

Der „lose“ Formationsflug unter Flugsicherungsaspekten

A. Knoll⁺, S. Steger⁺, M. Heni^{*}

⁺ Hochschule München

^{*} SILVER ATENA Electronic Systems Engineering GmbH

ZUSAMMENFASSUNG

Beim aktuellen Flugbetrieb sind Verkehrsflugzeuge oftmals nicht imstande in der verbrauchsoptimalen Flughöhe zu fliegen. Einer der Gründe hierfür ist eine Kapazitätsbeschränkung in den bei Jets häufig nachgefragten Flughöhen zwischen 30.000 ft und 40.000 ft. Diese Kapazitätsbeschränkung ergibt sich durch die relativ großen Stafflungsabstände zwischen den hintereinander fliegenden Flugzeugen. Flugphysikalische Forderungen wie die Vermeidung der Wirbelschleppen von vorausfliegenden Flugzeugen erfordern zwar entsprechend große Abstände, jedoch ist es möglich Gefährdungsbereiche zu definieren in denen sich die Wirbelschleppen ausbreiten. Außerhalb dieser Bereiche, beispielsweise bei lateralem Versatz, könnten die Flugzeuge deutlich enger fliegen ohne durch Wirbelschleppen gefährdet zu sein. Eine weitere Einschränkung ergibt sich durch die aktuell angewandten Flugsicherungstechniken der Radarseparation und der sog. Procedural Control. Weitere Einschränkungen ergeben sich z.B. durch die Warnschwellen des Bord-Kollisionswarnsystems ACAS (TCAS) wie durch das analoge System der Boden-Radarüberwachung, das Short-Term Collision Alert System.

Dieser Bericht stellt neue Verfahren zum „losen“ Formationsflug von Verkehrsflugzeugen vor, die es gestatten die Aufnahmekapazität der entsprechenden Flugflächen deutlich zu erhöhen. Unter der Bedingung, dass sich die Flugzeuge innerhalb der Formation automatisch selbst separieren sind bei lateral versetzt fliegenden Flugzeugen deutlich geringere Stafflungsabstände möglich, die trotzdem noch die Minimalbedingungen der Warnsysteme erfüllen.

1. STATUS QUO

Bei fast allen modernen Jet-Verkehrsflugzeugen liegt bereits ab relativ kurzen Entfernungen die verbrauchsoptimale Flughöhe im Bereich zwischen 30.000 ft und 40.000 ft (Flugfläche FL300 bis FL400). So liegt beispielsweise beim Airbus A320 bei einem Landegewicht von 60 t ab einer Streckenlänge von knapp über 250 NM die kraftstoffoptimale Reiseflughöhe über 30.000 ft. Die maximal mögliche Reiseflughöhe dieses Musters liegt bei 39.000 ft. Bei anderen Verkehrsflugzeugen ist dies ähnlich. Dies führt in dem betroffenen Höhenbereich zu einer starken Nachfrage. Seit der Einführung der Reduced Vertical Separation Minima (RVSM) in vielen Bereichen der Welt ist in diesem Luftraum eine vertikale Stafflung von 1.000 ft, gegenüber vormals 2.000 ft, möglich. Trotzdem führt dies zu einer Massierung des Jet-Verkehrs in diesem Höhenband. Die zukünftigen

Luftverkehrsentwicklungen werden dieses Problem in naher Zukunft weiter verschärfen. Bis zum Jahr 2018 wird eine Steigerung der Luftverkehrsbewegungen um 16 % vorhergesagt¹.

Wenn es also gelänge eine wesentlich dichtere Konzentration der Flugzeuge in diesem Höhenband zu erzielen, könnte die Kapazität deutlich gesteigert werden, was aufgrund des dann günstigeren Verbrauchs deutlich zu einem nachhaltigeren Flugverkehr beitragen könnte. Um aber gleichzeitig einer Überlastung der Flugsicherung durch den dichteren Flugverkehr vorzubeugen, muss ein neues Verfahren gleichzeitig eine Verringerung des ATC-Arbeitsaufwandes erlauben. Nur dadurch wäre ein Abbau der nicht an den jeweiligen Flugzeugtyp angepassten Maximalhöhen möglich.

¹Nach dem Baseline-Szenario aus dem EUROCONTROL Medium-Term Forecast (Februar 2012)

Bei einem Höhenunterschied von 12.000 ft (FL390 gegenüber FL270) und einer Flugstrecke von 1.000 NM beträgt die Treibstoffersparnis eines Airbus A320 mit einem Landegewicht von 55 t knappe 500 kg (5,39 t gegenüber 5,86 t). Als Nebeneffekt reduziert sich die Flugzeit um 20 Minuten. [1]

1.1. Derzeitiger Ablauf der Separation

Im Höhenband zwischen 30.000 ft und 40.000 ft liegen üblicherweise Lufträume der Klassen A bis C vor, so dass die Verantwortung für die Separation der Flugzeuge bei der Flugsicherung liegt. Grundsätzlich wird derzeit zwischen drei Methoden unterschieden:

a) Procedural Control

In Lufträumen in denen keine Radarüberwachung möglich ist geschieht die Separation dadurch, dass die Flugzeuge sich an vorgegebene Streckenführungen halten müssen, Positionsmeldungen durch die Besatzung abgegeben werden und anhand der Überflugzeit über bestimmten Meldepunkten die Abstände zu den nachfolgenden Flugzeugen eingehalten werden. Dieses Verfahren wird heute u.a. immer noch über großen Meeresgebieten angewandt, wo zusätzlich oftmals noch die Kommunikation mit der Flugsicherung durch Kurzwellenfunk erschwert wird. Dabei wird das Verfahren z.B. so durchgeführt, dass alle Flugzeuge welche auf der gleichen Höhe auf einer Route, z.B. dem sogenannten North Atlantic Tracks (NAT) fliegen, dieser Route mit konstanter Machzahl folgen müssen. Die Staffelung findet dann im 10 min Rhythmus statt. Aufgrund dessen sind sehr große Abstände zwischen den Flugzeugen nötig: Z.B. ergibt sich der longitudinale Separationsabstand bei einer 10 min Staffelung mit Mach 0,8 in FL360 zu 76 NM (142 km). Auf dem Nordatlantik im Bereich der sogenannten North Atlantic Tracks (NAT) ist zusätzlich eine laterale Separation von z.B. 60 NM (111 km) erforderlich. Dies verdeutlicht wie schlecht die Ausnutzung des betreffenden Höhenbandes ist, bzw. wie oft aufgrund dessen Flugzeuge für einen längeren Zeitraum in nicht optimalen Flughöhen fliegen müssen. Abbil-

dung 1 veranschaulicht die Separation nach der Machzahl-Technik auf Nordatlantikrouten.

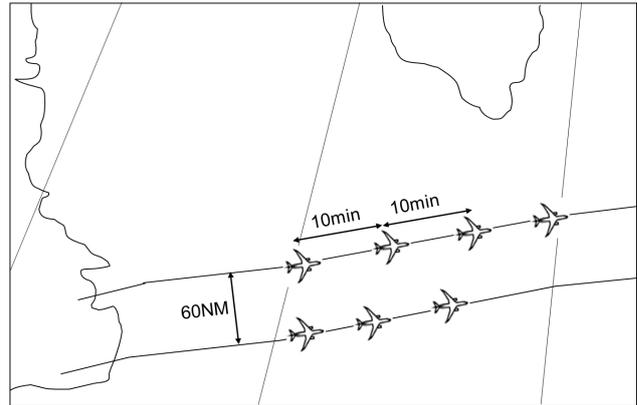


Abb. 1: Separation auf Nordatlantik-Routen, sog. NAT-Tracks.

b) Radar Control

Hierbei erfolgt die Separation durch den Fluglotsen anhand seines Radarbildes. Der Fluglotse versucht die Flugzeuge mit Funkanweisungen, die von den Besatzungen umgesetzt werden müssen, zu separieren. Dies bedeutet einen großen Zeitverzug zwischen den Flugführungsanweisungen und der Ausführung. Wird dabei ein einzelnes Radarsystem verwendet, das einen großen Bereich abdecken muss, so kann die Updaterate der Antenne z.B. zwischen 5 und 12 s liegen. Ein Flugzeug, welches mit einem Groundspeed von 460 kt (850 km/h) fliegt, legt in dieser Zeit eine Strecke von 0,6 NM (1,1 km) bis 1,5 NM (2,8 km) zurück. Zudem ist ein entsprechender Abstand zur Vermeidung der Wirbelschleppen des vorausfliegenden Flugzeugs nötig. Außerdem setzen die Kollisionsswarnsysteme eine Mindestseparation voraus.

Als Folge dieser Einflüsse beträgt der Abstand zwischen hintereinander fliegenden Flugzeugen der gleichen Gewichtskategorie im radarüberwachten Raum während des Streckenflugs derzeit minimal 5 NM (9,2 km). Eine laterale Versetzung zur Verringerung dieses Abstandes ist derzeit nicht vorgesehen.

Dies verdeutlicht, dass auch bei der Radarüberwachung eine Verringerung des Separationsabstandes schwierig möglich ist.

c) Separation anhand von Echtzeitdaten aus dem Flugzeug

Zusätzlich zu diesen beiden traditionellen Methoden der Separation durch die Flugsicherung wird zukünftig die Separation basierend auf den übermittelten Positionsinformationen der Flugzeuge an Bedeutung gewinnen. Diese Methode basiert z.B. bei „ADS-B Out“ (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast) darauf, dass jedes Flugzeug, die durch flugzeugeigene Sensoren ermittelte hochgenaue Position ausstrahlt. Diese Informationen können von der Flugsicherung dazu verwendet werden eine Separation zu gewährleisten, die auf den flugzeugeigenen Navigationsinformationen basiert. Damit sind die Unzulänglichkeiten einer Radarüberwachung speziell auf längere Entfernungen, wie die erforderliche sehr große Radarleistung, die Abschattung durch Terrain, die geringe Updaterate und die begrenzte Auflösung überwindbar. Allerdings setzt dieses Verfahren naturgemäß eine entsprechende Ausstattung aller beteiligten Flugzeuge und eine hohe Integrität der übermittelten Bordinformationen voraus. Ist diese nicht mehr gewährleistet muss auf eines der beiden anderen Verfahren zurückgegriffen werden. Nach aktuellen Forderungen ist in Europa ab Ende 2017 eine vollständige ADS-B Out Fähigkeit für alle Flugzeuge mit einer Abflugmasse größer 5,7 t vorgeschrieben. Diese soll über den Mode S Transponder der Flugzeuge zur Verfügung gestellt werden. [Verordnung (EU) Nr. 1207/2011]

Ist ein Flugzeug imstande ADS-B Signale von anderen Flugzeugen zu empfangen, so spricht man von „ADS-B In“ Fähigkeit. Dies erlaubt es den Flugzeugen auch die Positionsinformationen aller benachbarten Flugzeuge zu empfangen und zu verarbeiten. Als Übertragungssystem für ADS-B wird in Europa und den USA u.a. der Mode S Extended Squitter eingesetzt.

Eine weitere Technik, die den losen Formationsflug unterstützt, welche dafür aber nicht zwingend Voraussetzung ist, ist das System zum Nachrich-

tenaustausch zwischen Lotsen und Besatzungen (CPDLC = Controller Pilot Data Link Communication) ähnlich zu SMS. Dieses ermöglicht den Austausch sowohl standardisierter als auch komplett freier Meldungen.

Durch ADS-B sind die theoretischen Grundlagen für eine eigenverantwortliche Separation der Flugzeuge geschaffen, welche auch einen selbst koordinierten Formationsflug ermöglicht.

2. KONZEPTBESCHREIBUNG

Wie bereits geschildert kann durch einen losen Formationsflug von Verkehrsflugzeugen u.a. zusätzliche Kapazität im Höhenband zwischen FL300 und FL400 geschaffen werden. Zur Bildung einer Formation schließen sich mehrere Flugzeuge für einen definierten Streckenabschnitt zu einem Verband zusammen und bewegen sich gemeinsam durch den Luftraum:

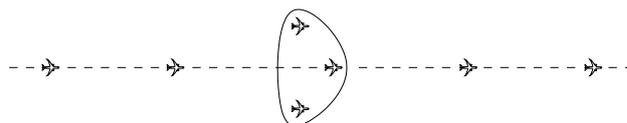


Abb. 2: Eine Formation auf einem Streckenabschnitt.

Die Abstände der Flugzeuge sind groß genug gewählt um das Kollisionsvermeidungssystem ACAS (und seine Implementierung TCAS) nicht ungewollt auszulösen, den Auf- und Abbau der Formation zu ermöglichen und auch Systemausfälle in einzelnen Flugzeugen abzudecken. Sollten sich die Voraussetzungen in der Zukunft verbessern ist möglicherweise eine schrittweise Verringerung der Distanz bis hin zu einem verbrauchs-optimalen Formationsflug denkbar, der hier jedoch nicht näher behandelt werden soll.

Innerhalb der Formation soll die Separationsverantwortung von der Flugsicherung an die Verbandsflugzeuge delegiert werden. Die Flugsicherung behält hierbei jedoch die Verantwortung für die Separation zwischen dem Verband und dritten Flugzeugen oder Verbänden. Bei diesem Konzept

²ASAS bedeutet Airborne Separation Assurance Systems (zu Deutsch: Luftgestütztes System zur Separationssicherung).

handelt es sich also um eine ASAS²-Anwendung der dritten Kategorie: Der Airborne Separation Applications (ASEP).

3. KOMPATIBILITÄT ZU SESAR UND ANDEREN FORSCHUNGSVORHABEN

Im Rahmen von SESAR³ werden weitere ASAS-Anwendungen untersucht, beispielsweise In-Trail Procedure (ATSA/ASEP-ITP), In-Trail Follow (ASEP-ITF), In-Trail Merge (ASEP-ITM) und sogar in gewissem Rahmen Self-Separation. Grundsätzlich schließen sich diese Anwendungen und das hier vorgestellte Konzept nicht aus, sondern ergänzen einander. Zum Beispiel sollen in ozeanischen Umgebungen durch ITP häufigere Höhenanpassungen ermöglicht werden um stets im optimalen Höhenband zu fliegen oder turbulente Höhen zu vermeiden. Unter anderem ist dies jedoch nur möglich, wenn die Separationsvoraussetzungen auf der Wunschhöhe dies gestatten. In Verbindung mit dem „losen“ Formationsflug könnte die Häufigkeit solcher Gelegenheiten gesteigert werden, da nun auch die Möglichkeit eines lateralen Versatzes genutzt würde.

Im hier vorgestellten Konzept werden als Datenquelle SESAR-Technologien wie ADS-B und SWIM eingesetzt. System Wide Information Management (SWIM) bezeichnet die digitale Realtime-Vernetzung der Flugzeuge in einem Netzwerk. Die durch „losen“ Formationsflug erreichbaren Verbesserungen decken sich zudem mit mehreren SESAR-Zielen: Die stärkere Nutzung von RNP (Required Navigation Performance) zur Reduzierung der Staffelung, die Erhöhung der Kapazität im Luftraum und die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes. RNP bezeichnet dabei ein Konzept, das unter Verwendung von höheren Navigationsgenauigkeiten und angepassten Streckenelementen ermöglicht genauer vorgegebenen Routen zu folgen.

4. ANFORDERUNGEN AN DEN FORMATIONSFLUG

Geplant ist eine möglichst rasche Realisierbarkeit des Systems. Aus dieser Forderung lassen sich

für den generellen Ablauf und die systemtechnische Umsetzung mehrere Randbedingungen ableiten. Diese sind:

- ✈ Die Einführung eines eigenverantwortlichen Formationsflugs.
- ✈ Dem Leader, also dem Führungsflugzeug einer späteren Formation, dürfen durch den Aufbau einer Formation keinerlei Nachteile entstehen. Dies gilt unter anderem für den Kraftstoffverbrauch, die Streckenführung, wie für die Möglichkeit beispielsweise durch Kurs-, Geschwindigkeits- oder Höhenanpassungen auf die aktuelle Wetterlage zu reagieren.
- ✈ Der Leader, wie auch alle anderen Formationsteilnehmer, dürfen durch den Formationsflug nicht gefährdet werden. Dies gilt beispielsweise in Bezug auf Kollisionsgefahren ebenso wie auf die Beeinflussung durch die Wirbelschleppe.
- ✈ Das Verfahren muss im Einklang sein mit bereits an Bord vorhandenen Warnsystemen, z.B. ACAS (TCAS).
- ✈ Für alle Flugzeuge die zur Formation hinzukommen, soll sich der Kraftstoffverbrauch verringern. Damit verbieten sich z.B. starke Abweichungen von der optimalen Fluggeschwindigkeit, Flughöhe bzw. Flugroute.
- ✈ Falls die Fähigkeit eines Flugzeugs zur Formationsteilnahme verloren geht, muss dieses mit den verbleibenden Fähigkeiten jederzeit imstande sein die Formation sicher zu verlassen.
- ✈ Die Arbeitsbelastung der Flugsicherung soll sich im Regelfall nicht erhöhen.
- ✈ Unnötige Kollisionswarnungen am Bodenradar sollen vermieden werden. Eventuell könnte aber eine Anpassung der Warnschwellen erforderlich werden, sobald die Separationsverantwortung an die Piloten übergeht.

³Single European Sky ATM Research Programme: Europäisches Forschungsprogramm für Flugsicherung.

- Die Bildung und Auflösung von Formationen muss kurzfristig möglich sein.

Abgeleitet von diesen Grundforderungen ergeben sich folgende Anforderungen:

- Um die Arbeitsbelastung der Besatzung nicht unnötig zu erhöhen muss der Flug in der Formation ebenso wie die Bildung der Formation und das Verlassen auf Bestätigung durch die Besatzung automatisch geschehen.
- Die Besatzung muss jederzeit imstande sein und auch die hierzu erforderlichen Informationen haben um die Steuerung per Hand übernehmen zu können bzw. manuell die Formation sicher verlassen zu können.
- Entsprechend der heute üblichen Systemaufteilung in Flugführungssystemen bedeutet dies, dass die Regelung von Lage, Position und Geschwindigkeit mit dem Autopiloten und dem Autothrottle/Autothrust erfolgt, während die Ermittlung der erforderlichen Sollflugbahn mit den zugehörigen Berechnungen im Flight Management System abläuft.

5. ANWENDUNGSSZENARIEN

Die Anwendung des „losen“ Formationsflugs bietet für mehrere Szenarien signifikante Vorteile gegenüber der heute gängigen Praxis. Nachfolgend werden zwei verschiedene Szenarien beschrieben und die möglichen Vor- und Nachteile hervorgehoben.

5.1. Ozeanische Routen am Beispiel der *North Atlantic Tracks*

Auf Langstreckenflügen mit einer geringen Radarabdeckung, beispielsweise auf den North Atlantic Tracks (NAT), wird eine prozedurale Separation angewandt. Die Separationsdistanzen sind hierbei sehr groß, wie oben angegeben und führen zu einer sehr schlechten Ausnutzung des betroffenen Höhenbands (siehe Abbildung 1).

Lässt man nun anstelle eines Flugzeugs einen kompakten Verband auf diesen Routen zu, ergibt sich ein sehr hoher Kapazitätsgewinn im optimalen Höhenband. Da die entsprechenden Formatio-

nen spätestens beim Einfliegen in den Luftraum gebildet werden und erst kurz vor Erreichen des Kontinents aufgelöst werden bleiben die Formationen über einen langen Zeitraum bestehen. Dadurch ist der Aufwand durch den Formationsauf- und -abbau gering und die Treibstoffersparnis schon bei einer geringen Höhenverbesserung groß.

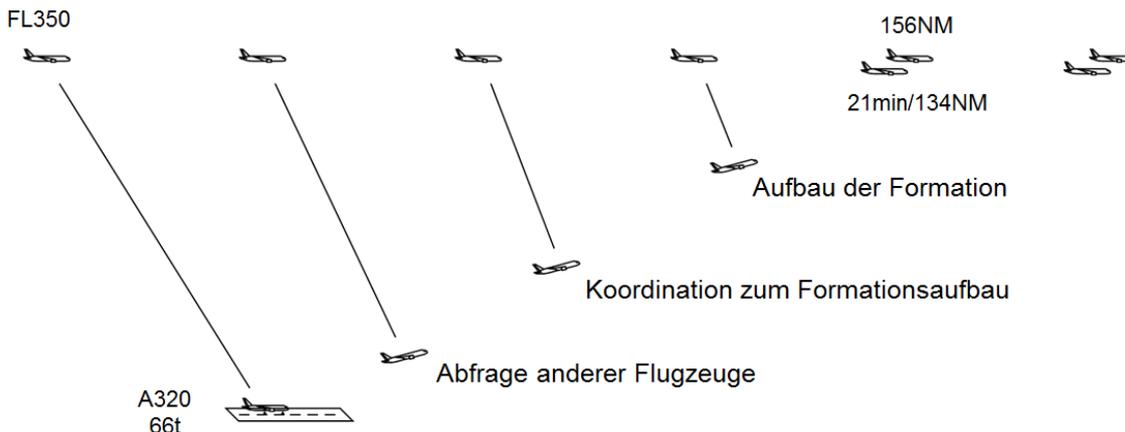
Beim Zusammenschluss kompatibler Flugzeuge mit ähnlichen Höhenprofilen sind auch gemeinsame Step-Climbs denkbar, wodurch der Kommunikationsaufwand zwischen Flugzeugen und Flugsicherung reduziert würde.

5.2. Mittelstreckenflüge

Bei Mittelstreckenflügen innerhalb Europas, werden die Formationen voraussichtlich nur für einen kurzen Zeitraum bestehen. Dies liegt daran, dass das Flugstraßennetz in Zentraleuropa sehr dicht ist und die Flugzeuge wahrscheinlich nur für kürzere Wege gemeinsam fliegen. Dementsprechend muss hier der Aufbau bzw. das Verlassen einer Formation kurzfristig möglich sein. Die gemeinsame Strecke muss hier jeweils ausreichend lang sein um eventuelle Treibstoffaufwände beim Auf- und Abbau der Formation zu rechtfertigen.

6. FORMATIONSPLANUNG

Die mögliche Geschwindigkeitsvariation eines Verkehrsflugzeuges in Reiseflughöhe ist gering. So kann z.B. der Airbus A320 in einer Reiseflughöhe von 35.000 ft (FL350) die Machzahl zwischen 0,7 und 0,82 variieren, dies entspricht einer Variation der Indicated Airspeed von 235 kt bis 280 kt. Die Geschwindigkeitsvariation über Grund beträgt 400 kt bis 470 kt (750 bis 875 km/h). Betrachtet man zudem, dass die Reisegeschwindigkeit bei diesem Muster in der Regel bei Mach 0,78 bis 0,79 liegt, kann man leicht erkennen, dass kaum Potential für Geschwindigkeitserhöhungen zur Verfügung steht. Zudem ist das Beschleunigungsvermögen in diesem Geschwindigkeitsbereich nur gering und Geschwindigkeitserhöhungen gehen mit entsprechenden Erhöhungen des Kraftstoffverbrauchs einher. Die Möglichkeit durch starke Geschwindigkeitsvariation eine Formation



Die entsprechenden Aktionen laufen automatisch ab.
Die Piloten bestätigen nur den Formationsaufbau.

Abb. 3: Formationsplanung

aufzubauen, wie im militärischen Bereich üblich, besteht also nicht. Variationsmöglichkeiten bestehen also eher in einer Verringerung der Reisegeschwindigkeit, dies aber auch nur in beschränktem Maße.

Ein Airbus A320 mit einer Abflugmasse von 66 t benötigt z.B. unter ISA-Bedingungen bis zum Erreichen einer möglichen Reiseflughöhe von 35.000 ft (FL350) durchschnittlich eine Flugzeit von 21 min und eine Strecke über Grund von 134 NM. Dabei wurde vorausgesetzt, dass kein Interims-Horizontalflug auf Zwischenflughöhen erforderlich ist, die Wind- und Temperaturverhältnisse keinen Einfluss haben, etc. Würde das Flugzeug mit dem die Formation aufgebaut werden soll zu diesem Zeitpunkt mit der Long Range Cruise Geschwindigkeit von Mach = 0,78 fliegen, so würde dieses im gleichen Zeitraum eine Strecke von 156 NM zurücklegen. Das bedeutet z.B. während der zukünftige Formationspartner gerade in München startet, befindet sich das zukünftige Leadflugzeug noch 22 NM (40 km) vor München. In diesen 21 min zum Rendezvous sind kurzfristige Kursabweichungen, Verzögerungen im Abflugzeitpunkt, etc. noch nicht berücksichtigt. Dies verdeutlicht, dass eine genaue Langfristplanung zum Aufbau der Formation nicht sinnvoll ist, da zu viele unbekannte Einflussfaktoren auftreten. In

Abbildung 3 ist dies graphisch dargestellt.

Der Planungsablauf soll deshalb an folgendem Beispiel verdeutlicht werden: Das Flugzeug startet in München, steigt auf den Standardabflugrouten und anschließend entsprechend den individuellen Routen bis zu einer Höhe von z.B. 30.000 ft (FL300). Dort überprüft das System beispielsweise anhand der ADS-B Daten, ob die gewünschte Reiseflughöhe frei verfügbar ist. Ist dies der Fall steigt das Flugzeug nach Freigabe durch die Flugsicherung auf diese Höhe und führt den geplanten Reiseflug durch. Befinden sich hingegen auf dem gewünschten Flight Level bereits andere Flugzeuge überprüft das System deren Routings und vergleicht deren Position mit der eigenen vorhergesagten Position beim Erreichen von FL350. Hat eines der Flugzeuge ein Routing, das über einen hinreichend langen Zeitraum mit der eigenen Streckenführung identisch ist, so beginnt das System eine geeignete Relativstaffelung zu diesem Flugzeug, also z.B. einen losen Formationsflug, zu ermitteln. Findet sich kein geeignetes Flugzeug so verbleibt das eigene Flugzeug solange auf der aktuellen Flughöhe, bis die Flugsicherung es auf eine andere Flughöhe, möglichst die optimale Reiseflughöhe freigibt.

7. ABLAUF DES FORMATIONSAUFBAUS

Nun soll auf den prozeduralen Ablauf zum Formationsaufbau eingegangen werden. Der gesamte Ablauf lässt sich in drei unabhängigen Phasen beschreiben: Der Aufklärungs-, Aushandlungs- und Durchführungsphase.

7.1. Aufklärungsphase

In der Aufklärungsphase erfolgt die passive, und falls erforderlich die aktive Erfassung des umgebenden Flugverkehrs. Dies kann bereits auf dem Rollfeld geschehen oder auch in der Luft. Anhand der passiv ermittelten Daten (Position, Kurs, Geschwindigkeit) können bereits Flugzeuge ausgeschlossen werden, mit denen keine Rendezvous-Manöver möglich ist (siehe Flugplanung), deren Kurs zum eigenen Zielkurs verschieden sind, die auf einer ungünstigen Höhe fliegen oder einen inkompatiblen Flugzeugtyp aufweisen. Ist anhand der Vorauswahl ein geeignetes Flugzeug zum Anschluss gefunden worden, so macht es Sinn einen Teil des Flugplans abzufragen und mit dem Eigenen zu vergleichen.

Bis zum Erreichen einer gewissen Flughöhe beschränkt sich dabei die automatische Kommunikation nur auf die Informationssammlung, da der Zeitpunkt an dem die entsprechende Höhe erreicht wird noch nicht genau genug vorherzusagen ist.

Sobald die weitere Flugbahn ausreichend genau abgeschätzt werden kann, was der Erreichung einer bestimmten Flughöhe entspricht, beginnt die Selektion möglicher Formationspartner.

Decken sich die Flugpläne des anderen und des eigenen Flugzeugs für eine ausreichend große Distanz um das Anschluss- und Abtrennmanöver zu rechtfertigen, dann folgt nun der Übergang in die Aushandlungsphase.

Wie bereits erwähnt, findet der Aufbau der Formation nur statt, wenn unter Zugrundelegung der aktuellen Separationsvorschriften ein Flug auf der gewünschten Reiseflughöhe nicht möglich wäre.

7.2. Aushandlungsphase

Die Systeme beider Flugzeuge koordinieren die beabsichtigte Formation und ermitteln ein geeignetes Rendezvous-Manöver. Parallel dazu wird die aktuelle Systemqualifikation in beiden Flugzeugen überprüft. Nur wenn diese ausreichend ist, z.B. Navigationsgenauigkeit, Autopiloten und Autothrottle-Status, aktuelle Genauigkeit der Höhenhaltung (Turbulenzgrad), etc. den Anforderungen entsprechen, schlägt das System den Besatzungen in beiden Flugzeugen einen möglichen Formationsflug vor. Anschließend müssen beide Besatzungen dies per Knopfdruck bestätigen. Gleichzeitig wird ein entsprechendes Signal an die Flugsicherung übermittelt. Am Boden wird automatisch geprüft ob zur voraussichtlichen Ankunftszeit am letzten gemeinsamen Wegpunkt genügend Kapazität vorhanden ist um dieses Flugzeug aufzunehmen, oder Möglichkeiten zum Formationsanschluss bestehen. Stimmt auch die Flugsicherung zu, geht die Verantwortung für die Relativseparation nun auf die beiden Flugzeuge über. Die Warnschwellen im bodengebundenen Kollisionssystem der Flugsicherung werden entsprechend angepasst.

Von nun an wird diese Formation von der Flugsicherung nur noch als eine Einheit angesprochen, was den erforderlichen Sprach- oder Datenkommunikationsaufwand deutlich reduziert.

7.3. Durchführungsphase

Im Flight Management System des abschließenden Flugzeugs wird nun das Rendezvous-Manöver in die geplante Strecke integriert und von Autopilot und Autothrottle entsprechend umgesetzt. Über einen regelmäßigen Statuscheck werden die Voraussetzungen permanent überprüft. Sollten diese nicht mehr erfüllt sein oder eine andere Notsituation vorliegen, welche die Sicherheit beeinträchtigen könnte, so muss das betroffene Flugzeug die Formation verlassen.

Die Relativpositionen der Flugzeuge während des Formationsaufbaus hängen von den jeweiligen Steig- bzw. Reisefluggeschwindigkeiten ab. Abbildung 4 stellt den Aufbau der Formation exem-

plarisch dar, wenn die Reisegeschwindigkeit über der Steigfluggeschwindigkeit liegt. Die Darstellung zeigt die Annäherung aus Sicht des mit konstanter Reisegeschwindigkeit (z.B. $Ma = 0,79$) fliegenden zukünftigen Leaders (schwarz gekennzeichnet). Das aufschließende Flugzeug nähert sich mit der, gegenüber der Reisegeschwindigkeit geringeren Steigfluggeschwindigkeit (z.B. $Ma = 0,78$) von vorne. Hat das aufschließende Flugzeug die Sollreiseflughöhe erreicht, so beschleunigt es auf die Reisegeschwindigkeit und schließt danach seitwärts zum Leader auf.

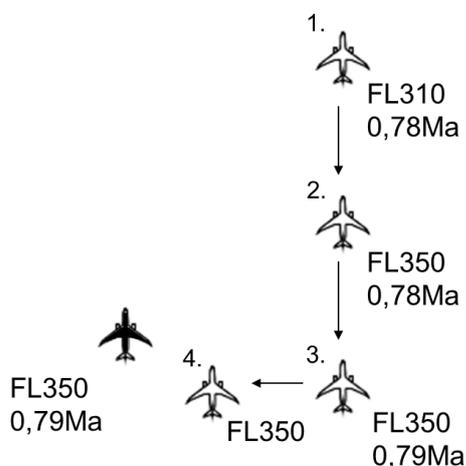


Abb. 4: Exemplarischer Aufbau der Formation.

8. AUFLÖSUNG ODER TEILUNG DER FORMATION

Die geplante Auflösung oder Teilung einer Formation findet am Ende der gemeinsamen Routenabschnitte statt. Hierzu ermittelt das System automatisch geeignete Flugbahnen um die Formation zu verlassen und die betroffenen Flugzeuge auf ihre nach Flugplan vorgegebene Flughöhe zu überführen. Die Crew und die Flugsicherung müssen dies ebenso bestätigen.

In Notsituationen oder auf Anweisung der Flugsicherung soll mindestens ein Flugzeug zu jedem beliebigen Zeitpunkt ausscheiden können. Die Kapazität für dieses Flugzeug muss zu jeder Zeit gegeben sein. Dies könnte beispielsweise durch das Freilassen eines regulären Slots hinter der Formation geschehen.

Abbildung 5 zeigt wie ein Verlassen aus einer

Formation mit 3 Flugzeugen aussehen könnte. Das Manöver ist wie zuvor aus der Perspektive der mit konstanter Geschwindigkeit weiterfliegenden schwarzen Flugzeuge dargestellt. Das weiße Flugzeug verringert seine Geschwindigkeit und fällt damit gegenüber der Formation auf den freien Platz hinter der Formation zurück. Ist die erforderliche Separation hergestellt, kann das Flugzeug z.B. wieder mit der Reisegeschwindigkeit auf eine neue Flughöhe sinken.

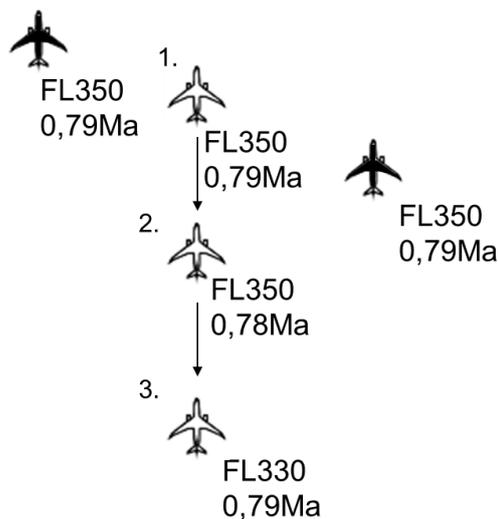


Abb. 5: Exemplarisches Verlassen der Formation.

9. ANFORDERUNGEN AN DIE FORMATIONSANORDNUNG

Zur Erfüllung der unter Kapitel 4 gestellten Forderungen können die Flugzeuge innerhalb des Verbands nicht beliebig angeordnet werden. Für die Wahl einer Formationsanordnung ist das Kollisionsvermeidungssystem ACAS (TCAS), die Ausbreitung der Wirbelschleppes und die Manövrierfähigkeit der Flugzeuge zu berücksichtigen.

ACAS beschreibt ein autonomes System, welches bei Annäherung zweier mit ACAS ausgerüsteten Flugzeuge auslöst, die Besatzung vor der bevorstehenden Kollision warnt und Ausweichempfehlungen gibt. Die verbreitetste Implementierung von ACAS ist das Traffic Collision and Avoidance System (TCAS). Um keine Warnung (Traffic Advisory) auszulösen dürfen sich zwei Verbandsflugzeuge nicht näher als 1,3 NM annähern. Um keine Ausweichempfehlung (Resolution Advisory)

hervorzurufen dürfen sich zwei Flugzeuge nicht näher als 1,1 NM aneinander annähern. [3]

Durch die Wirbelschleppe ergibt sich im Reiseflug nur eine kleine Ausschlusszone: Es ist ausreichend hinter jedem Flugzeug einen Bereich mit 10° Öffnungswinkel auszusparen.

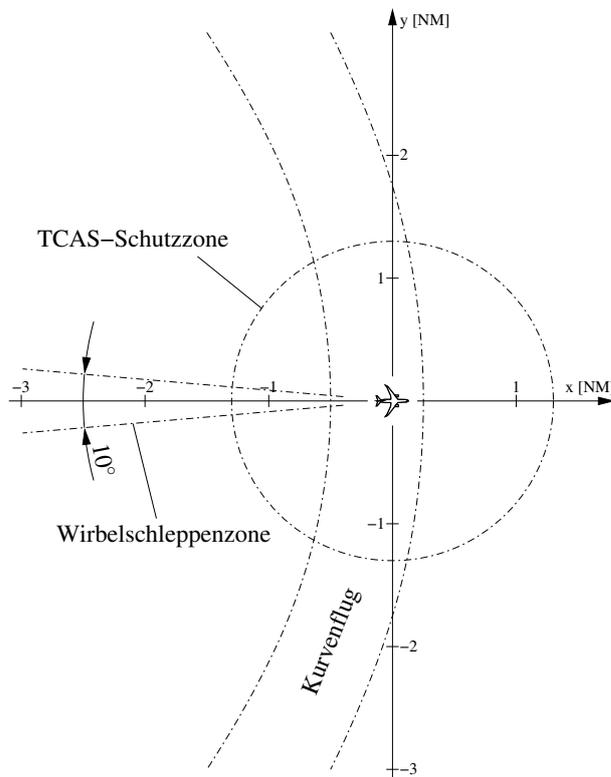
Als letzter Punkt wurde die Manövrierfähigkeit eines typischen Mittelstreckenflugzeugs untersucht. Dies war erforderlich um selbst bei einem Ausfall kritischer Systemkomponenten eine unmittelbare Kollision mit geringen Eingriffszeiten zu vermeiden. Es wurden verschiedene Manöver mit Kurvenflug, Höhen- und Schubänderungen simuliert und die Relativbewegungen aufgezeichnet. Ergebnis ist, dass selbst wenn das vorausfliegende Flugzeug unerwartete bzw. unkontrollierte Manöver durchführt, führt dies aus Sicht des nachfolgenden Flugzeugs zu einer Bewegung in einem bestimmten Bereich. Dadurch ergeben sich die in Abbildung 6 gekennzeichneten Zonen für Höhenänderungen bzw. für den Kurvenflug des vorausfliegenden Flugzeugs.

Diese Karte zeigt alle drei Ausschlusszonen. Erkennbar ist sofort, dass in der Vertikalebene keine Möglichkeit besteht im erlaubten Höhenband von ± 300 ft mehr als ein Flugzeug unterzubringen. Die Positionierung der Flugzeuge muss also in den freien Bereichen in der Horizontalebene geschehen. Die vertikale Richtung steht jedoch, innerhalb des erlaubten Höhenbands, für andere Manöver zur Verfügung.

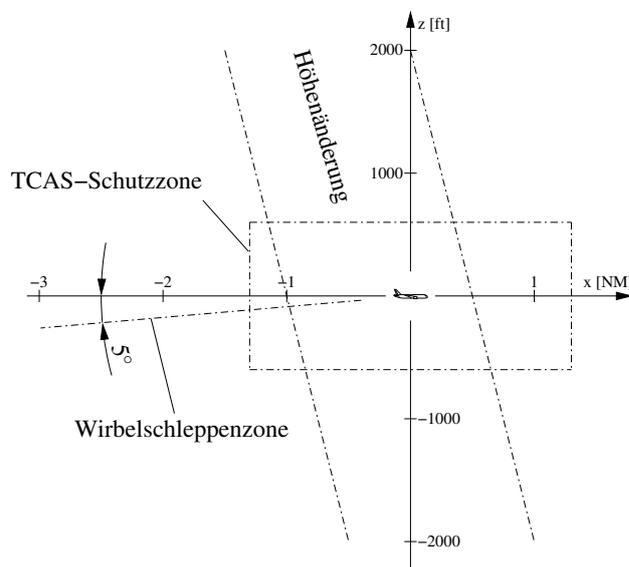
10. MÖGLICHE FORMATIONSABSTÄNDE

Neue Flugzeuge werden derzeit überwiegend für eine Navigationsfähigkeit nach dem Standard RNP 0.3 ausgelegt. Dies bedeutet, dass der kombinierte Fehler aus Navigationssystem und flugtechnischem Fehler (Autopilotenabweichungen) in maximal 5% der Zeit 0,3 NM überschreitet, was jedoch in 99,999% der Zeit erkannt wird (entspricht 10^{-5} Ausfallwahrscheinlichkeit). RNP beschreibt zwar die Navigation relativ zum Boden, trotzdem kann dieser Zahlenwert auch für die Relativpositionierung der Flugzeuge untereinander

angenommen werden, wenn alle beteiligten Flugzeuge diesem Standard entsprechen.



(a) Schnitt in der Horizontalebene



(b) Schnitt in der Vertikalebene

Abb. 6: Berücksichtigte Ausschlusszonen für die Auswahl einer Formationsanordnung.

Die Warnschwelle der TCAS-Schutzzone liegt bei 1,3 NM. Wird zusätzlich bei beiden Flugzeugen eine maximale Abweichung innerhalb des RNP 0.3

Standards angenommen, so ergibt sich damit im Falle einer parallelen Anordnung der Flugzeuge ein minimaler Abstand von $1,3 \text{ NM} + 0,3 \text{ NM} + 0,3 \text{ NM} = 1,9 \text{ NM}$. Fliegt die Formation hingegen in einer V-förmigen Anordnung wie eingangs erwähnt, so kann aufgrund des kreisrund gemessenen TCAS-Abstandes der laterale Abstand der Flugzeuge entsprechend verringert werden.

11. AUSWEICHVERHALTEN DES VERBANDS

Der Verband soll sich möglichst als eine Einheit verhalten und soll als solche durch die Flugsicherung wie ein einzelnes Flugzeug Anweisungen erhalten und ausführen können. Durch die räumliche Ausdehnung des Verbands ist dieser jedoch träger als ein einzelnes Flugzeug, was sich in den Kurvenradien und dem Einleitzeitpunkt von Kurven zeigt. Das muss bei Ausweichmanövern in der Horizontalebene berücksichtigt werden.

Höhenänderungen sind mit der gleichen Steigrate möglich, wie sie das schlechteste Verbandsflugzeug aufweist. Dadurch, dass jedes Flugzeug im Reiseflug aber ein gewisses Steigvermögen besitzen muss, ist dieses auch für den Verband anwendbar. Höhenänderungen können sofort eingeleitet werden, was wichtig für die Funktionalität von ACAS (TCAS) ist, welches nur mit Höhenänderungen arbeitet. Falls beispielsweise ein Flugzeug frontal auf den Verband zufliegt, so würde das Leader-Flugzeug die Warnung erhalten und darauf reagieren, und die restlichen Verbandsflugzeuge würden automatisch folgen.

12. VORTEILE DES VORGESCHLAGENEN VERFAHRENS

Durch den „losen“ Formationsflug bieten sich für alle am kommerziellen Luftverkehr beteiligten Parteien Vorteile.

Die Betreiber der Flugzeuge profitieren durch den Flug in optimaleren Flughöhen durch den geringe-

ren Treibstoffverbrauch und eine geringere Flugdauer, was ebenso der Umwelt zuträglich ist.

Der Passagier profitiert davon, dass durch die damit verbundene Kapazitätserhöhung unnötigen Wartezeiten vermieden werden.

Für die Flugsicherung kann durch die Betrachtung und Steuerung mehrerer Flugzeuge als eine Einheit die Arbeitsbelastung, der Kommunikationsaufwand und die Nutzung der Kommunikationskanäle gesenkt werden. Außerdem lassen sich ganze Verbände bei einem Luftraumwechsel zwischen den Kontrollzonen übergeben.

Als Voraussetzung für die weitere Umsetzung ist das Thema unter den Gesichtspunkten:

- Automatische Flugführung und -regelung
- Navigationsfähigkeiten
- Luft-Luft- und Boden-Luft-Kommunikation
- Systemtechnische Umsetzung
- Integration in bestehende Flugsicherungsverfahren

zu betrachten. Es verbleibt somit noch ein großer Forschungsaufwand, jedoch sollte dieses Verfahren mittelfristig mit überschaubarem Aufwand zu realisieren sein und würde somit zu einer Verbesserung der Nachhaltigkeit des modernen Luftverkehrs beitragen.

13. LITERATUR

- [1] Airbus, A318/A319/A320/A321 Flight Crew Operating Manual: Flight Preparation 2, Rev. 34, Nov. 2003
- [2] ICAO, Guidance concerning Air Navigation in and above the North Atlantic MNPS Airspace, NAT Doc 007, 2011
- [3] FAA, Introduction to TCAS II Version 7, Nov. 2000