

Flugregelungsanforderungen an den „losen“ Formationsflug

S. Steger⁺, A. Knoll⁺, M. Heni^{*}

⁺ Hochschule München

^{*} SILVER ATENA Electronic Systems Engineering GmbH

KURZÜBERSICHT

Die Flughöhe hat bei Jet-Verkehrsflugzeugen einen wesentlichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Aufgrund von ähnlichen Leistungsdaten liegt die optimale Flughöhe der meisten Flugzeuge im gleichen Höhenband, in etwa zwischen 30.000 ft und 40.000 ft. Die dementsprechend große Nachfrage nach diesem Höhenband sowie Beschränkungen, z.B. durch Flugsicherungsverfahren, führen zu Kapazitätsengpässen im entsprechenden Höhenbereich. Die Grundüberlegung des „losen“ Formationsflugs ist es durch eine günstige Anordnung der Flugzeuge eine wesentlich dichtere Nutzung dieses Höhenbandes zu ermöglichen. Hierzu ist es erforderlich neue Separationsverfahren anzuwenden, neue Flugführungsprozeduren zu entwickeln und Änderungen am bisherigen Flugführungssystem der Flugzeuge einzuführen, wobei das Ziel dieser Anstrengungen jeweils ist, dies mit minimalen Veränderungen zu erreichen. Während in der Veröffentlichung „Der „lose“ Formationsflug unter Flugsicherungsaspekten“ [1] auf die Flugsicherungsaspekte eingegangen wird, sollen in diesem Bericht die Anforderungen aus Sicht der Flugführungssysteme betrachtet werden.

Neben Grundsatzfragen zur günstigsten Formationsanordnung werden die vorhandenen Navigations- und Kommunikationsfähigkeiten betrachtet. Insbesondere soll geklärt werden, welche Abstände mit den Fähigkeiten derzeitiger Systeme realisierbar sind. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Ausfall einzelner Komponenten, denn in diesem Fall muss es trotz verminderter Fähigkeiten des betroffenen Flugzeuges jederzeit möglich sein die Formation zu verlassen und in eine konventionelle Separation zurückzukehren, welche keine erhöhten Systemanforderungen stellt. Daneben wird auf eine mögliche Integration in die bestehende Umgebung der Flugführungssysteme eingegangen. Dies ist insbesondere wichtig, da die bisherigen Anforderungen bezüglich der Flugführungsgenauigkeit bei Verkehrsflugzeugen im Reiseflug eher gering sind.

1. STATUS QUO

Wie in [1] gezeigt wurde, hat die Wahl der Reiseflughöhe bereits ab relativ kurzen Entfernungen einen merklichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Die verbrauchsoptimale Flughöhe liegt meist im Bereich zwischen 30.000 ft und 40.000 ft (Flugfläche FL300 bis FL400). Kann beispielsweise ein Airbus A320 einen Flug von 2:26h Dauer von Frankfurt nach St. Petersburg (ca. 1.000 NM \approx 1.800 km) in einer Reiseflughöhe von 39.000 ft durchführen, so spart er gegenüber dem gleichen Flug in einer Reiseflughöhe von 29.000 ft nicht nur ca. 500 kg Treibstoff, sondern ist zudem 20 Minuten schneller am Ziel [5].

Deshalb ist das Ziel dieser Arbeit durch Erhöhung

der Luftraumkapazität mehr Flugzeugen als bisher einen Flug in ihrer optimalen Reiseflughöhe zu ermöglichen. Dabei ist das grundsätzliche Vorgehen sowohl für den innereuropäischen als auch für den Flugverkehr nach Übersee geeignet. Die grundsätzliche Voraussetzung hierfür ist der Übergang von den bisher praktizierten Flugsicherungsverfahren der Radarführung, in radarüberwachten Bereichen (z.B. Europa) und der Procedural Control, in nicht radarüberwachten Bereichen (z.B. Atlantik) zu einer Selbstseparation der beteiligten Flugzeuge. Während im radarüberwachten Bereich der minimale Abstand zweier Flugzeuge im Reiseflug bei 5 NM liegt, treten im Transatlantik-Verkehr Abstände von z.B. 75 NM (140 km) bei einer 10 min Separation mit Mach 0,8 auf. Eine

laterale Staffelung von Flugzeugen auf der gleichen Route ist derzeit nicht vorgesehen und mit den beiden genannten Verfahren auch nicht zu realisieren. Dabei würde es doch eine laterale Separation bei wesentlich geringeren Abständen leicht ermöglichen Wirbelschleppen der vorausfliegenden Flugzeuge zu vermeiden (siehe Abbildung 1). Werden dabei gewisse Mindestabstände eingehalten, so ist dieses Verfahren zudem mit vorhandenen Systemen, wie dem ACAS (Airborne Collision Avoidance System) bzw. seiner Implementierung TCAS (Traffic Collision Avoidance System) kompatibel. Nachfolgend werden deshalb die Fähigkeiten von Navigations- und Kommunikationssystemen näher betrachtet.

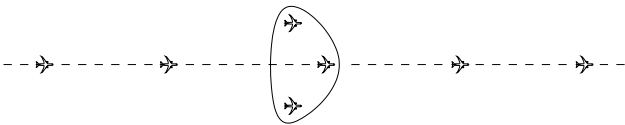


Abb. 1: Eine Formation auf einem Streckenabschnitt.

2. FÄHIGKEITEN VORHANDENER KOMMUNIKATIONSSYSTEME

Zur Realisierung des Formationsflugs ist ein Kommunikationssystem zur Koordinierung des Formationsauf- und -abbaus, sowie zur Regelung der Relativpositionen erforderlich.

Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) ist das designierte Kommunikationssystem von SESAR¹ und wichtiger Baustein des zukünftigen europäischen Air Traffic Management (ATM)-Programms. Mit „ADS-B Out“ ausgestattete Flugzeuge verbreiten in regelmäßigen Intervallen automatisch ihre Flugzeugkennung, Position, Höhe, Horizontal- und Vertikalgeschwindigkeit inklusive Genauigkeitsangaben. Die Positions- und Geschwindigkeitsangaben werden hierbei mit einer Frequenz von 1,7 bis 2,5 Hz ausgestrahlt. [3] Diese Daten können zukünftig, alternativ zur Radarüberwachung, von der Flugsicherung zur Überwachung des Luftverkehrs verwendet werden. Sie eignen sich jedoch auch zur Regelung der Relativposition der Flugzeuge innerhalb einer Formation.

Durch die Nutzung dieser Daten entsteht keine zusätzliche Belastung des Frequenzbandes. Dadurch dass alle Mitglieder einer Formation nicht zu weit voneinander entfernt fliegen, ist eine entsprechende Empfangsqualität gewährleistet.

Der ADS-B zugrunde liegende Mode S-Transponder erlaubt zusätzlich Air-Air Interrogation. Dadurch ist es möglich gezielt Informationen aus den Transponderregistern anderer Flugzeuge abzufragen. Dies könnte für die Formationsplanung genutzt werden um beispielsweise kommende Wegpunkte auszutauschen.

3. FÄHIGKEITEN VERBREITETER FLUGFÜHRUNGSSYSTEME

Für die Relativpositionierung der Flugzeuge innerhalb einer Formation ist eine regelmäßige Erfassung der Relativposition des Referenzflugzeugs zum eigenen Flugzeug erforderlich. In den Flight Management Systemen moderner Verkehrsflugzeuge ist die absolute Position als Folge der Verarbeitung verschiedener Navigationssensoren mit hoher Genauigkeit bekannt. Häufig basiert diese Position auf der Kopplung von Trägheitsnavigationssystemen und GPS. Durch die Differenzbildung der Flugzeugpositionen ergeben sich die Relativpositionen, jedoch sind diese mit Unsicherheiten verbunden: Zum einen addieren sich die Navigationsfehler beider Flugzeuge, zum anderen ist die Qualität dieser Informationen abhängig von der aktuellen Verfügbarkeit der Navigationsquellen. Um eine Aussage über die verfügbare Navigationsgenauigkeit treffen zu können wurden deshalb die verschiedenen Standards und deren Verbreitung untersucht.

Die Minimalanforderung der Flugsicherungen in Europa liegt derzeit in radarüberwachten Lufträumen bei Basic Area Navigation (B-RNAV), welche eine Navigationsgenauigkeit von 5 NM bietet. B-RNAV ist durch diese geringe Genauigkeit nicht geeignet für den hier vorgeschlagenen Formationsflug. Moderne Flugzeuge können mittlerweile jedoch viel präziser navigieren. Stand der Technik bei modernen Flugzeugen ist die Navigation mit

¹Single European Sky ATM Research Programme: Europäisches Forschungsprogramm für Flugsicherung.

RNP 0.3 (Required Navigation Performance mit maximal 0,3 NM Abweichung) bei der Verfügbarkeit geeigneter Navigationsquellen.

RNP 0.3 garantiert eine laterale Abweichung von maximal 0,3 NM für 95 % der Zeit. Dies ist relativ wenig, jedoch erkennt RNP größere Abweichungen sehr zuverlässig mit einem Versagen von maximal 10^{-5} pro Flugstunde. Mit RNP 0.3 ist eine Abweichung von mehr als dem doppelten Vertrauensbereich (2 mal 0,3 NM) mit 10^{-5} pro Flugstunde angegeben. [2]

Nachdem derzeit im Reiseflug keine hohe Positionsgenauigkeit gefordert ist, orientiert sich der RNP-Standard insbesondere am Landeanflug, beispielsweise entlang gekrümmter Routen. Dabei ist die laterale Position, z.B. zwischen Bergen, wesentlich, die Position entlang der Route aber nicht von Bedeutung. Dementsprechend regeln sowohl RNP als auch RNAV derzeit nur die Anforderungen an die laterale Positionierung.

Wesentlich ist zu bemerken, dass RNP den gesamten Fehler beschreibt, mit dem das Flugzeug der vorgegebenen Route folgt, d.h. dies umfasst sowohl den navigatorischen Fehler als auch die Ungenauigkeiten in der Bahnführung durch das Autopilotensystem. Damit ist der RNP-Standard gut für die Anwendung beim „losen“ Formationsflug geeignet, bei dem ebenso ein niedriger Gesamtfehler erforderlich ist. Im ungünstigsten Falle ist davon auszugehen, dass beide Flugzeuge gleichzeitig einen lateralen Fehler von 0,3 NM von der Sollposition haben.

Die Longitudinalposition (Position entlang der Sollstrecke) wird, wie erwähnt, von bisherigen Standards nicht beschrieben. Der Fehler des Navigationssystems ist in dieser Richtung sicherlich gleich groß wie in lateraler Richtung. Hingegen ist der Fehler des Flugführungssystems (Autothrottle/Autothrust) aufgrund der Trägheiten moderner Triebwerke und aufgrund der derzeit geringen Anforderungen wesentlich größer. Zudem wären häufige kurzfristige Schubvariationen des Triebwerks dem Gesamtverbrauch abträglich. Dies ist

in der Formationsanordnung entsprechend zu berücksichtigen, d.h. eine kurzzeitige Beschleunigung bzw. eine entsprechende Verzögerung dürfen keine kritischen Annäherungen zur Folge haben. Trotz dieser Sicherheitsmargen in der Formationsanordnung werden sich zukünftige Forschungen noch ausführlich diesem Thema widmen müssen.

Unabhängig von der bisher beschriebenen Bestimmung der Relativposition arbeitet das TCAS-System. Dieses fragt die Transponder anderer Flugzeuge ab und bestimmt dann aus der Antwort anhand einer Relativpeilung und einer Laufzeitmessung die Richtung bzw. den Abstand. Solange das TCAS-System auf diese Weise arbeitet verwendet es zwar ebenso die Transpondersignale, wie auch ADS-B. Während aber ADS-B ausschließlich die dekodierten Informationen auswertet, nutzt TCAS zusätzlich die Signalpeilung und die Laufzeitmessung. Somit sind beide Systeme komplementär zu sehen, TCAS kann also als unabhängige Überwachungsquelle genutzt werden. Der Ausfall des Transponders wäre aber eine gemeinsame Fehlerquelle, die beide Systeme betrifft. Derzeitige Verkehrsflugzeuge besitzen aber bereits zwei Transponder, wobei das zweite System bisher manuell geschaltet als Backup fungiert. Bei einer entsprechenden Einbindung des Transponders wäre deshalb zukünftig ein entsprechender Warnhinweis bei Transponderausfall an die Piloten erforderlich. Wie in einem späteren Kapitel gezeigt wird, ist jedoch auch der kurzfristige Ausfall der Informationen über die Position eines Flugzeugs zu beherrschen, da das Flugzeug seine Position nur in einem vorhersehbaren Korridor verändern kann.

4. MANÖVRIERFÄHIGKEIT IM REISEFLUG

Im Reiseflug bewegen sich Verkehrsflugzeuge oftmals an ihrer flugmechanischen Leistungsgrenze. Der fliegbare Geschwindigkeitsbereich ist stark beschränkt. Beispielsweise kann ein Airbus A320 seine Machzahl in einer Reiseflughöhe von 35.000 ft (FL350) zwischen 0,7 und 0,82 variieren. Da die Reisegeschwindigkeit dieses Typs in der Regel bei Mach 0,78 bis 0,79 liegt, ist das

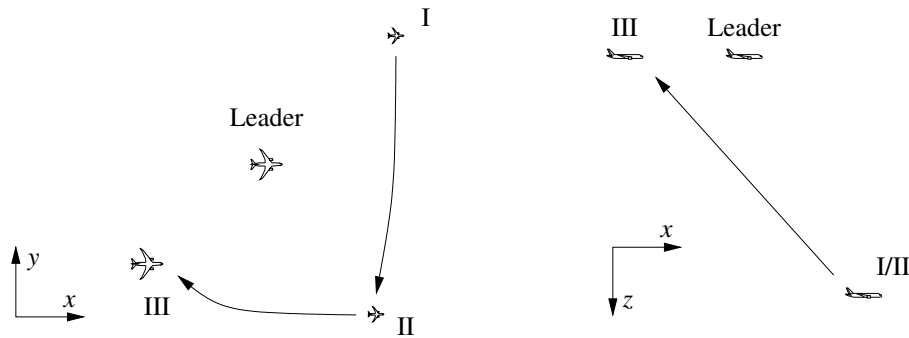


Abb. 2: Ein Manöver zur Bildung einer Formation aus Sicht des Formationsleaders. Der zukünftige Wingman wechselt zuerst auf die Seite seiner wahrscheinlichen Abtrennrichtung und schließt sich dann von vorne an den Leader an. Die Sicherheitszonen beider Flugzeuge bleiben unverletzt.

Potential für Geschwindigkeitserhöhungen geringer als für -senkungen und ist auch mit einem Anstieg des Kraftstoffverbrauchs verbunden und somit unerwünscht. Überdies reagiert das Flugzeug in Längsrichtung sehr träge.

Diese Eigenschaft eines Verkehrsflugzeugs muss sowohl für die Anschluss- und Abtrenntrajektorien, als auch den Formationserhalt berücksichtigt werden. Treibstoffintensive Manöver wie sie bei der Formationsbildung im militärischen Bereich angewendet werden sind tabu.

In Querrichtung lässt sich ein Flugzeug durch den Aufbau eines Hängewinkels bewegen. Durch die hohe Fluggeschwindigkeit und die beschränkte Querneigung ($\approx 15^\circ$) kann sich ein lateraler Versatz ebenso nur langsam aufbauen.

5. ABLAUF DES FORMATIONSAUFBAUS

Die Steiggeschwindigkeit wird meist etwas unterhalb der Reisefluggeschwindigkeit liegen. In einem mitbewegten Koordinatensystem, das am zukünftigen Lead-Flugzeug befestigt ist, würde sich dementsprechend der Formationsaufbau so darstellen, wie in Bild 2 gekennzeichnet. Das Wingman-Flugzeug nähert sich langsam von vorne und steigt dabei gleichzeitig auf die Reiseflughöhe des Leaders. Der Formationsast, an welchem der Anschluss stattfindet wird entsprechend der wahrscheinlichen Abtrennrichtung gewählt. Falls erforderlich wird daher vor dem Anstieg auf die Flughöhe des Leaders die Seite gewechselt.

Bei einem größeren Verband erlaubt dies das gleichzeitige Verlassen mehrerer Flugzeuge zur selben Zeit unter Anwendung einfacher Manöver.

6. BEENDIGUNG DER FORMATION

Im Regelfall findet die vollständige oder teilweise Formationsauflösung am Ende der gemeinsamen Wegstrecke statt. Das bedeutet, dass an einem Knotenpunkt zumindest ein Flugzeug relativ zum Leader eine Richtungsänderung vollzieht. Für den Formationsaufbau wurde die voraussichtliche Abtrennrichtung bereits berücksichtigt, das Flugzeug befindet sich also in der korrekten Formationshälfte [1] und kann mit einem einfachen Manöver aus der Formation ausscheiden (s. Abbildung 3). Das Abtrennen von der Formation ist eventuell mit einem Übergang in den Sinkflug verbunden.

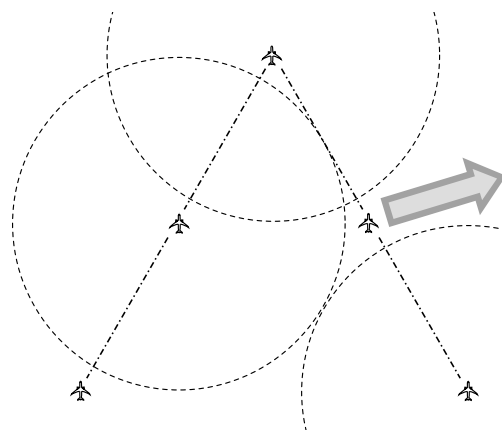


Abb. 3: Manöver eines inneren Wingman zum Verlassen einer Beispielformation. Die Kreise stellen die TCAS-Schutzzonen dar.

In Notsituationen, wie beispielsweise bei Systemausfällen oder dem Verlust der Navigationsgenauigkeit muss auch das frühzeitige Ausscheiden zumindest eines Flugzeugs ermöglicht werden. Eine Möglichkeit um eine Separation anhand der im Luftraum gültigen Separationsstandards herzustellen wäre das Freilassen eines Slots hinter der Formation. Das sich in einer Notlage befindliche Flugzeug könnte sich auf diesen zurückfallen lassen.

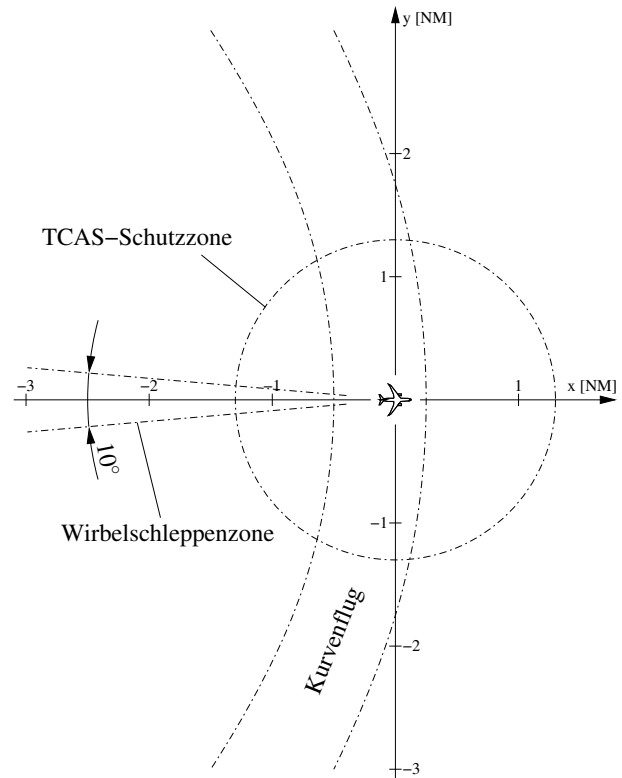
7. DIE WAHL EINER FORMATIONSANORDNUNG

Für die Anordnung der Flugzeuge innerhalb des Verbands wird eine feste, über lange Zeiträume unveränderte Formationsanordnung vorgeschlagen. Durch das Gleichbleiben der Flugzeugpositionen innerhalb der Anordnung können die Piloten und Fluglotsen schnell die Integrität des Verbands überprüfen und rasch reagieren.

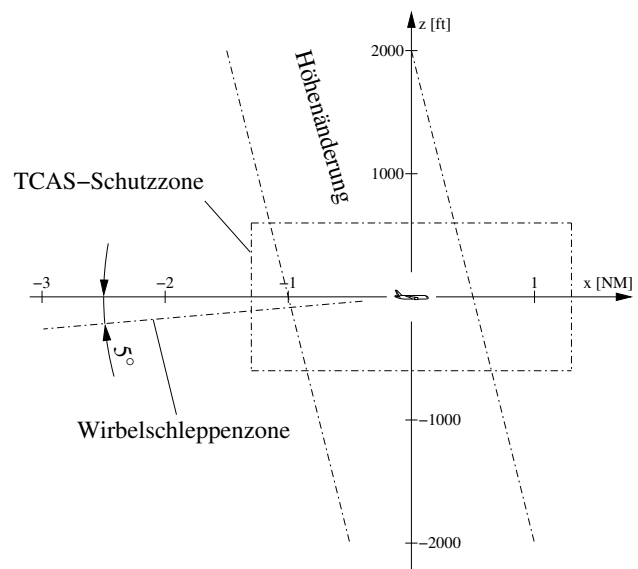
In [1] wurde bereits auf einige Anforderungen an die Formationsanordnung eingegangen. Diese Anforderungen umfassten die Nichtauslösung von TCAS durch die Berücksichtigung der Triggerschwellen, die Wirbelschleppen die sich hinter dem Flugzeug bilden und der Manövrierfähigkeit eines Flugzeugs zur Vermeidung unmittelbarer Kollisionen. Um die Flugbahn eines Flugzeugs vorhersagen zu können wurden per Simulation viele denkbare, unkoordinierte Bewegungen eines Flugzeugs simuliert und aufgezeichnet. Diese Daten sind die Basis der schematischen Abbildung 4.

Die laterale Position kann sich relativ zur Ausgangsposition nur bogenförmig ändern, wie in Abbildung 4a dargestellt. Die beiden Bögen in dieser Abbildung zeigen zudem auch den Effekt einer überlagerten Geschwindigkeitsveränderung. Dieser Bereich ist hierbei unabhängig davon, ob es sich um eine gesteuerte, eine durch Fehler oder Turbulenz verursachte Bewegung handelt. Solange sich jeder Wingman hinter diesem Bogen befindet hat eine kurzfristige ungesteuerte Bewegung keine Kollision zur Folge.

In der Grafik sind die sich ergebenden Ausschlusszonen dargestellt. Die freibleibenden Zonen aus (a) legen hierbei eine V-Formation in der Horizontalebene nahe. Eine vertikale Staffelung ist wegen des geringen Höhenbands von ± 300 ft nicht möglich ((b)).



(a) Schnitt in der Horizontalebene



(b) Schnitt in der Vertikalebene

Abb. 4: Berücksichtigte Ausschlusszonen für die Auswahl einer Formationsanordnung.

che Packungsdichte optimiert. Das Dichtekriterium definiert sich durch die Anzahl der Flugzeuge pro Streckenabschnitt. Da sich nach jetzigen Separationsstandards nur ein Flugzeug pro 5 NM aufhalten darf, ergibt sich für den Status Quo eine Dichte von 0,2 Lfzg./NM. Bei einer Formationspfeilung von 0° vervielfacht sich die Dichte mit jedem weiteren Flugzeug. Jedoch ist eine solche Formation der „worst-case“ in Hinsicht auf seine Kurvenflugeigenschaften, weshalb nach anderen günstigen Anordnungen gesucht wurde.

Als Parameter wurden hierbei der Formationsöffnungswinkel und die Flugzeuganzahl variiert. Es ergaben sich für unterschiedliche Flugzeuganzahlen verschiedene Formationsanordnungen. Bis zum 5. Flugzeug ist eine Formation mit $\alpha = 60^\circ$ der beste Kompromiss aus Dichte und Kurvenflugeigenschaft (s. Abbildung 5a). Die erzielbare Kapazität steigt mit jedem Flugzeug stetig an bis in vollständiger Besetzung das 3,3-fache des heutigen Werts erreicht wird. Bei mehr als 5 Flugzeugen verändert sich der optimale Formationspfeilungswinkel zu 75° bei 4,1-facher Kapazität für 10 Flugzeuge (Abb. 5b).

Bei noch größeren Formationen ist der Dichtezuwachs gering und die Nachteile des „losen“ Formationsflugs wachsen an. Es ist daher sinnvoller bei einer größeren Flugzeuganzahl mehrere kleinere Verbände zu formen und diese regulär zu staffeln.

8. REISEFLUG ALS VERBAND

Wie bereits geschildert stellt der gemeinsame Kurvenflug des Verbands für einen „losen“ Formationsflug ein Problem dar. Die großen lateralen Abstände der Flugzeuge voneinander führen bei der Ausführung einer Kurve mit gleicher Geschwindigkeit für jedes Flugzeug zu einer unterschiedlich langen Flugstrecke (s. Abbildung 7). Dieser Streckenunterschied lässt sich nicht vermeiden, weshalb diese Differenz abgebaut werden muss.

Im Reiseflug bewegen sich Verkehrsflugzeuge in der Nähe ihrer Leistungsgrenze. Daher ist der zur Verfügung stehende Geschwindigkeitsbereich

nur gering. So gering, dass die Flugzeit während der Kurvenausführung nicht ausreicht um den gesamten Wegunterschied auszugleichen. Da der Leader im Idealfall die gleiche Flugbahn hat wie das Flugzeug vor und das Flugzeug hinter dem Verband, beeinflusst jede Geschwindigkeitsänderung des Leaders den Abstand zwischen dem Verband und diesen beiden Flugzeugen. Außerdem ist eine Rahmenbedingung des Konzepts, dass der Verbandsleader möglichst ungestört belassen werden soll. Daher sollte die Differenz möglichst von den Wingmen kompensiert werden.

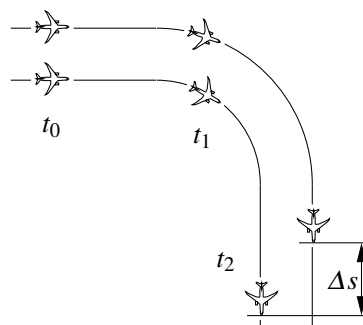


Abb. 7: Veranschaulichung des Kurvenflugproblems. Das gleiche Manöver führt bei beiden Flugzeugen zu unterschiedlichen Flugstrecken.

Wie bereits erwähnt ist die Wegdifferenz Δs abhängig vom lateralen Abstand des Wingman zum Leader d und der Richtungsänderung $\Delta\chi$, dazu kommen die Kurvenradien des Leaders r_L und des jeweiligen Wingman r_W (s. Abbildung 8). Der genaue Zusammenhang ist:

$$(1) \quad a = (d - (r_L - r_W)) \cdot \tan\left(\frac{\Delta\chi}{2}\right)$$

$$(2) \quad \Delta s = 2a + (\Delta\chi)_{\text{rad}} \cdot (r_L - r_W)$$

Für die Betrachtung des Kurvenflugs müssen die Flugzeuge innerhalb und die Flugzeuge außerhalb der Leadertrajektorie unterschieden werden. Die äußeren Flugzeuge fallen während des Kurvenflugs zurück und können nach Ausführung der Kurve langsam zur Formation aufschließen. Eine Unterschreitung der Sicherheitsabstände findet nicht statt, da sich das äußere Flugzeug von seinem inneren Nachbarn weiter entfernt. Bei einem

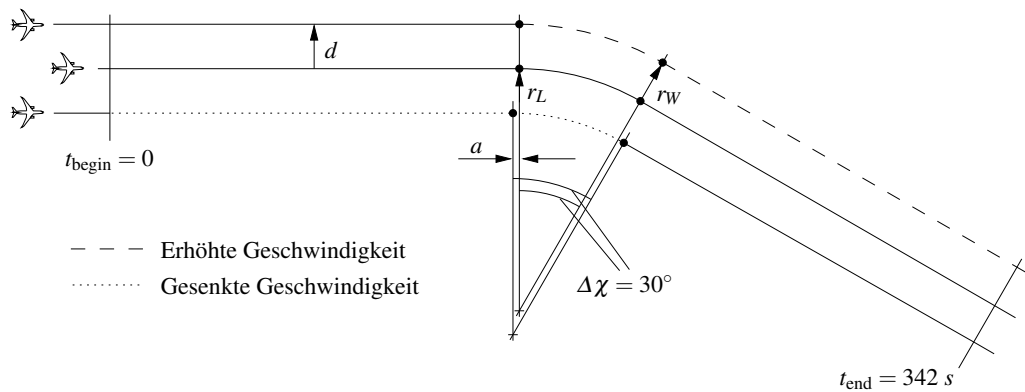


Abb. 8: Maßstabstreue Darstellung eines gemeinsamen Kurvenflugs. Die Richtungsänderung $\Delta\chi$ beträgt 30° , die durchschnittliche Geschwindigkeit der Formation 450 kts und die maximale Geschwindigkeitsvariation der Wingmen ± 20 kts.

unkoordinierten Kurvenflug würden die inneren Flugzeuge jedoch das jeweils weiter innere Flugzeug überholen oder sich zumindest annähern. Bei einer V-Formation könnte dies zu einer Unterschreitung des Sicherheitsabstands führen. Flugzeuge innerhalb des Leaders benötigen deshalb vor Einleitung der Kurve eine gewisse Rückfallzeit um sich zurückfallen zu lassen. Die Kurve muss den inneren Wingmen daher schon im Vorhinein bekannt sein.

Die Wahl der Formationsanordnung spielt eine große Rolle bezüglich der Rückfallzeiten. In einer spitzeren V-Formation führt der geringere laterale Abstand zu einer geringeren Wegdifferenz und dadurch direkt zu einer geringeren Rückfallzeit. Zusätzlich bleibt den Wingmen durch den größeren longitudinalen Abstand zum Vordermann mehr Zeit bevor sie selbst ihre Kurve einleiten müssen. Dadurch sind geringe Richtungsänderungen in diesem Fall auch ohne Vorwarnzeit möglich.

Das Formationsregelungssystem muss im Stande sein gemeinsame Kurvenflugmanöver zu planen und auszuführen. In Abbildung 8 ist dargestellt wie ein solches Manöver in der Praxis aussehen könnte. Ein Verband aus drei Flugzeugen mit einer Fluggeschwindigkeit von 450 kts (TAS) möchte eine Richtungsänderung von 30° im Uhrzeigersinn ausführen. Die Wingmen sind links und rechts vom Leader in einem lateralen Abstand von

2 NM positioniert, entsprechend den äußersten Wingmen einer 60° -V-Formation bestehend aus fünf Flugzeugen. Es wurde von einem maximalen Geschwindigkeitsbereich von ± 20 kts (TAS) ausgegangen. Die Wegdifferenz beträgt für beide Wingmen für diese Formationsanordnung und Richtungsänderung in etwa eine Nautische Meile. Wenn der Leader die Kurve mit einer Querneigung von 15° ausführt, muss der innere Wingman bereits 150 s vor Einleitung der Kurve seine Geschwindigkeit reduzieren um nach Ausführung der Kurve auf seine ursprüngliche Relativposition zu gelangen. Der äußere Wingman benötigt nach Ausführung der Kurve 140 s um zur Formation aufzuschließen.

In der Abbildung sind für die drei verschiedenen Kreissegmente zwei unterschiedliche Kreismittelpunkte eingezeichnet. Dadurch, dass die Querneigung im Reiseflug auf 15° begrenzt ist und der innere Wing diese beim Flug einer konzentrischen Kurve in diesem Beispiel überschreiten würde, muss er seine Kurve um die Distanz a (s. Gl. 1) früher einleiten um seinen Relativabstand einzuhalten.

Das genannte Beispiel ist ein Worst-Case-Szenario, da die Formation maximal besetzt ist und hier der begünstigende Effekt von V-Formationen mit hoher Formationspfeilung nicht berücksichtigt wurde.

9. SYSTEMTECHNISCHE UMSETZUNG

Die Anwendung des geschilderten Konzepts durch ein automatisches System stellt an dieses System zwei unterschiedliche Aufgaben: Das Formationsmanagement und die Relativpositionsregelung.

Das Formation Control System überwacht stets die relative Position und Distanz des eigenen Flugzeugs zum Führungsflugzeug und erzeugt Inputs für das Auto Flight System um die Sollposition und -position beizubehalten. Es ist hauptsächlich während des Formationsflugs aktiv. Für alle Planungsaspekte des Formationsflugs ist das Formation Management System verantwortlich. Diese umfassen die Koordinierung des Formationsaufbaus und die Reaktion auf ungeplante Ereignisse. Das Zusammenspiel dieser beiden Systeme ist in Abbildung 9 abgebildet. Als unabhängiges Kontrollsystem kommt TCAS zum Einsatz.

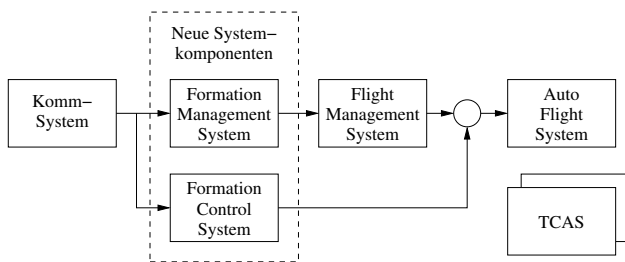


Abb. 9: Systemtechnischer Aufbau des Formationsreglers.

9.1. Formation Control System

Die Formation ist nach dem sogenannten Leader-Follower-Prinzip organisiert. Jeder Follower (hier: Wingman) hat hierbei ein Referenzflugzeug an dem er sich orientiert. Dies ist entweder immer der Leader (absolut) oder jeweils der nächst innere Wingman (relativ). Da der Regler reagieren soll, wenn der nächst innere Wingman sich unabhängig vom Leader bewegt ist letzte Variante zu bevorzugen. Unglücklicherweise führt dies zu einer Verkettung von Trägheiten, wodurch sich ein schwingungsfähiges (und bei großen Formationen ein möglicherweise instabiles) System bildet, was bei der absoluten Variante nicht zutreffen würde. ADS-B Out stellt jedem Flugzeug die wichtigen Daten aller Verbandsflugzeuge zur Verfügung

und erlaubt somit die Überwachung mehrerer Referenzflugzeuge und die Nutzung der Vorteile beider Varianten.

Als Eingangsgrößen dienen dem Formation Control System die horizontale Position, Höhe und Geschwindigkeiten des Referenzflugzeugs und des eigenen Flugzeugs. Die Daten des anderen Flugzeugs stammen aus dessen ADS-B Out-Nachrichten, die maximal alle 0,4 bis 0,6 s ausgestrahlt werden. Somit muss für dieses Flugzeug eine Bewegungsvorhersage aus der letzten Position und Geschwindigkeit durchgeführt werden.

Die einzige Möglichkeit zur Regelung des longitudinalen Abstands ist die Steuerung des Triebwerksschubs und ist somit sehr hohen Trägheiten unterworfen. Zusätzlich entstehen hier auch eventuelle Treibstoffmehrerbräuche. Es ist daher sinnvoll Bewegungen (die schon bei geringen Turbulenzen auftreten) in einem gewissen Bereich zuzulassen und erst bei großen Überschreitungen stark gegen zu steuern, also nichtlineare Regelgesetze zu verwenden. Die Kenntnis der Fluggeschwindigkeit des Referenzflugzeugs ist hierfür hilfreich.

Für die laterale Positionierung sollte die Navigationsgenauigkeit von RNP 0.3 für alle Flugzeuge ausreichen. Bei Verlust der Navigationsgenauigkeit ist stets noch TCAS aktiv, welches direkt den Abstand zu den umgebenden Flugzeugen überwacht.

9.2. Formation Management System

Die Aufgaben der Management- und Planungskomponente sind zahlreich. Es ist für die automatische Luft-Luft- und Boden-Luft-Kommunikation zuständig und berechnet Anschluss- und Abtrenntrajektorien zum Beitreten und Verlassen der Formation. Vor dem Formationsaufbau führt es die Rentabilitätsabschätzungen durch und informiert die Crew über potentielle Partner. Im Prozess des Formationsaufbaus berechnet es einen zum Referenzflugplan verschobenen Flugplan und fügt die Anschluss- und die voraussichtliche Abtrenntrajektorie hinzu. Dabei werden auch gemeinsame

Richtungsänderungen eingeplant (vgl. Kap. 9).

Während des Formationsflugs reagiert das Formation Management System auf ungeplante Ereignisse, wie beispielsweise dem vorzeitigen Ausschneiden eines anderen Flugzeugs aus der Formation, der Aufnahme eines weiteren Flugzeugs oder Routenänderungen des Leaderflugzeugs. Falls ein Ereignis Auswirkungen auf den Betrieb des Formation Control Systems haben sollte, stellt das Formation Management System die erforderlichen Daten zur Verfügung.

10. FAZIT & AUSBLICK

In dieser Arbeit wurde beschrieben was heutige Avioniksysteme leisten können, welche Einschränkungen diese mitbringen und wie dennoch auf deren Basis ein loser Formationsflug ermöglicht werden kann um den Kapazitätsproblemen von heute und morgen zu begegnen. Dazu wurden verschiedene Formationsanordnungen betrachtet und anhand verschiedener Kriterien eine geeignete Anordnung ausgewählt, die für die Einsatzszenarien geeignet sind. Zuletzt wurde ein allgemeiner Vorschlag für die systemtechnische Umsetzung vorgestellt, welcher aufbauend auf den bereits vorhandenen Systemen einen auto-

matischen Formationsflug ermöglichen könnte.

Bisher noch nicht betrachtet wurde die reale Implementierung eines solchen Systems als Nachrüstsystem für Verkehrsflugzeuge, insbesondere die technische Anbindung an das Auto Flight und Flight Management System. Weitere Themen sind ein detaillierterer Reglerentwurf, sowie die Simulation von Verbänden unter Störeinflüssen und Systemausfällen.

11. LITERATUR

- [1] A. Knoll, S. Steger, M. Heni, Der „lose“ Formationsflug unter Flugsicherungsaspekten, DLRK 2012
- [2] ICAO, Performance-based Navigation (PBN) Manual, Doc 9613, third edition, 2008
- [3] ICAO, Aeronautical Telecommunications – Surveillance and Collision Avoidance System, Annex 10 – Vol. IV, fourth edition, 2007
- [4] ICAO, Guidance concerning Air Navigation in and above the North Atlantic MNPS Airspace, NAT Doc 007, 2011
- [5] Airbus, A318/A319/A320/A321 Flight Crew Operating Manual: Flight Preparation 2, Rev. 34, Nov. 2003