, gefunden wurde.

4. EVALUATION

Die Evaluation des entwickelten Algorithmus wird durch eine Schnellzeitsimulation durchgeführt. Zunächst wird der Aufbau dieser Simulationsumgebung beschrieben. Im Anschluss daran findet eine Beschreibung des Test- und Referenzszenarios statt, mittels welcher die Funktionalität des Algorithmus nachgewiesen wird. Die Evaluation wird mit der Präsentation und Diskussion der Ergebnisse im nachfolgenden Abschnitt abgeschlossen.

4.1. Implementierung der Simulationsumgebung

Die Implementierung des Algorithmus und der, auf der BADA Library basierenden, Schnellzeitsimulation erfolgt in der Programmiersprache C++. Wie in BILD 2 dargestellt besteht die Simulationsumgebung aus zwei Teilen: zum einen der Simulationsumgebung und zum anderen dem entwickelten Algorithmus, hier dargestellt als Trajektoriengenerator. Während der Berechnung der Trajektorie wird das Flugmodell zur Simulation einzelner Segmente verwendet. Sobald eine gültige Lösung generiert wurde, wird diese Trajektorie als Ganzes an das Simulationsmodell übergeben und simuliert.

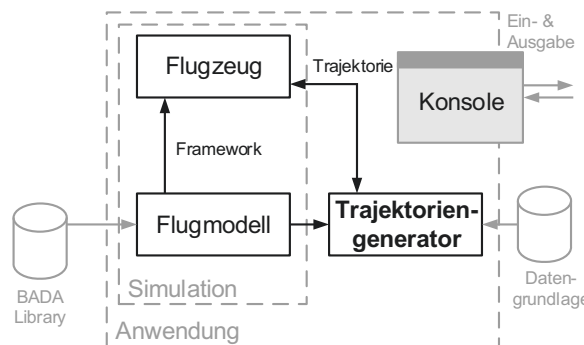


BILD 2. Schematische Darstellung der implementierten Simulationsumgebung.

4.2. Flugplan

Ein transatlantischer Flug von Toulouse (LFBO) nach Seattle Tacoma (KSEA) wird gewählt um die Funktionalität des Algorithmus zu evaluieren. Der hierfür notwendige Flugplan wurde mittels Jeppesen Jetplan generiert. Wie in BILD 3 dargestellt, verläuft dieser von Frankreich ausgehend nordwestlich. Nachdem Grönland überflogen wurde wird der Zielflughafen, Seattle Tacoma, über Kanada erreicht.

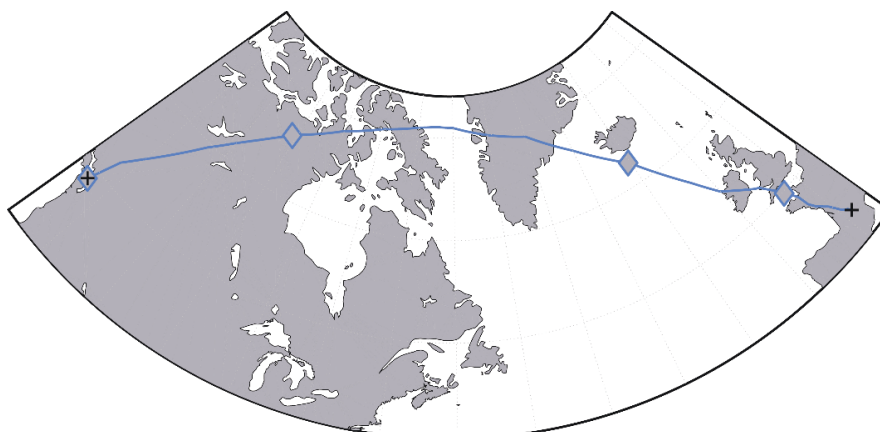


BILD 3. Flugroute des verwendeten Flugplans von Toulouse (LFBO) nach Seattle Tacoma (KSEA), die Position zeitbeschränkter RTA Wegpunkte ist als Raute markiert.

Der hier dargestellte Flugplan hat eine Gesamtlänge von 8553 km und besteht aus 43 Wegpunkten, von welchen

vier zeitbeschränkt sind. Eine Zusammenfassung der zeitbeschränkten Wegpunkte findet sich in TAB 4:

TAB 4. Zeitbeschränkte RTA Wegpunkte entlang der Flugroute LFBO-KSEA.

ID	Flughöhe	Zeit	Position
1	11400 m	3240 s \pm 30 s	En-Route
2	11600 m	10500 s \pm 120 s	En-Route
3	12400 m	24900 s \pm 120 s	Intercont.
4	8000 m	33820 s \pm 30 s	Anflug KSEA

Die Zeitangaben beziehen sich hierbei auf die Zeit nach dem Start des Fluges (bzw. der Simulation). Durch die zusätzliche Vorgabe einer Zielhöhe für die zeitbeschränkten Wegpunkte ist die Position des Flugzeugs zeitlich und räumlich fest definiert.

Die angegebenen Toleranzzeiten variieren mit der Position der Wegpunkte, während die En-Route Wegpunkte zwei und drei höhere Toleranzen erlauben (± 120 s), werden für Wegpunkte in Flughafennähe, oder Zonen mit höherem zu erwartenden Verkehrsaufkommen, engere Toleranzen gefordert (± 30 s).

4.3. Testsznarien

Zur Evaluation des Algorithmus wird der vorgestellte Flugplan in zwei verschiedenen Varianten geflogen. Ein Referenzszenario wird zur Performanceermittlung entwickelt.

4.3.1. Anzahl der RTA Wegpunkte

Durch eine Variation der aktiven RTA Wegpunkte kann die Eignung des Algorithmus für zwei unterschiedliche Ausbaustufen von TBO getestet werden. Im Single RTA Szenario wird dazu nur der letzte zeitbeschränkte Wegpunkt während der Berechnung aktiviert. Diese Konfiguration bildet die erste Ausbaustufe von TBO ab, in welcher beispielsweise die Ankunftszeiten an einem Approach Fix zeitlich definiert werden um den ankommenden Verkehr zu lenken. Durch diese Konfiguration ist der Algorithmus in der Lage, über den gesamten Flugplan zu optimieren. Im Multi RTA Szenario werden alle zeitbeschränkten Wegpunkte als aktiv betrachtet, was eine zeitlich enger vorgegebene Gesamttrajektorie zur Folge hat und einer erweiterten Implementierung von TBO entspricht.

4.3.2. Referenzszenario

Aufgrund der Tatsache, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulationsumgebung keine Vergleichbarkeit mit anderen Quellen/Referenzen gewährleistet wird die Leistungsfähigkeit des Algorithmus mittels eines benutzerdefinierten Referenzszenarios ermittelt. Für dieses Szenario wird ein Step Climb Profil ohne Wettereinfüsse generiert, welches dann dem Algorithmus vorgegeben wird um ein entsprechendes Geschwindigkeitsprofil zum Erreichen der RTA Zielzeiten zu errechnen.

4.3.3. Kombination der Testsznarien

Insgesamt werden für eine erste Evaluation des Algorithmus vier Simulationen durchgeführt. Jeweils eine Simulation für Single & Multi RTA mit voller Algorithmus Funktionalität (Variation Vertikal- und Geschwindigkeitsprofil), sowie zusätzlich jeweils eine Referenzsimulation, wie in 4.3.2 beschrieben werden ausgeführt.

4.4. Startkonfiguration

Für alle Szenarien wird eine konstante Startkonfiguration festgelegt. Der verwendete Flugzeugtyp ist eine Boeing 747-400, welche als eigenständiges Modell in der BADA Library abgebildet ist. In TAB 5 ist die anfängliche Position und Flugzeugkonfiguration zusammengefasst:

TAB 5. Startkonfiguration des Flugzeugs zu Beginn der Simulation.

Parameter	Wert
Treibstoffmasse	120 000 kg
Nutzlast	20 000 kg
Flughöhe	1400 m (4600 ft)
Kurs	335°
Position	Start LACOU 5B SID
Fluggeschwindigkeit	180 m/s (350 kt)

Das für den Flugplan aktive Wetter entspricht der globalen Wettervorhersage für den 21. Januar 2016, welche aus dem National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Global Forecast System (GFS) entnommen wurde. Die verfügbare Auflösung entspricht $0,5^\circ$ in Länge und Breite, bis zu einer Höhe von circa 31 km (unter Annahme von Internationale Standard Atmosphäre (ISA) Konditionen). Das für die Simulation verwendete Wetter ist statisch abgebildet, es besteht daher nur eine ortsabhängige Änderung des Wetterzustandes, keine zeitliche.

4.5. Ergebnisse

Die in dieser Zusammenfassung betrachteten Ergebnisse beschränken sich, im Rahmen dieser Veröffentlichung, auf das Multi RTA Szenario und die, soweit für die Diskussion der Ergebnisse erforderlich, entsprechende Referenztrajektorie.

4.5.1. Höhen- und Geschwindigkeitsprofile

In BILD 4 dargestellt sind Höhen- und Geschwindigkeitsprofil des Flugzeuges aufgetragen über die Entfernung zum Startflughafen. Wie zu erkennen, folgt die erste Reiseflugphase nach einer anfänglichen Steigflugphase auf $11\,400 \text{ m}$, in welcher der erste RTA Wegpunkt erreicht wird. Nach einer Höhenänderung auf $11\,600 \text{ m}$ folgt ein Sinkflug auf $11\,000 \text{ m}$ mit anschließender Reiseflugphase. Nach 4680 km erfolgt ein weiterer Steigflug auf zunächst $12\,200 \text{ m}$, auf welchen eine Reihe von Step-Climbs bis zum Einleiten des Sinkfluges und Erreichen des letzten RTA Wegpunktes folgen.

Das unten in BILD 4 dargestellte Geschwindigkeitsprofil lässt vier unterschiedliche Geschwindigkeitsabschnitte erkennen. Während des initialen Steifluges ist ein unsteufiges Geschwindigkeitsprofil zu erkennen³. Nach Erreichen des ersten RTA Wegpunktes folgt ein Reiseflug mit durchschnittlichen 250 m/s . Nach Passieren des zweiten und dritten zeitbeschränkten Wegpunktes erhöht sich die durchschnittliche Geschwindigkeit auf 264 m/s , beziehungsweise 270 m/s .

Referenzszenario

Im Vergleich hierzu zeigt das Referenzszenario ein beständigeres Höhenprofil. Wie in BILD 5 dargestellt folgt

³Begründet durch die Art der Steigflugimplementierung.

auf die anfängliche Steigphase eine konstante Reiseflugphase. Diese wird periodisch durch kurze Steigsegmente unterbrochen, sobald die maximale Flughöhe (in grau gestrichelt dargestellt) ein Steigen zulässt. Das Geschwindigkeitsprofil für das Referenzszenario weist fünf verschiedene Geschwindigkeitsbereiche auf. Nach einem zunächst unstetigen Bereich während des Steigens folgt zunächst ein Bereich konstanter Ge-

schwindigkeit. Dieser wird unterbrochen durch einen Bereich mit langsam ansteigender und danach fallender, variabler Geschwindigkeit. Darauf folgend zwei Bereiche konstanter Geschwindigkeit mit durchschnittlichen 275 m/s, sowie 270 m/s welche durch einzelne Steigphasen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit unterbrochen werden.

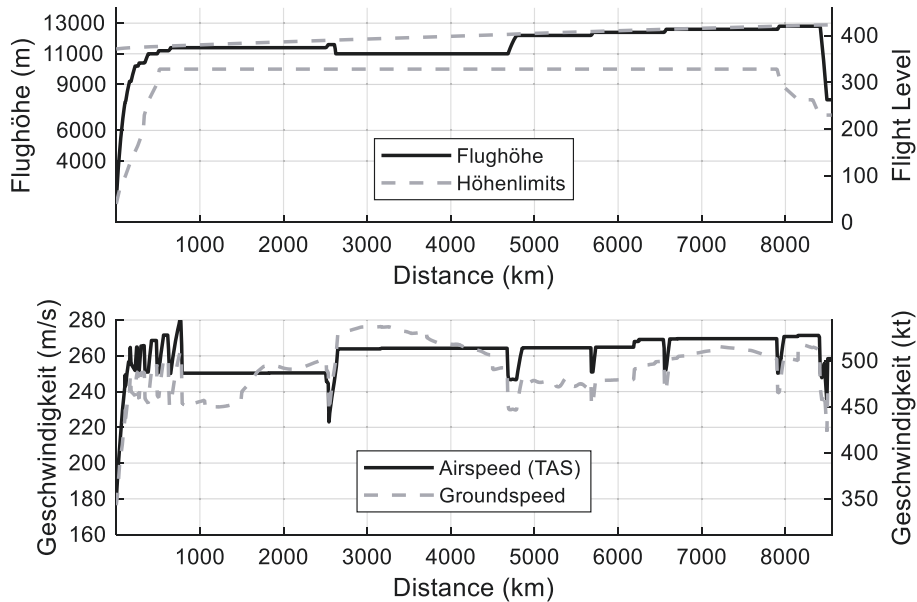


BILD 4. Simuliertes Multi RTA Höhen- (oben) und Geschwindigkeitsprofil (unten), aufgetragen über die Entfernung zum Startflughafen LFBO.

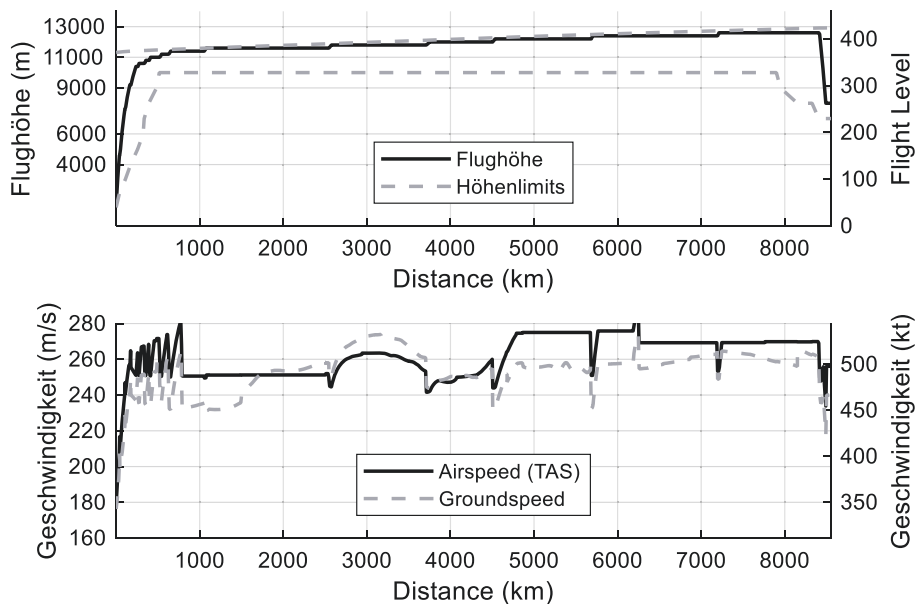


BILD 5. Simuliertes Referenz Höhen- (oben) und Geschwindigkeitsprofil (unten), aufgetragen über die Entfernung zum Startflughafen LFBO.

4.5.2. Ankunftszeiten

Die Ankunftszeiten an den vier zeitbeschränkten Wegpunkten sind in BILD 6 dargestellt. Aufgetragen ist hier

die relativ zur geplanten Ankunftszeit tatsächliche Ankunftszeit. Positive Werte zeigen ein späteres Erreichen des Wegpunktes an, negative ein verfrühtes. Die angezeichneten Balken markieren die erlaubte Zeittoleranz. Wie zu erkennen wurden im Multi RTA Szenario alle

Wegpunkte innerhalb der erlaubten Toleranz erreicht, die größte Abweichung von 22 s später findet sich am ersten Wegpunkt.

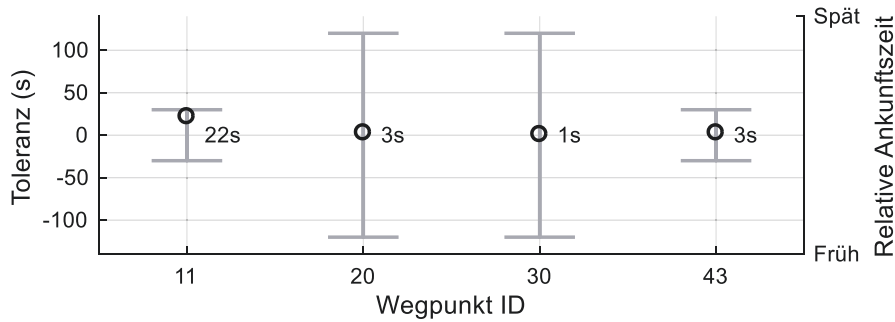


BILD 6. Simulierte Ankunftszeiten des Multi RTA Szenarios, relativ zur vorgegebenen Ankunftszeit.

4.5.3. Flugparameter

Zusammengefasst in TAB 6 sind ausgewählte Flugdaten des Multi RTA Szenarios im Vergleich mit dem entsprechenden Referenzszenario. Neben der Flugdauer und dem benötigten Treibstoff ist der durchschnittliche erfahrene Gegenwind auf der generierten Trajektorie mit angegeben.

TAB 6. Vergleich der Simulationsergebnisse zwischen Multi RTA und Referenzszenario.

Parameter	Multi RTA	Referenz
Flugdauer	33 823 s	33 820 s
Benötigter Treibstoff	90 661 kg	92 458 kg
Ø Gegenwind	7,70 m/s	8,04 m/s

5. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Auf Grundlage der präsentierten Ergebnisse findet im folgende eine Diskussion dieser statt. Im Laufe dieser Diskussion werden die in TAB 1 eingeführten Anforderungen an den entwickelten Algorithmus hinsichtlich deren Erfüllungsgrad bewertet.

5.1. Höhenprofil

Das in BILD 5 dargestellte Höhenprofil der Referenztrajektorie zeigt ein konstantes Steigen während des Reisefluges, was einer treibstoffoptimierten Trajektorie entsprechen würde (ohne Beachtung von etwaigen Wettereinflüssen) [18]. Bedingt durch die begrenzte Auflösung des Graphen findet ein Steigvorgang jeweils am nächst möglichen Wegpunkt statt, sobald die Flugleistung dies erlaubt. Aus dieser Beobachtung wird geschlossen, dass der Algorithmus in der Lage ist unter Berücksichtigung der Flugzeugperformance eine optimale Trajektorie ohne Wettereinflüsse zu generieren (R2).

Im Vergleich hierzu steht das in BILD 4 dargestellte Höhenprofil des Multi RTA Szenarios, welches unter Berücksichtigung von Wettereinflüssen generiert wurde. Auffällig ist hierbei die Abweichung von einem konstanten Steigprofil während des Reisefluges. Nachdem Wegpunkt 20 passiert wurde, sinkt das Flugzeug auf eine tiefere Flughöhe und hält diese zunächst.

Eine Betrachtung der atmosphärischen Bedingungen zeigt, dass dieses Verhalten aufgrund der Tatsache geschieht, dass im Bereich zwischen 2500 km und 4800 km Flugstrecke ein Abfallen der Lufttemperatur zu

beobachtet ist. Als Folge dessen steigt die Luftdichte an, was den Flug auf dieser Höhe vergleichsweise ineffizienter werden lässt. Dieser Zusammenhang ist in BILD 7 dargestellt, auf der Höhe der Referenztrajektorie ist die Luftdichte mit $0,5 \text{ kg/m}^3$ höher als die $0,38 \text{ kg/m}^3$ auf der niedrigeren Höhe.

Sobald die kältere Region passiert wurde ist die Luftdichte auf den oberen Flugflächen wieder vorteilhafter. Daraufhin wird ein Steigflug eingeleitet und die Trajektorie folgt ab hier wieder dem ursprünglichen, kontinuierlichen Steigprofil. Aus dieser Beobachtung ist zu erkennen, dass der Algorithmus in der Lage ist unvorteilhafte Wetterkonstellationen zu erkennen und, sofern möglich zu vermeiden. Hinsichtlich der Anforderung R4 wird Wetter erfolgreich in der Routenplanung berücksichtigt.

5.1.1. Geschwindigkeitsprofil

Der im Höhenprofil diskutierte Sachverhalt spiegelt sich zudem im Geschwindigkeitsprofil wider. Wie in BILD 5 ersichtlich hat der Anstieg der Luftdichte zur Folge dass die geforderte Zielgeschwindigkeit langsamer erreicht wird bei erhöhter Triebwerksleistung. Als Folge dessen muss die dadurch aufgebaute zeitliche Verzögerung durch eine erhöhte Durchschnittsgeschwindigkeit auf der restlichen Route kompensiert werden. Der in TAB 6 ersichtliche erhöhte Treibstoffverbrauch ist die Folge.

5.1.2. Ankunftszeiten

Der Algorithmus ist in der Lage alle zeitbeschränkten Wegpunkte innerhalb der angegebenen Toleranzzeiten zu erreichen. Hierbei wurden keine Leistungsgrenzen des Luftfahrzeugs verletzt. Daher kann die Anforderung R1 als erfüllt angesehen werden.

5.1.3. Kostenersparnis

Wie in TAB 6 dargestellt beträgt die relative Treibstoffersparnis zwischen dem Multi RTA Szenario und dem Referenzszenario $\sim 1800 \text{ kg}$, was einem Wert von 1,9% entspricht. Diese Differenz ist zurückzuführen auf das Umfliegen des unvorteilhaften Wettergebietes, und dem damit verbundenen erhöhten Treibstoffverbrauch. Begründet durch den Sachverhalt, dass Treibstoffkosten zu den größten betrieblichen Kosten einer Airline gehören [19], würde eine Ersparnis von knapp 2% zu signifikanten Ersparnissen führen. Aufgrund dieser Ergebnisse kann zudem geschlossen werden, dass der Algorithmus in der Lage ist, eine vergleichsweise kostengünstigere Trajektorie zu generieren (R3).

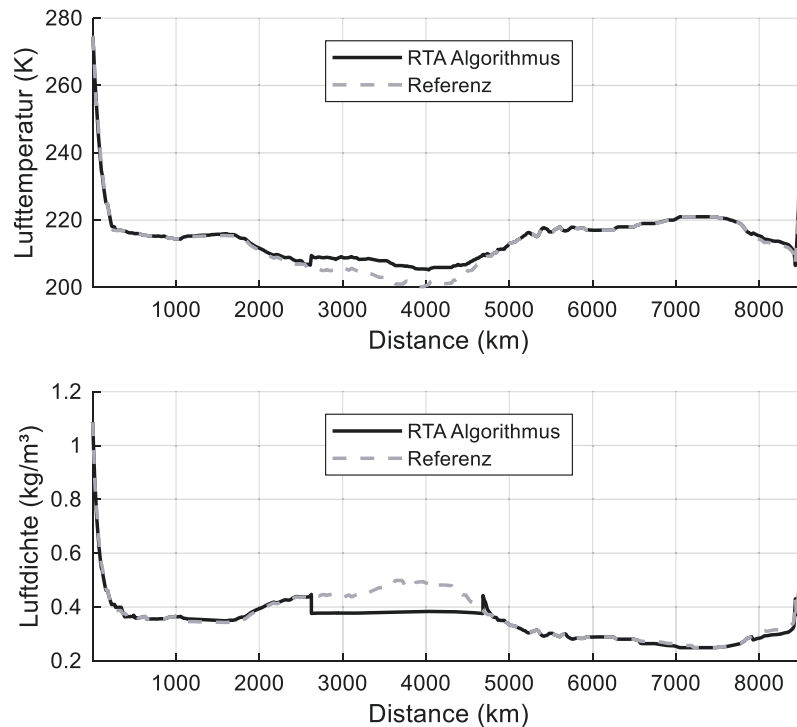


BILD 7. Lufttemperatur und -dichte im Vergleich zwischen den Trajektorien des Multi RTA und des Referenzszenarios, aufgetragen über die Entfernung zum Startflughafen LFBO.

6. ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurden die Ergebnisse einer Master-Thesis zum Thema der optimierten Generierung von Luftfahrzeug-Trajektorien unter der Berücksichtigung von Zeitbeschränkungen vorgestellt. Zunächst wurde eine Recherche zu aktuell, in den Flugmanagementsystemen verwendeten, Optimierungsansätzen, sowie zukünftige Luftfahrtkonzepten durchgeführt. Darauf aufbauend wurden Anforderungen an einen neuen Algorithmus abgeleitet und ein Konzept entwickelt. Der entwickelte Algorithmus basiert auf dem A* Pfadsuche Algorithmus und ist in der Lage Leistungsdaten des Luftfahrzeugs, sowie aktuelle Wetterdaten mit in die Pfadplanung einzubeziehen. Eine kostenoptimale Trajektorie wird generiert indem eine Kostenfunktion eingesetzt wird um die anfallenden Kosten für verschiedene Lösungen zu modellieren und ein geeignetes Optimum zu finden. Durch eine, auf der BADA Library aufbauende, Schnellzeitsimulation konnte die Funktionalität des Algorithmus, sowie die Einhaltung der eingangs festgelegten Anforderungen, nachgewiesen werden. Gegenüber einem Vergleichsszenario wurde eine relative Treibstoffersparnis von knapp 2% erreicht.

6.1. Ausblick

Ausgehend von den im Rahmen dieser Veröffentlichung vorgestellten Ergebnissen lassen sich unterschiedliche Ansätze zur Erweiterung und Verbesserung des Algorithmus identifizieren. Die im Rahmen dieser Veröffentlichung angesprochenen Verbesserungsvorschläge beschränken sich hierbei auf eine Auswahl von Vorschlä-

gen, welche noch nicht in der aktuellen Version des Algorithmus umgesetzt wurden, siehe auch hierzu den nachfolgenden Abschnitt 6.2.

Laterale Variation

Neben der Variation des Vertikal- und Geschwindigkeitsprofils sollte der Algorithmus in der Lage sein den lateralen Flugpfad zu beeinflussen. Mögliche Ansätze zur lateralen Optimierung finden sich unter [20, 21].

Flugplanweite Optimierung

Anstatt, wie bisher, den Flugplan für eine Mehrzahl zeitbeschränkter Wegpunkte zu segmentieren, sollte die Möglichkeit einer flugplanweiten Trajektorie Optimierung untersucht werden. Ein möglicher Ansatz für eine entsprechende Methodik findet sich unter [12, 22].

Heuristik Funktion

Die Entwicklung einer zulässigen Heuristik sollte untersucht werden. Durch die Entwicklung einer entsprechenden Funktion besteht die Möglichkeit die Laufzeit des Algorithmus zu reduzieren. Dies wiederherum würde die Optimierung in mehreren Dimensionen (s.o.) ermöglichen.

6.2. Weiterführende Arbeiten

Wie eingangs bereits beschrieben, wird in dieser Veröffentlichung die Master Thesis des Autors zusammengefasst. Im Anschluss an diese Arbeit wurde der vorgestellte Algorithmus weiterentwickelt. Eine erweiterte Evaluation der Funktionalität des Algorithmus findet sich in [4]. Eine detaillierte Betrachtung der Kostenfunktion unter [3]. Unter [2] wird eine weiterentwickelte Version des vorgestellten Algorithmus präsentiert und evaluiert.

7. LITERATURANGABEN

- [1] Sprengart, S. M.: Development and Evaluation of an Algorithm for Cost Optimized Flight Conduction Under Time Constraints, TU Darmstadt Master Thesis. Darmstadt 2016
- [2] Sprengart, S., Schulze, J. u. Westphal, J.: Cost Sensitive Trajectory Generation for Time Constrained Aircraft Route Planning. AIAA Aviation Forum 2017. 2017
- [3] Schrader, N.-M.: Modeling of Flight Costs with Respect to Time Dependent Factors, TU Darmstadt Master Thesis. Darmstadt 2017
- [4] Sander, P.: Analysis and Validation of an Algorithm for Execution of Flights with Temporal Constraints, TU Darmstadt Bachelor Thesis. Darmstadt 2016
- [5] SESAR: ATM Master Plan, 2012. <https://www.atmmasterplan.eu/>, abgerufen am: 10.11.2015
- [6] European Commission: Report from the Commission to the European Parliament and the Council. on the implementation of the Single Sky legislation: time to deliver, 2011. http://ec.europa.eu/transport/modes/air/single_european_sky/doc/reports/2011_11_14_com_2011_0731_f_report_en.pdf, abgerufen am: 11.11.2015
- [7] SESAR: Stakeholders, 2015. <http://www.sesarju.eu/discover-sesar/partnering-smarter-aviation>, abgerufen am: 20.11.2015
- [8] Hotham, P.: SESAR & NextGen Working together for Aviation Interoperability, 2011. http://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/news/4.2_SESAR_NextGen_Interop_v1.pdf, abgerufen am: 10.11.2015
- [9] VDI-Richtlinie 2221; 1993. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*
- [10] SESAR: SESAR Concept of Operations Step 1, 2010. http://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/highlight/SESAR_ConOps_Document_Step_1.pdf, abgerufen am: 12.11.2015
- [11] Enea, G. u. Porretta, M. (Hrsg.): A comparison of 4D-trajectory operations envisioned for Nextgen and SESAR, some preliminary findings. 2012
- [12] Ballin, M. G., Williams, D. H., Allen, B. D. u. Palmer, M. T.: Prototype flight management capabilities to explore temporal RNP concepts. 2008 IEEE/AIAA 27th Digital Avionics Systems Conference (DASC). 2008, S. 3
- [13] Hart, P., Nilsson, N. u. Raphael, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics 4 (1968) 2, S. 100–107
- [14] LaValle, S. M.: Planning algorithms. Cambridge, New York: Cambridge University Press 2006
- [15] User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA). Revision 3.13, EUROCONTROL, 2015
- [16] EUROCONTROL: Base of Aircraft Data (BADA), 2016. <http://www.eurocontrol.int/services/bada>, abgerufen am: 19.08.2017
- [17] Rippel, E., Bar-Gill, A. u. Shimkin, N.: Fast Graph-Search Algorithms for General-Aviation Flight Trajectory Generation. Journal of Guidance, Control, and Dynamics 28 (2005) 4, S. 801–811
- [18] Dalmau Codina, R. u. Prats Menéndez, X.: How much fuel and time can be saved in a perfect flight trajectory? Continuous cruise climbs vs. conventional operations, Universitat Politècnica De Catalunya Conference Report 2014
- [19] IATA: IATA Economic Briefing. Airline Fuel and Labour Cost Share, 2010. http://www.iata.org/publications/economic-briefings/Airline_Labour_Cost_Share_Feb2010.pdf, abgerufen am: 10.04.2016
- [20] Murrieta-Mendoza, A. u. Botez, R.: Lateral Navigation Optimization Considering Winds and Temperatures for Fixed Altitude Cruise Using Dijkstra's Algorithm. ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2014, S. V001T01A054
- [21] Patron, R. S. F. u. Botez, R. M.: Flight Trajectory Optimization through Genetic Algorithms Coupling Vertical and Lateral Profiles (2014)
- [22] US Patent: US6507782 B1