

# PLANUNGSHORIZONTE UND IHRE AUSWIRKUNGEN AUF ROUTEN UND TREIBSTOFFERSPARNISSE IM ZIVILEN FORMATIONSFLUG IM FLUGVERKEHR ZWISCHEN EUROPA-AMERIKA, EUROPA-ASIEN UND INNEREUROPÄISCH

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 Wirbelschleppe 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.

Des Weiteren wurden in früheren Studie [5] [6] dieses Konzept auf ein Transatlantik Szenario wie auch auf ein Asien Europa Szenario angewendet und die Auswirkungen näher beschrieben. Zudem wurden die möglichen Treibstoffeinsparungen für mehrere Anwendungsvarianten abgeschätzt. Des Weiteren wurde die Reaktion des Systems auf typische Verspätungen im Luftverkehr analysiert.

Dieser Simulationsansatz wird im Folgenden weiter ausgedehnt. Zum auf ein rein Innereuropäisches Szenario um zu betrachten wie gut das Konzept des Formationsflugs Treibstoffersparnisse in einem Raum generieren kann in welchen primär Kurzstreckenverbindungen vorherrschen.

Im weiteren Verlauf wird auch der Umgang mit Verspätungszeiten verfeinert. So wird die Simulation um einen „rollenden“ Planungshorizont erweitert. Dieser kann in seinem zeitlichen Abstand zur Simulationszeit angepasst werden und wird in seinen Auswirkungen in Abhängigkeit dieses zeitlichen Abstands und in allen drei Szenarien analysiert.

## 1. MOTIVATION

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wie auch der Umweltverträglichkeit ist es heutzutage mehr denn 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 Wirbelschleppe 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 Wirbelschleppe 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 sowie einem Europa Asien Szenario untersucht wurde [7] wird in dieser Studie zusätzlich der Flugverkehr innerhalb Europas untersucht. Durch die deutlich kürzeren Strecken bietet der innereuropäische Luftverkehr eher schlechte Bedingungen

für Treibstoffersparnisse durch Formationsflug. In wie weit Treibstoffersparnisse dennoch möglich sind und in wie weit sich dieses Szenario von den ersten beiden unterscheidet soll im Folgenden dargelegt werden.

In den beiden vorhergehenden Szenario wurde ebenfalls gezeigt, dass sich auch leichte Verspätungen einzelner Flugzeuge auf das gesamte System fortpflanzen. Daher wird anhand des transatlantische Szenarios untersucht in wie weit sich dieser Effekt durch einen rollenden Planungshorizont ausgleichen lässt.

## 2. SIMULATIONSANFANG

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

Die Ausgangsdaten für alle verwendeten Szenarios stammen von Eurocontrol und beinhalten alle Flüge welche am 1.7.2011 von Eurocontrol bedient wurden.

In Früheren Studien wurde zum einen ein Szenario verwendet welche alle Flüge umfasst welche den Atlantik überqueren. Dieses Szenario wird auch in einem Teil dieser Studie Verwendung finden. Des Weiteren wurde ein Szenario verwendet welches alle Flüge zwischen Europa und Asien umfasst.

Für diese Studie wurde ein Szenario generiert welches den Flugverkehr innerhalb Europas behandelt.

Da die Routen für Flüge in einer Formation optimiert werden ergab sich ein unfairer Vergleich zu Flugzeugen die ihrer Originalroute folgen welche selten die direkte Route verwenden können. 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.

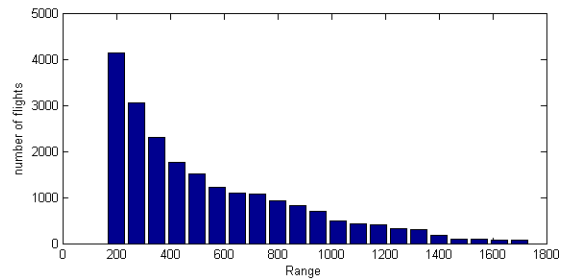


BILD 1. Streckenlängenverteilung im innereuropäischen Szenario

So ergibt sich ein Szenario mit 21116 Flügen über 48 Stunden innerhalb des europäischen Luftraums. Das Szenario beinhaltet dabei Flüge mit Strecken von unter 200NM und Strecken bis zu 1800NM (siehe Bild 1) sowie Flugzeuge vom Typ 747, 767, 777, 340, 330, 350 und 380.

Dieses Szenario ist damit deutlich größer als die früheren Szenarios welche unter 3000 Flüge beinhalteten. Die Vielzahl der möglichen Kombinationen wie auch die relativ kurzen Strecken beinhalten positive wie negative Effekte für die Anwendbarkeit von Formationsflug und werden in späteren Kapiteln genauer betrachtet.

### 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, dass 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.

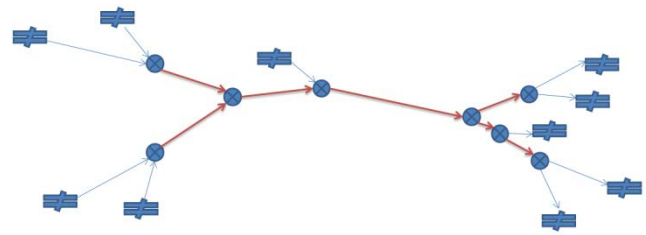


BILD 2. Aufbau einer Formation

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.

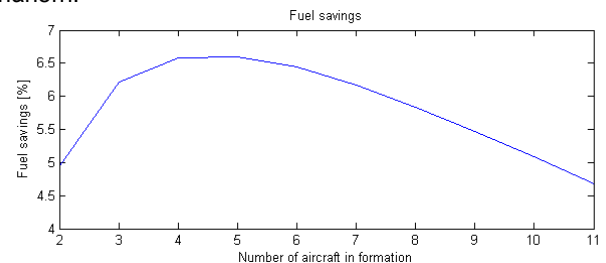


BILD 3. Treibstoffersparnis für verschiedene Formationsgrößen

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 21116 Flüge im Szenario 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 21116 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

#### 3.1. Formationssuche mit Planungshorizont

In vorhergehenden Untersuchungen [ref] wurde gezeigt das auch leichte Verspätungen sich über die Formationen auf weitere Flugzeuge fortpflanzen. Zudem müssen andere Formationsteilnehmer auf verspätete Flugzeuge warten und in dieser Zeit zusätzlich Treibstoff verbrauchen welchen man durch das Fliegen in Formation einzusparen hoffte.

In den bisherigen Untersuchungen wurden wie oben beschrieben die Formationen für den gesamten Simulationszeitraum vorab geplant.

Um die Formationen an rechtzeitig bekannte Verspätungen anzupassen wird die Suche nach passenden Formationsteilnehmern in dieser Simulation 30 Minuten vor dem Start durchgeführt solange das Flugzeug noch keiner Formation zugewiesen ist.

Die Formationssuche erfolgt dann nach dem oben beschriebenen System indem Flüge der Formation zugewiesen werden welche möglichst lange gemeinsame Strecken aufweisen. Lediglich das aktiv suchende Flugzeug wird nach der Zeitlichen Reihenfolge gewählt. Bei den zugewiesenen Flugzeugen bestimmt die Länge der gemeinsamen Annäherung die Zuweisung zu einer bestimmten Formation.

Flüge die so einer Formation zugeordnet werden müssen sich zum Zeitpunkt der Zuordnung am Boden und natürlich noch in keiner weiteren Formation befinden. Diese Flüge können entsprechend weit vor ihren Take-off einer Formation zugewiesen werden und sich in dieser Zeit eher verspäten, ohne dass die Formation noch angepasst werden kann.

### 4. ERGEBNISSE

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der innereuropäischen Simulation vorgestellt und mit den Ergebnissen der Simulationen aus den anderen Szenarien verglichen.

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 die 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 lieferten die folgenden Ergebnisse.

#### 4.1. Alle Flugzeuge gleichen Typs und flexible Startzeiten

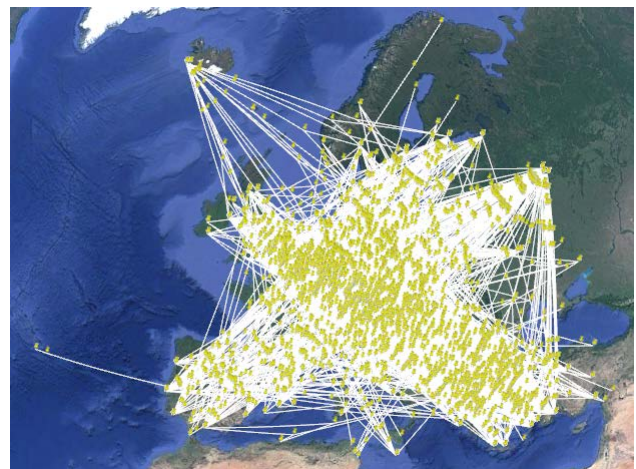


BILD 4. Gefundene Formationen mit allen Flugzeuge gleichen Typs und flexible Startzeiten

Im Gegensatz zu früheren Szenarien weist das innereuropäische Szenario keine eindeutig bevorzugte Richtung auf. Die meisten Formationen ergeben sich für die längst möglichen strecken innerhalb des europäischen Luftraums.

Im ersten Szenario sind alle Flugzeuge von gleichen typ und können somit mit jedem anderen Flugzeug eine Formation bilden. Zudem können Flugzeuge ihre Startzeit anpassen um für ihre Formation passend zu starten. Auf diese Weise ist es nicht nötig im Flug auf andere Formationsteilnehmer zu warten.

Trotz der günstigen Bedingungen nutzen lediglich 2495 von 21116 Flügen Formationsflug. Damit nutzen nur



knapp 12% aller Flüge im Szenario Formationsflug. Unter denselben Randbedingungen nutzen 83% aller Flüge im Transatlantischen Szenario Formationsflug. Selbst mit der ungünstigeren Routenstruktur zwischen Europa und Asien fanden noch 55% aller Flüge eine treibstoffsparende Formation.

Diese 12% aller Flüge bildeten im Schnitt Formationen mit 2,6 Teilnehmern welche 2,33% Treibstoff Einsparten. Ähnlich große Formationen in früheren Szenarien sparten im Schnitt 4% Treibstoff ein.

Die geflogenen Umwege halten sich mit 0,5% der Gesamtstrecke im selben Rahmen wie in den anderen Szenarien unter denselben Randbedingungen. Die durchschnittliche Zeitverschiebung von 3,28 Minuten liegt sogar etwas niedriger als im vergleichbaren Transatlantik Szenario. Die größte Startzeitverschiebung in diesem Szenario liegt bei 27 Minuten.

#### 4.2. Alle Flugzeuge gleichen Typs und feste Startzeiten



BILD 5. Gefundene Formationen mit allen Flugzeuge gleichen Typs und feste Startzeiten

Wie in früheren Szenarien sorgt die Fixierung der Startzeiten für zusätzliche Umwege (Warteschliefen). Durch die zusätzlichen Umwege sinkt die Treibstoffersparnis durch Formationen. Zudem werden auch einige Formationen nichtmehr lukrativ und entsprechend nicht mehr gebildet.

195 Flugzeuge beteiligen sich in diesem Szenario nicht länger an Formationen, so dass 2300 Flugzeuge weiterhin Formationen bilden. Diese sind mit 2,4 Flugzeugen pro Formation etwas kleiner und sparen mit knapp 2% weniger Treibstoff ein.

Die vergrößerten Umwege von 0,75% der Strecke sind Hauptquelle der Einsparungsverluste in diesem Szenario. Die Unterschiede zwischen Festen und Flexiblen Startzeiten konnten in derselben Größenordnung in den vorhergehenden Szenarien beobachtet werden.

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



BILD 6. Gefundene Formationen mit Flugzeuge gleicher Serie werden auf die Modernste Variante geändert und flexible Startzeiten

Durch mehr Flugzeugtypen im System verringert sich die Auswahl an möglichen Formationspartnern. Im Gegensatz zu früheren Langstreckenszenarien weist das Innereuropäische Szenario noch eine größere Bandbreite an Flugzeugtypen auf, so dass die Auswahl zusätzlich eingeschränkt wird auch wenn alle Flugzeuge zumindest auf den neusten Typ ihrer Reihe aktualisiert wurden.

So nutzen lediglich 1415 Flugzeuge Formationsflug. Die von ihnen gebildeten Formationen haben im Schnitt 2,33 Teilnehmer. Da die geflogenen Umwege durch die flexiblen Startzeiten bei 0,5% verbleiben sparen diese Formationen mit 2,1% wieder über 2% an Treibstoff. Durch die geringere Teilnehmerzahl sinkt die durchschnittlich notwendige Startzeitverschiebung auf 3,16 Minuten.

Werden zusätzlich die Startzeiten fixiert resultieren die zusätzlichen Umwege in nur noch 1250 Flugzeugen die einer Formation angehören. Diese Fliegen fast 0,8% Umwege und sparen lediglich 1,8% Treibstoff.

#### 4.4. Originale Flugzeugtypen und flexible Startzeiten

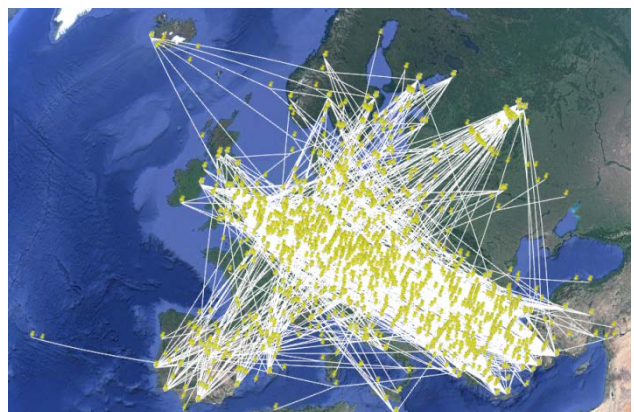


BILD 7. Gefundene Formationen mit originalen Flugzeugtypen und flexible Startzeiten

Die Verwendung der originalen Flugzeugtypen in der Simulation schränkt die Auswahl möglicher

Formationspartner weiter ein. Da das Szenario ohnehin bereits eine Größe Vielfalt besaß wirkt sich diese weitere Einschränkung weniger stark aus.

1130 Flugzeuge finden noch eine für sie nützliche Formation. Formationen beinhalten im Schnitt 2,27 Flugzeuge und sparen 2,1% Treibstoff bei 0,5% Umwegen. Die notwendige durchschnittliche Zeitverschiebung bleibt mit 3,13 Minuten fast konstant. Im ungünstigsten Szenario mit zusätzlich festen Startzeiten finden lediglich 951 von 21116 Flugzeuge Formationen die Treibstoff einsparen. Somit nutzen nur 4,5% aller Flüge in diesem Szenario Formationsflug.

Die gezeigten Auswirkungen von Einschränkungen in Form fixer Startzeiten oder eingeschränkter Partnerauswahl haben sich in ähnlicher Art bereits in früheren Simulationen gezeigt. Auffällig hingegen ist der geringe Nutzen von Formationsflug selbst im für Formationsflug optimalen Szenario. Um dies näher zu beleuchten wird im Folgenden die Streckenlängenverteilung betrachtet.

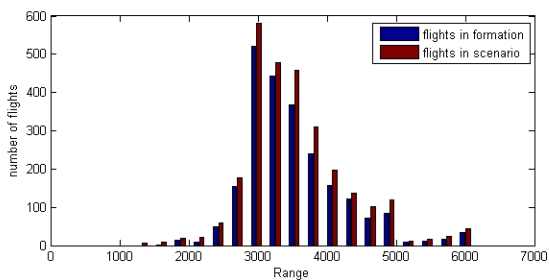


BILD 8. Streckenverteilung im transatlantischen Szenario

Bild 8 zeigt die Verteilung der Streckenlängen im Transatlantischen Szenario. Die roten Balken zeigen hierbei die gesamte Anzahl an Flugzeugen im Szenario in einem bestimmten Streckenlängenbereich. Die blauen zeigen jene Flugzeuge in diesem Bereich welche Formationsflug nutzen. Die 83% Flugzeuge welche Formationsflug in diesem Szenario nutzen verteilen sich grob über alle im Szenario vorkommenden Streckenlängen.

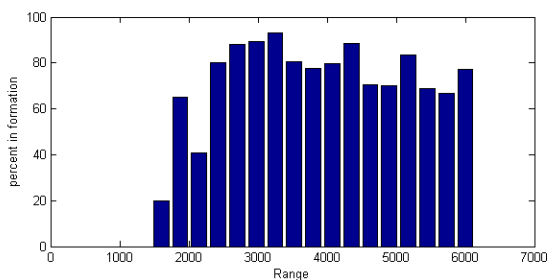


BILD 9. Streckenverteilung im transatlantischen Szenario als Anteil aller Flugzeuge im Szenario

In Bild 9 lässt sich erkennen dass der Nutzen von Formationsflug in diesem Szenario für Strecken unter 2000 NM merklich abnimmt.

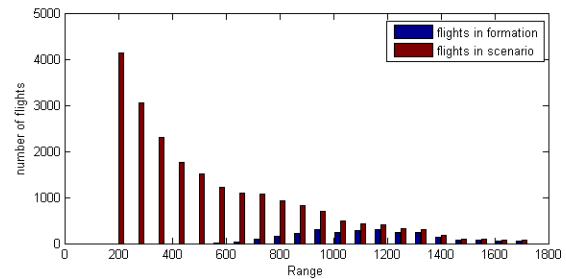


BILD 10. Streckenverteilung im innereuropäischem Szenario

Im Gegensatz zum transatlantischen Szenario liegen fast alle Routen im innereuropäischen Szenario unter 2000 NM (Bild 10). Bild 10 zeigt zudem dass Flüge unter 600 NM Formationsflug nutzen. Diese Flüge haben nur einen sehr kurzen Teil ihrer Strecke um einer Formation überhaupt beitreten zu können. Zudem sind Formationen in diesen Simulationen auf den Reiseflug begrenzt und die Zeit die ein Flugzeug benötigt um einer Formation beizutreten ist eher konservativ geschätzt.

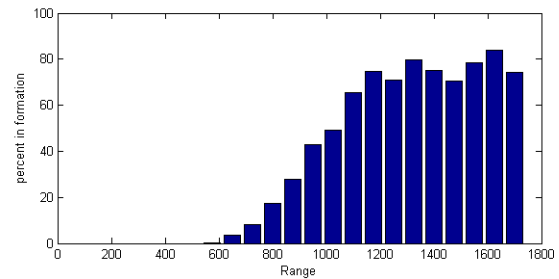


BILD 11. Streckenverteilung im innereuropäischem Szenario als Anteil aller Flugzeuge im Szenario

Bild 11 zeigt dass Flugzeuge mit einer Strecke über 1100 NM zu über 70% Formationen finden in welchen sie Treibstoff einsparen können. Im innereuropäischen Szenario finden in diesem Bereich sogar mehr Flugzeuge eine Formation als im transatlantischen Szenario. Die sehr große Menge an Flugzeugen in diesem Szenario ermöglicht es auch diesen vergleichsweise kurzen Strecken noch sinnvoll Formationsflug zu nutzen. Noch kürzeren Flügen, welche die große Mehrheit der Flüge in diesem Szenario darstellen, gelingt es trotz der hohen Anzahl geringer werdender Strecke immer schlechter noch gewinnbringende Formationspartner zu finden. Ein schnelleres Beitrittsmanöver sowie eine Formationsbildung bereits im Steig und Sinkflug könnte die Schwelle ab der Formationsflug nützlich ist noch weiter absenken.

## 5. STÖHRUNG DURCH VERFRÜHTE UND VERSPÄTETE ABFLÜGE

In einer früheren Simulation wurde das Transatlantische Szenario mit zufälligen Startzeitverschiebungen von bis zu +/-5 Minuten beaufschlagt. Diese Verschiebungen bewirkten eine Erhöhung der zu fliegenden Umwege und somit eine geringere Treibstoffersparnis durch Formationsflug. Da bereits geplante Formationen geflogen werden müssen sind die Auswirkungen neuer Verschiebungen stärker als die Festsetzung der

Startzeiten. So wurde in der Ursprünglichen Simulation 4,7% weniger Treibstoff verbraucht und 0,5% Umwege geflogen. 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%. Die Simulation mit festen Startzeiten ergab eine Treibstoffersparnis von 4,6%. In einer weiteren Simulation wurden neue Formationen welche die verschobenen Startzeiten bereits einbeziehen gebildet. Dieses Szenario lieferte mit einer Treibstoffersparnis von 4,6% ein Ergebnis wie die Simulation mit festen Startzeiten.

Viele Ursachen für eine Startzeitverzögerung lassen sich bereits im Vorlauf erkennen. Daher könnte es sinnvoll die Formationsplanung so spät wie möglich durchzuführen und so mögliche Verzögerungen bereits mit ein zu planen. Statt wie bisher die Planung mit dem vielversprechendsten Kandidaten zu beginnen welcher die längste Strecke in relativer Nähe zu einem Formationspartner verbringt wird die Planung nun in zeitlicher Reihenfolge durchgeführt wie in Kapitel 3 beschrieben.

In einer ersten Simulation wurde die Formationsplanung mit einem Planungshorizont durchgeführt. Die Startzeiten wurden in diesem Szenario nicht angepasst. Sie verblieben wie an ihrem Ursprünglichen Tag. Sie konnten auch von der Formationsoptimierung nicht verändert werden. Bis auf die geänderte Planungsreihenfolge entspricht diese Simulation einer Simulation mit festen Startzeiten.

In dieser Simulation fanden 2231 Flugzeuge von 2776 eine gewinnbringende Formation. Im Ursprünglichen Szenario mit festen Startzeiten und dem bisher genutzten Planungsverfahren fanden 2228 minimal weniger Flugzeuge eine Formation. Mit 3,1 Flugzeugen pro Formation sind die Formationen ähnlich groß wie die mit festen Startzeiten in der Ursprünglichen Planungsart. Die geflogenen Umwege bleiben mit 0,7% im selben Bereich. Dennoch spart die neue Planungsmethode mit 4,5% Treibstoffersparnis leicht weniger ein. Wie oben erwähnt kam die Ursprüngliche Planung auf eine Treibstoffersparnis von 4,6% bei festgesetzten Startzeiten. Die ursprüngliche Methodik bevorzugt vielversprechende Kandidaten und bewirkt so etwas bessere Ergebnisse auch wenn minimal weniger Flugzeuge von Formationsflug profitieren. Beide Methoden versuchen lediglich gute Formationen aus der sehr großen Zahl an Möglichkeiten zu finden und stellen keine optimale Lösung des Problems dar. Lediglich das Startflugzeug für die Formationssuche wird auf andere Art bestimmt. Entsprechend gering sind die Unterschiede beider Methoden.

Im nächsten Schritt wurde das Szenario wieder mit Verspätungen zu verschiedenen Zeitpunkten belegt. Diese blieben ohne größere Auswirkungen solange sie vor dem Zeitpunkt der Planung stattfanden. Verspätungen von +/- 5 Minuten nachdem die Planung durchgeführt wurde ergaben Treibstoffersparnisse von 4,2% und wirkten sich damit ähnlich aus wie ähnliche Verschiebungen im Ursprünglichen Szenario. Verspätungen 15 Minuten vor dem Planungsmoment wiederum verschlechterten die Treibstoffeinsparungen auf 4,4%. In diesem Fall wurde die Verspätung des ersten Flugzeugs zwar berücksichtigt, später startende Flugzeuge konnten aber noch verspätet sein und so die übrige Formation beeinflussen.

Die neue Planungsart unterscheidet sich somit nur geringfügig von vorhergehenden Simulationen. Sie kann

aber frühzeitig bekannte Verzögerungen mit einbeziehen und die Formationen korrigieren. Zudem kann sie zu jedem Zeitpunkt eines Szenarios gestartet werden und benötigt lediglich die Flugbewegungen der nächsten Stunden um alle in Frage kommenden Formationspartner zu erfassen. Sie ist somit in einer Echtzeitsimulation leichter umsetzbar als die Ursprüngliche Planungsmethodik.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Auch im innereuropäischen Szenario konnte unter den betrachteten Bedingungen Treibstoff eingespart werden. Im Vergleich zu früheren Simulationen konnte aber deutlich weniger Treibstoff eingespart werden. Zudem nutzen deutlich weniger Flugzeuge Formationsflug. In allen bisherigen Simulationen sparten jene Formationen am meisten Treibstoff ein welche über eine möglichst lange Zeit in einer Formation fliegen konnten ohne dabei große Umwege auf sich zu nehmen. In diesen Simulationen wird die mögliche Formationsgröße in ihren Nutzen lediglich durch die zum beitreten notwendige Zeit limitiert und die Begrenzung auf den Reiseflug. Ohne diese Grenzen wären Formationen schlicht so groß wie möglich gebildet da gekoppelte aerodynamische Effekte in diesen Simulationen nicht weiter berücksichtigt werden. Durch die zeitliche Länge der Manöver zum Beitritt und zum Verlassen einer Formation ergibt sich eine optimale Formationsgröße (im sehr optimalen Fall und 3000 NM Strecke eine Formation von 5 Teilnehmern). Ebenfalls ergibt sich, dass kurze Strecken nicht von Formationsflug profitieren können da sie ohnehin kaum Zeit im Reiseflug verbringen und in dieser Zeit kaum einer Formation beitreten können. Hinzu kommen notwendige Umwege um überhaupt mit einem anderen Flugzeug eine Formation bilden zu können.

Für die gesetzten Bedingungen sind viele Strecken im innereuropäischen Szenario schlicht zu kurz um durch Formationsflug Treibstoff zu sparen. Schnellere Beitritts- und Verlassensmanöver könnten es mehr Flügen ermöglichen Formationsflug zu nutzen. Dennoch werden besonders Szenarien mit sehr langen dicht beflogenen Strecken von Formationsflug profitieren während Szenarien mit vielen kurzen Strecken trotz ihres dichten Verkehrs für Formationsflug eher ungünstig bleiben.

Die Durchführung der Planung nach einem zeitlichen wandernden Planungshorizont statt mit dem vielversprechendsten Kandidaten zu beginnen verschlechterte das Resultat nur geringfügig. Eine spätmöglichste Planung sorgt zudem dafür, dass vorher entstandene Verzögerungen mit in die Planung einfließen können. Da aber viele weitere Elemente jenseits der Formation von einem frühzeitig bekannten Flugplan abhängig sind ist eine sehr kurzfristige Formationsplanung wenig realistisch. Durch das vergleichbare abschneiden der Formationssuche nach zeitlicher Reihenfolge im Vergleich zur früheren Methode kann diese genutzt werden um Echtzeitszenarien mit Formationsflug zu planen und zu simulieren.

## 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.

8. Fabian Morscheck „Ziviler Formationsflug im Transatlantik Vrekehr und zwischen Europa und Asien. Treibstoffersparnis und Robustheit des Systems“ DLRK 2017, 5.-7. September 2017, München