

ZIVILER FORMATIONSFLUG IM TRANSTATLANTIK VERKEHR UND ZWISCHEN EUROPA UND ASIEN. TREIBSTOFFERSPARNIS UND ROBUSTHEIT DES SYSTEMS

F. Morscheck,
Institute für Flugführung DLR, Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Formationsflug ist eine Möglichkeit Treibstoff einzusparen. Das hinten fliegende Flugzeug positioniert sich hierzu in den Aufwindbereichen der Wirbelschlepe des vorausfliegenden Flugzeugs. Diese Methode ist seit langer Zeit bekannt und wird bisher in erster Linie von Vögeln verwendet um weniger anstrengend zu fliegen. Frühere Studien haben ergeben, dass ein folgendes Flugzeug theoretisch bis zu 15% seines aktuellen Treibstoffverbrauchs einsparen kann [1]. In Flugversuchen konnten eine Senkung des Treibstoffverbrauchs 8.8% +/- 5% nachgewiesen werden [1].

In weiteren Studien wurden optimale Routen für Formationen untersucht deren Teilnehmer verschiedene Start und Zielflughäfen aufwiesen [2-4]. In einer früheren Studie wurde zudem das Konzept des Formationsflugs auf den Transatlantischen Flugverkehr angewandt und die möglichen Treibstoffeinsparungen abgeschätzt.

In dieser Paper wird neben der Transatlantischen Flugverkehr auch der Flugverkehr zwischen Europa und dem Asiatischen Raum betrachtet. Es werden die zentralen Unterschiede der beiden Szenarien herausgestellt und ihre Auswirkungen auf den Nutzen von Formationsflug.

In einem letzten Schritt werden die für den Formationsflug optimierten Szenario mit Verspätungen beaufschlagt um deren Auswirkungen auf die Formationsbildung und die Treibstoffersparnis durch Formationsflug zu beschreiben.

1. MOTIVATION

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wie auch der Umweltverträglichkeit ist es heutzutage mehr den je nötig den Treibstoffverbrauch im Luftverkehr zu senken. Auf diese Weise können Kosten und Schadstoffausstoß gesenkt werden. Um dieses Ziel zu erreichen werden Fortschritte in allen Teilen der Luftfahrtindustrie benötigt. Formationsflug bildete schon lange Zeit eine Verlockende Möglichkeit. Der Flug innerhalb einer Wirbelschlepe eines anderen Flugzeugs war bisher aber zu riskant um für die Luftfahrt in Betracht gezogen zu werden. Eine mögliche theoretische Verbrauchsenkung um bis zu 15% ist dennoch zu viel versprechend um sie völlig auszuschlagen. Daher wurden Flugversuche unternommen um diesen theoretischen wert in der Praxis zu untersuchen [1]. Ebenso wird untersucht wie sich der optimale Punkt in der Wirbelschlepe automatisiert und sicher halten lässt.

Ebenso wurde für verschiedenste Städtepaarungen untersucht wie viel Treibstoff sich über einen gesamten Flug in einer kompletten Formation einsparen lässt. An diese Studien soll diese Untersuchung anknüpfen. Nachdem Formationsflug in einem großen

Transatlantischen Verkehrsszenario untersucht wurde [7] wird in dieser Studie zusätzlich der Flugverkehr zwischen Europa und dem asiatischen Raum untersucht. Die beiden Szenarien unterscheiden sich in ihrem Aufbau deutlich und die Auswirkungen dieser Unterschiede auf den Nutzen von Formationsflug werden im Folgenden dargestellt.

Da Trajektorien in diesen Szenarien für die Treibstoffersparnis durch Formationsflug optimiert sind soll in einem letzten Schritt gezeigt werden wie empfindlich dieses System auf leichte Störungen wie Verspätungen reagiert.

2. SIMULATIONS-AUFBAU

In diesem Kapitel wird der Aufbau der verwendeten Verkehrssimulation näher beschrieben. In einem ersten Teil wird dabei näher auf die verwendeten Szenarien eingegangen. Darauf folgend wird beschrieben wie sich die Trajektorien der einzelnen Flugzeuge berechnen und wie der Treibstoffverbrauch bestimmt wird. Schließlich wird die Routenoptimierung einzelner Formationen beschrieben sowie die mögliche Anpassung der

Abflugzeiten diskutiert.

2.1. Das Szenario

Das erste gewählte Ausgangsszenario beinhaltet alle Flüge die am 1.7.2011 den Nordatlantik überquert haben. Die Ausgangsdaten stammen von Eurocontrol und beinhalteten alle Flüge an diesem Tag welche von Eurocontrol bedient wurden. Da die Routen für Flüge in einer Formation optimiert werden ergab sich ein unfairer Vergleich zu Flugzeugen die ihrer Originalroute folgen welche unter anderem durch das „North Atlantic Track System“ geprägt sind. Flugzeuge ohne Formation, welches alle Flüge des Referenzszenarios sind, nutzen daher Großkreise zu ihrem Bestimmungsort um für sich selbst eine Optimale Route zu fliegen. Der Einfluss von Wind und anderen Wetter Effekten wird in dieser Simulation nicht berücksichtigt.

Daher starten Flüge in der Simulation zwar zu ihren ursprünglichen Zeiten, durch die kürzeren Routen halten sie sich aber nicht mehr Landungszeiten aus den Ursprünglichen Daten.

Um den Bereich zu Beginn des Tages und am Ende des Tages sinnvoll betrachten zu können wurden die ursprünglichen Daten verdoppelt. Auf diese Weise können auch Flüge um 24 Uhr herum ausreichend Mitglieder für eine Formation finden. Flüge zu Beginn und zum Ende des Szenarios sind dennoch weiterhin limitiert in ihrer Auswahl.

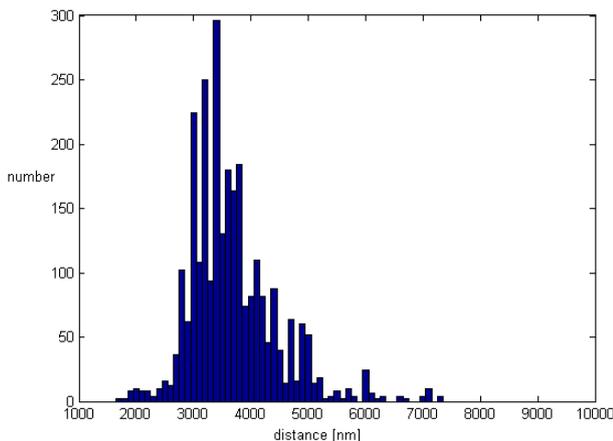


BILD 1. Streckenlängeverteilung im Transatlantischen Szenario

So ergibt sich ein Szenario mit 2776 Flügen über 48 Stunden. Sämtliche Flüge überqueren den Atlantik. Das Szenario beinhaltet dabei Flüge mit Strecken von 1500nm bis zu 7000nm (siehe Bild 1) sowie Flugzeuge vom Typ 747, 767, 777, 340, 330, 350 und 380.

Das zweite Szenario wurde denselben Daten entnommen und auf dieselbe Zeitspanne verlängert. Es enthält sämtliche Flüge dieses Tages welche zwischen Europa und Asien verkehren. Wie im Transatlantischen Szenario verkehren alle Flüge auf Großkreisen zwischen Start- und Zielflughafen sofern sie sich nicht einer Formation angeschlossen haben.

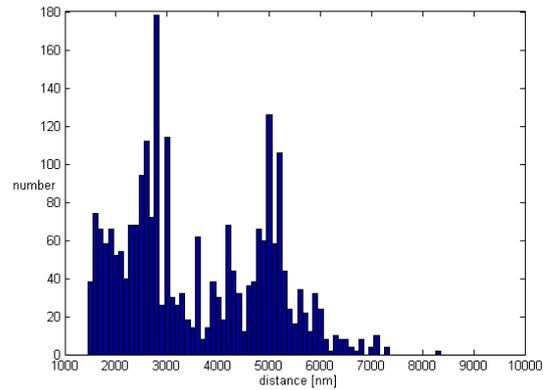


BILD 2. Streckenlängeverteilung im Europa-Asien Szenario

Mit 2774 Flügen in 48 Stunden ist das Szenario ähnlich groß wie das Transatlantische. Die Verteilung der Streckenlängen ist dabei weniger konzentriert im Vergleich zum Transatlantischen Szenario. Zudem verlaufen die Routen zwischen den Städtepaaren weniger konzentriert [Bild 3].

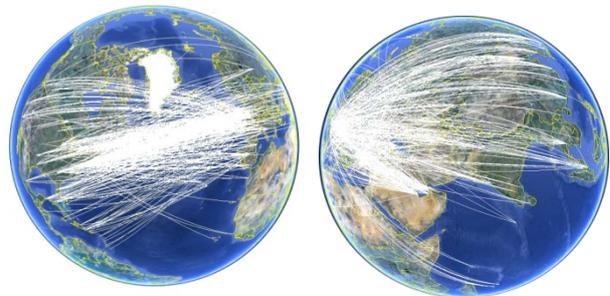


BILD 3. Großkreisrouten zwischen den Städtepaaren im Transatlantischen Szenario (links) und dem Europa-Asien Szenario (rechts)

Diese sehr weite Verteilung der Streckenlängen aber besonders die aufgefächerte Verteilung der Routen zwischen den Städtepaaren kann negative Einflüsse auf das Einsparungspotential durch Formationsflug haben.

2.2. Trajektorienaufbau und Verbrauchsrechnung

Zur Begrenzung der für die Optimierung benötigten Zeit verwendet die Simulation vereinfachte Trajektorien. Flugzeuge ohne Formation fliegen entlang eines Großkreises zu ihrem Zielflughafen. Dabei wird weder die Startbahnrichtung noch die Landebahnrichtung berücksichtigt. Direkt nach dem Start steigen Flüge auf ihre optimale Flughöhe um dann in einen langsamen Steigflug überzugehen und so ihre optimale Höhe zu halten. Diese Höhe verlassen sie erst sobald es notwendig ist um den Zielflughafen zu erreichen.

In einer Formation müssen einzelne Flüge von dieser idealisierten Trajektorie abweichen. Die Formation selbst besteht aus verschiedenen Ein- und Austrittspunkten. Jedes Flugzeug tritt der Formation an dem flugzeugeigenen Eintrittspunkt bei und verlässt sie wieder an einem flugzeugeigenen Austrittspunkt. Lediglich der erste und der letzte Punkt einer Formation sind Ein- und

Austrittspunkte für je zwei Teilnehmer. Die Trajektorie eines Flugzeugs beginnt wieder am Startflughafen und verläuft in direkter Richtung zum Eintrittspunkt dieses Flugzeugs. Von diesem Punkt an folgt die Trajektorie allen Punkten der Formation bis zum Austrittspunkt dieses Flugzeugs. Am Austrittspunkt verläuft die Trajektorie entlang eines Großkreises in Richtung des Zielflughafens. Start- und Landebahnrichtung werden wieder nicht berücksichtigt.

Jeder Punkt der Formation besitzt zudem eine Formationshöhe welche sich aus der Optimalen Höhe des zurzeit führenden Flugzeugs ergibt. Es ist dabei wahrscheinlich das eine Höhe zwischen den Optimalen Flughöhen der einzelnen Teilnehmer ein besseres Ergebnis erzielt. Im Rahmen dieser Simulation soll dem Führenden Flugzeug außer dem zu fliegenden Umweg kein weiterer Nachteil entstehen weshalb es seine Optimale Flughöhe hält.

Nach dem Start steigt ein Flugzeug daher auf seine Optimale Flughöhe und sinkt anschließend unter Umständen rechtzeitig wieder um die Flughöhe der Formation am Eintrittspunkt zu erreichen. Sollte die Strecke zum Startflughafen nicht ausreichen um die Formationsflughöhe zu erreichen muss ein Flugzeug Holdings fliegen um auf eben diese Höhe zu steigen. Entsprechend steigt oder sinkt ein Flugzeug nach Verlassen der Formation auf seine Optimale Flughöhe um dann rechtzeitig zum Erreichen des Zielflughafens wieder zu sinken. Erneut muss ein Flugzeug Holdings fliegen sollte die Strecke zum Zielflughafen nicht ausreichen um die notwendige Höhe zu verlieren.

Der Treibstoffverbrauch ergibt sich entsprechend aus den vereinfachten stationären Flugzuständen entlang dieser Trajektorie (Steigflug, Sinkflug und langsames Steigen im Cruise). Da Kurven werden nicht betrachtet und Kurzänderungen werden entlang der Trajektorie direkt vollzogen. Flugzeuge in einer Formation bestimmen ihren Treibstoffverbrauch auf dieselbe Weise und reduzieren den momentanen Verbrauch dann um 10% wenn sie nicht die Formation anführen. Diese 10% Verbrauchsreduktion stellen hierbei die Einsparungen durch die Formation dar und orientieren sich an den im Flugversuch gezeigten 8,8% und den in der Theorie vorhergesagten 15%. Flugzeuge benötigen hierbei 10 Minuten um einer Formation beizutreten und profitieren erst dann von den 10% Verbrauchsreduktion. Ebenso benötigen Flugzeuge 10 Minuten um eine Formation zu verlassen in welchen sie die Vorteile der Formation bereits verlieren. Der Treibstoffverbrauch wird bereits bei der Trajektorienberechnung berücksichtigt und fließt entsprechend in das Flugzeuggewicht und die daraus entstehende Optimale Höhe ein.

Da sich die absolute Treibstoffmenge eines Flugzeugs aus dieser Rechnung ergibt ist es möglich, dass mit einer Formation geplante Flüge nicht ohne diese durchgeführt werden könnten. Alle Flugzeuge tragen in jedem Fall ausreichend Reserve Treibstoff mit sich um 30 Minuten Holdings fliegen zu können und dann noch einen alternativen Flughafen erreichen können.

2.3. Optimierung einer Formation

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben besteht eine Formation aus einer Reihe ein und Austrittspunkte für jeweils für alle Teilnehmer der Formation. Lediglich zu Beginn und zum Ende einer Formation benutzen zwei

Flugzeuge denselben Punkt als Ein- oder Austrittspunkt. Eine Formation kann dabei aus mehreren Formationen zusammengefügt werden und entsprechend mehrere Anfänge und Enden besitzen. Ein genetischer Algorithmus kann diese Punkte frei bewegen um den Formationsverlauf mit der größten Treibstoffersparnis zu finden. Die oben beschriebenen Trajektorienrechnungen werden hierbei in jedem Schritt der Optimierung durchgeführt um den aktuellen Treibstoffverbrauch der Formation zu bestimmen.

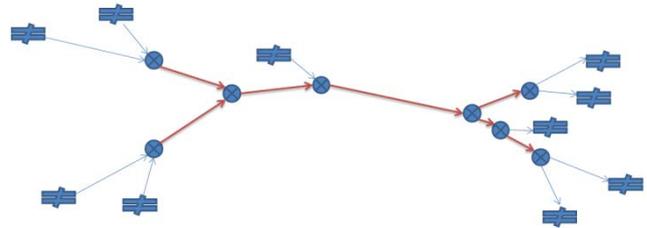


BILD 4. Aufbau einer Formation

Die Ein- und Austrittspunkte halten dabei immer einen Mindestabstand ein welcher für die 10 Minuten des Beitrittsmanövers und des Austrittsmanövers notwendig ist. Sollte ein Punkt während der Optimierung dichter an einen anderen Punkt heran geschoben werden wird der bisher feste Punkt ebenfalls verschoben um den nötigen Abstand sicher zu stellen.

Wie ebenfalls im vorherigen Abschnitt beschrieben werden Holdingmanöver nötig sollte sich ein Formationspunkt dem Start- oder Zielflughafen zu weit annähern.

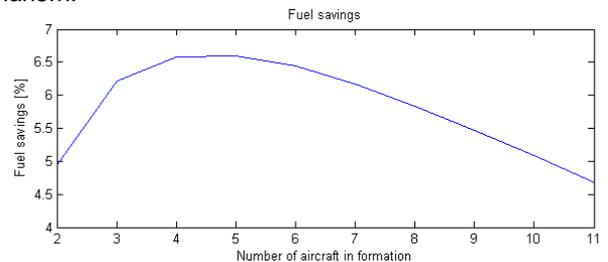


BILD 5. Treibstoffersparnis für verschiedene Formationsgrößen

Formationen in dieser Arbeit weisen eine maximale Teilnehmerzahl von 5 Flugzeugen auf. Diese Teilnehmerzahl ergibt sich aus einem sehr vereinfachten Szenario. In diesem Starten beliebig viele Flugzeuge zeitgleich von einem Flughafen in Richtung desselben Zielflughafens in 5000nm Entfernung. Diese können nun nach den oben beschriebenen Regeln Formationen bilden. Bis zu einer Teilnehmerzahl von 5 Flugzeugen verbessert sich hierbei der relative Treibstoffverbrauch aller Teilnehmer. Ab dem 6ten Teilnehmer (Sie Bild 5) verschlechtert sich die relative Einsparung der Formation wieder. Im verwendeten Szenario gibt es Strecken über 5000nm welche auch größere Formationen rechtfertigen die Mehrheit aller Flugzeuge bleibt aber darunter und größere Formationen würden die Berechnungszeit unnötig erhöhen.

2.4. Abflugzeiten

Für Flüge ohne Formation ergibt sich die Startzeiten aus den ursprünglichen Daten. In einer Formation können zwei Varianten simuliert werden. In der ersten bestimmt das

erste Flugzeug in einer Formation die Zeiten der Formationspunkte. Diese bestimmen sich aus der Reisezeit des Flugzeugs. Alle anderen Flugzeuge passen ihre Startzeiten an um sich zum passenden Zeitpunkt der Formation anzuschließen.

In der zweiten Variante bestimmt das Flugzeug welches seine Zeit am weitesten nach vorne verschieben müsste die Zeiten der Formation. Alle anderen Flugzeuge halten ebenfalls ihre vorgesehenen Abflugzeiten ein, auch wenn sie ihren Abflug verzögern müssten um sich passend der Formation anschließen zu können. Diese müssen nun Warteschleifen fliegen bis die Formation bei ihnen angekommen ist. Diese zusätzliche Strecke schlägt sich entsprechend auch im Treibstoffverbrauch nieder.

3. AUSWAHL MÖGLICHER FORMATIONEN

Die 2776 beziehungsweise 2774 Flüge in den beiden Szenarien würden es sehr zeitaufwendig gestalten alle möglichen Kombinationen mit Formationen von bis zu 5 Teilnehmern zu probieren um eine Optimale Konfiguration zu finden. Daher wurde eine Methode implementiert um eine Vorauswahl möglicher Formationen zu treffen. Frühere Studien mit kleineren Szenarien [2-4] haben gezeigt, dass jene Formationen besonders treibstoffsparend sind welche eine geringe Abweichung von der Ursprungsrouten der einzelnen Teilnehmer aufweisen.

Flugzeuge in diesen Formationen weisen schon auf ihrem direkten Weg eine größere Räumliche und Zeitliche Nähe auf. Um solche Flüge im Szenario zu finden wurde ein Konfliktdetektierungstool angepasst.

Das Tool detektiert Annäherungen von Flügen im 4 vierdimensionalen Raum und die Dauer dieser Annäherung. Diese Annäherungen werden zunächst nach ihrer Dauer sortiert. Alle weiteren Annäherungen der beiden Flüge mit der längsten Annäherung werden nun wiederum nach ihrer Dauer sortiert und die 3 weiteren Flüge mit den längsten Annäherungen als Kandidat hinzugefügt. Aus diesem Set von 5 Kandidaten werden nun alle möglichen Formationen gebildet um anschließend die Formation zu wählen welche die höchste Treibstoffersparnis einbrachte. Flüge die dieser neuen Formation angehören werden nun aus dem ursprünglichen 2776 Flügen entfernt während alle nicht der Formation zugehörigen Flüge in diesen verbleiben.

Diese Prozedur wird anschließend wiederholt bis keine neuen Formationen gefunden werden. Die Parameter für die Annäherungsdetektierung wurden dabei so gewählt das auch eine weitere Erhöhung der Parameter kaum neuen treibstoffsparende Formationen ergab

4. ERGEBNISSE

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Verkehrssimulationen unter verschiedenen Parametern vorgestellt. Im ersten Teil werden die Ergebnisse im Transatlantischen Szenario vorgestellt.

Da der Nutzen von Formationsflug stark von den gegebenen Möglichkeiten abhängt Formationen zu bilden wurde das Szenario unter verschiedenen Randbedingungen simuliert. Zum einen wurden die Simulationen mit festen und flexiblen Abflugzeiten simuliert zum anderen wurden die Flugzeuge in dne

Szenarios in einigen Simulationsläufen ausgetauscht. So wurde entweder die an diesem Tag genutzten Flugzeugtypen geflogen oder nur ein Flugzeugtyp im gesamten Szenario genutzt. In einer weiteren Simulation wurden alle Flugzeuge auf den jeweils Modernsten Typen ihrer Serie Aktualisiert.

Diese so entstehenden 6 Varianten wurden im Transatlantischen wie auch im Europa-Asien Szenario simuliert.

4.1. Alle Flugzeuge gleichen Typs und flexible Startzeiten



BILD 6. Gefundene Formationen mit allen Flugzeuge gleichen Typs und flexible Startzeiten

Mit allen Flugzeuge gleichen Typs und flexible Startzeiten werden 727 Formationen gebildet. 2311 von 2776 Flügen werden einer treibstoffsparenden Formation zugewiesen. Dies entspricht 83% aller Flüge im Szenario. Die durchschnittliche Formation beinhaltet 3,17 Flüge und sparte 4,7% Treibstoff während ein Umweg von 0,5% geflogen wurde.

Im Durchschnitt musste die Startzeit um 4,42 Minuten verschoben werden. Die größte Startzeitverschiebung betrug 44.11 Minuten.

4.2. Alle Flugzeuge gleichen Typs und feste Startzeiten



BILD 7. Gefundene Formationen mit allen Flugzeuge gleichen Typs und feste Startzeiten

Mit allen Flugzeuge gleichen Typs und festen Startzeiten werden 718 Formationen gebildet. 2228 von 2776 Flügen werden einer treibstoffsparenden Formation zugewiesen. Dies entspricht 80% aller Flüge im Szenario. Die durchschnittliche Formation beinhaltet 2,91 Flüge und sparte 4,6% Treibstoff während ein Umweg von 0,7% geflogen wurde.

Die Startzeit musste nicht verschoben werden.

Feste Startzeiten schlagen sich durch eine Steigerung der geflogenen Umwege wieder. Diese entstehen durch die notwendigen Schleifen während ein Flugzeug auf seinen Formation wartet. Diese Umwege führen nur zu einer kleinen Steigerung der Treibstoffersparnisse. Auch die Anzahl der Flugzeuge in einer Formation wird durch feste Startzeiten nicht drastisch gesenkt.

Fixierte Startzeiten wirken sich in allen 3 Simulationsvarianten ähnlich aus weshalb im Folgenden auf eine genauere Darstellung dieser Simulationen verzichtet wird.

4.3. Flugzeuge gleicher Serie werden auf die Modernste Variante geändert und flexible Startzeiten



BILD 8. Gefundene Formationen mit Flugzeuge gleicher Serie werden auf die Modernste Variante geändert und flexible Startzeiten

Mit allen Flugzeugen gleicher Serie werden auf die Modernste Variante geändert und flexible Startzeiten werden 578 Formationen gebildet. 1522 von 2776 Flügen werden einer treibstoffsparenden Formation zugewiesen. Dies entspricht 55% aller Flüge im Szenario. Die durchschnittliche Formation beinhaltet 2,64 Flüge und sparte 4,2% Treibstoff während ein Umweg von 0,5% geflogen wurde.

Im Durchschnitt musste die Startzeit um 4,2 Minuten verschoben werden. Die größte Startzeitverschiebung betrug 27.13 Minuten.

4.4. Originale flugzeugtypen und flexible Startzeiten



BILD 9. Gefundene Formationen mit originalen

Flugzeugtypen und flexible Startzeiten

Mit allen nur Flugzeuge gleichen Typs in einer Formation und flexible Startzeiten werden 495 Formationen gebildet. 1260 von 2776 Flügen werden einer treibstoffsparenden Formation zugewiesen. Dies entspricht 45% aller Flüge im Szenario. Die durchschnittliche Formation beinhaltet 2,55 Flüge und sparte 4% Treibstoff während ein Umweg von 0,5% geflogen wurde.

Im Durchschnitt musste die Startzeit um 4,29 Minuten verschoben werden. Die größte Startzeitverschiebung betrug 34,88 Minuten.

Die geringere Auswahl möglicher Formationspartner bewirkt insgesamt weniger Formationen und die noch entstehenden Formationen sind weniger effizient. Die Simulation mit verschiedenen Flugzeugtypen wirkt sich in derselben Weise auch auf das Europa-Asien Szenario aus, welches eine ähnliche Flugzeugtyp Zusammensetzung aufweist. Im Folgenden wird daher nur die Simulation mit einem einzigen Flugzeugtyp und flexibler Startzeiten näher betrachtet.

4.5. Europa-Asien Szenario



BILD 10. Gefundene Formationen mit allen Flugzeuge gleichen Typs und flexible Startzeiten

In dieser Simulation finden 1522 von 2774 Flügen eine Formation, womit 55% Formationsflug nutzen um Treibstoff einzusparen. Dies stellt eine deutliche Reduktion im Vergleich zum Transatlantischen Szenario dar in welchem 83% aller Flugzeuge Formationsflug nutzen. Mit 2,63 Flugzeugen pro Formation (553 Formationen) sind diese Formationen auch deutlich kleiner als im ersten Szenario. Die Flugzeuge in einer Formation sparten durch diese insgesamt 4,15% an Treibstoff ein. Dies entspricht etwa den werten im Transatlantischen Szenario mit aktualisierten Flugzeugtypen.

Die geflogenen Umwege liegen mit 0,54% ähnlich wie in allen anderen Simulationen ohne feste Abflugzeiten. Auch die notwendigen Änderungen der Abflugzeit liegen mit 4,2 Minuten im Durchschnitt und 27,13 Minuten im Maximum ähnlich wie in vorhergehenden Simulationen.

Die größere räumliche Trennung der Routen im Vergleich zum Transatlantischen Szenario erschwert die Formationsgenerierung größerer Formationen.

Zudem sind im Vergleich zum Transatlantischen Szenario sind im Europa-Asien Szenario mehr kurze Strecken unter 2000nm enthalten. Da auf kürzeren Strecken der Anteil der Zeit des Flugzeugs außerhalb einer Formation zunimmt ist der Nutzen von Formationsflug in diesen Strecken etwas geringer.

5. STÖHRUNG DURCH VERFRÜHTE UND VERSPÄTETE ABFLÜGE

In diesen Simulationsläufen wurde geprüft wie das auf Formationsflug optimierte System auf Verspätungen einzelner Teilnehmer reagiert.

Hierzu werden die Abflugzeiten entweder Reinzufällig bis zu einem Maximum verschoben, oder im Wechsel um dieses Maximum in Positive wie in negative Richtung verschoben.

Diese Startzeit Verschiebungen wurden dabei zum einen auf bereits an den Formationsflug angepasste Startzeiten angewandt wie auch auf Simulationen mit den Ursprünglichen Startzeiten.

Werden Zeitverschiebungen von bis zu 5 Minuten zufällig auf ein bereist für Formationsflug optimiertes Szenario angewandt entsteht ein Simulationsverlauf sehr ähnlich zum Verlauf in Simulationen mit festen Startzeiten. So wurde in der Ursprünglichen Simulation 4,7% weniger Treibstoff verbraucht und 0,5% Umwege geflogen [Kapitel 4.1]. In der Simulation mit leichten Zeitverschiebungen erhöht sich der geflogene Umweg aller Flugzeuge auf 1% durch das Warten auf die übrigen Formationsteilnehmer. Die Treibstoffeinsparungen verringerten sich auf 4,2%. Durch die Zeitverschiebungen hat sich somit die Treibstoffersparnis stärker reduziert als durch schlichtes festschreiben der Ursprünglichen Startzeiten (4,6% Treibstoffersparnis Kapitel 4.2).

Im Gegensatz zur Simulation mit festen Startzeiten sind in der Simulation mit Zeitverschiebungen die Formationsteilnehmer bereist festgelegt und sind gezwungen auch als solche in dieser Formation zu fliegen. Entsprechend verbrauchen einige wenige Formationen sogar mehr Treibstoff im Vergleich zu Direktflügen der einzelnen Teilnehmer ohne Formation.

Sind diese Zeitverschiebungen rechtzeitig bekannt können die Formationen neu zugewiesen werden und die Unterschiede zur Simulation mit festen Startzeiten verschwinden fast vollständig. Mit 2235 Flügen finden ähnlich viele Flüge eine Formation (2228 in Kapitel 4.2). Ebenso unterscheiden sich die Werte für die Treibstoffersparnis und die geflogenen Umwege erst in den hinteren nachkommastellen.

In einer weiteren Simulation wurden die jeweils Zeitverschiebungen von 5 Minuten innerhalb einer Formation im Wechsel positiv und negativ aufgetragen. Mit einer Treibstoffersparnis von 4,2% unterscheidet sich diese Simulation kaum von der Vorhergehenden. Der größte unterschied findet sich in der Verspätung am Zielort. Da sich die größte Verspätung innerhalb einer Formation auf alle anderen Teilnehmer überträgt sind alle Flüge die im Wechsel um 5 Minuten positiv und negativ verschoben wurden am Ende 5 Minuten verspätet am Zielort. Flüge in einer Simulation mit zufälligen Verschiebungen von maximal +/- 5 Minuten verspäteten

sich im Schnitt nur um 3,29 Minuten.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Unter den betrachteten Bedingungen ließ sich in allen Simulationen Treibstoff durch Formationsflug einsparen. Das Transatlantische Szenario bietet sich durch seine ohnehin dicht zusammenliegenden Routen an Formationsflug zu nutzen. Sobald die Flugrouten sich weiter verteilen können weniger Flugzeuge Formationsflug gewinnbringend nutzen. So finden im Europa Asien Szenario nur noch 55% eine Formation während im Transatlantischen Szenario über 80% Formationsflug nutzen. Jede Beschränkung der möglichen Teilnehmerzahl wie durch unpassende Flugzeugtypen oder durch größere räumliche Verteilung senkt die Gesamtzahl an Flugzeugen die Formation nutzen und auch die Treibstoffersparnis der verbliebenden Formationen.

Lange Strecken begünstigen ebenfalls den Nutzen von Formationsflug. Szenarien mit vielen kurzen Strecken profitieren weniger stark und die gebildeten Formationen sind im Durchschnitt etwas kleiner.

Zeitliche Verschiebungen der Starts sorgen für zusätzliche Umwege und somit zu geringeren Treibstoffeinsparungen bis hin zu Formationen die mehr verbrauchen im Vergleich zum Direktflug. Letzteres betrifft lediglich Formationen welche auch unter optimalen Bedingungen kaum Treibstoff sparten. Die Zeitverschiebungen in den Simulationen sind zudem relativ gering. Größere Zeitverschiebungen würden die Einsparungen weiter reduzieren.

Formationsflug sorgt zudem dafür, dass sich Verspätungen einzelner Flugzeuge auf die gesamte Formation ausweiten. Insbesondere große Formationen leiden so stärker von Zeitverschiebungen als kleinere.

7. QUELLEN

1. Maj Geno Wagner, LtCol Dave Jacques, William Blake and Meir Pachter "Flight test results of close formation flight for fuel savings" AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit 5-8 August 2002, Monterey, California
2. Thomas E. Kent and Arthur G. Richards. "Analytic Approach to Optimal Routing for Commercial Formation Flight", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 38, No. 10 (2015), pp. 1872-1884.
3. Xu, J., Ning, S., Bower, G., and Kroo, I., "Aircraft Route Optimization for Heterogeneous Formation Flight," 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA Paper 2012-1524, 2012
4. Xu, J., Ning, S. A., Bower, G., and Kroo, I., "Aircraft Route Optimization for Formation Flight," Journal of Aircraft, Vol. 51, No. 2, 2014, pp. 490–501.
5. Eurocontrol Traffic from 1.7.2011
7. Fabian Morscheck „Formation generation in huge traffic scenarios“ AIAA Aviation 2016, 13-17 June 2016, Washington, D. C.