

AUTONOME ORGANISATION DES FORMATIONSFLUGS UNBEMANNTER FLUGZEUGE

J. Beck, Dr. A. Knoll
Flugdynamik, Military Air Systems, EADS Deutschland GmbH
81663 München

1. EINFÜHRUNG

Gegenwärtig werden immer mehr UAVs operationell eingesetzt. Die meisten davon sind militärische Typen, die in dediziertem Luftraum über Krisengebieten eingesetzt werden. Allerdings operieren sie auch in zunehmenden Maße im zivilen Luftraum, wie z.B. die Nonstop-Flüge des Global Hawk von USA nach Australien oder Deutschland gezeigt haben. Darüber hinaus werden UAVs zukünftig auch im zunehmenden Maße in zivilen Rollen eingesetzt werden.

Eine der großen Herausforderungen dabei ist die Integration in den regulären Luftverkehr. Die Flugsicherheit erfordert, dass UAVs die gleichen Fähigkeiten wie bemannte Flugzeuge haben, insbesondere die Fähigkeit, anderen Luftverkehr zu erkennen und ihm auszuweichen. Nachdem eine Funkverbindung nicht stets verfügbar sein wird, müssen UAVs in der Lage sein, autonom Entscheidungen zu fällen, geeignete Ausweichmanöver auszuwählen und sich dann entsprechend zu verhalten. Somit benötigen UAVs ein gewisses Maß an Intelligenz.

Es steht zu erwarten, dass es im zivilen Markt der Zukunft auch große, unbemannte Transportflugzeuge geben wird, die den Warenverkehr eiliger Güter über die Ozeane hinweg durchführen. Diese Flugzeuge müssen zumindest zeitweise während des Überwasser-Fluges selbstständig agieren können. In diesem Fall wird nicht nur die Kollisionsvermeidung autonom erfolgen müssen, sondern auch das Systemmanagement des Flugzeuges selber, die Anpassung des Flugpfades an die meteorologischen Gegebenheiten oder auch Entscheidungen im Notfall, wenn die Funkverbindung zu einer Bodenstelle nicht möglich ist bzw. dieser nicht Zugang zu allen notwendigen Informationen hat.

Gleichzeit muss sichergestellt werden, dass der Flug so wirtschaftlich wie möglich durchgeführt wird.

In den folgenden Absätzen wird eine mögliche Architektur für die Intelligenz eines solchen Flugzeuges vorgeschlagen und an Hand der Teilaufgabe des Formationsfluges erläutert. Hierzu wird zuerst eine Grundstruktur dargestellt, die bereits ein Mindestmaß an Modulen, d.h. Fähigkeiten, enthält, die jedoch nach Bedarf durch weitere Module erweitert werden kann.

Im zweiten Teil der Arbeit wird dann gezeigt, wie diese Architektur bei der Aufgabe des Formationsfluges angewandt werden kann. Die hierfür benötigten Module werden dabei in größerem Detail beschrieben.

2. GRUNDSTRUKTUR DER ENTSCHEIDUNGSARCHITEKTUR

2.1. Hierarchische Struktur

In den letzten Jahren wurde Entscheidungsstrukturen ein großes Maß an Aufmerksamkeit zuteil [1,2,3]. Allerdings sind diese Strukturen meist auf militärische Anwendungen für die kooperative Bewältigung anspruchsvoller Missionen in einem hoch-dynamischen Umfeld hin ausgerichtet.

Die in den folgenden Abschnitten dargestellte Struktur wurde mit Blick auf zivile Anwendungen entwickelt, wo die Flugzeugaufgaben weniger veränderlich, aber in einer durch Vorschriften stark reglementierten Umgebung eingebettet sind.

Der Entscheidungsprozess basiert auf einer hierarchischen Struktur innerhalb der Intelligenz des UAV (siehe Bild 1):

Ebene 1: Strategische Entscheidungen

Innerhalb dieser Ebene werden die Entscheidungen von strategischer Bedeutung gefällt. Somit wird hier auch die gesamte Mission gesteuert. Alle Entscheidungen beruhen auf den von der Ebene 3 gelieferten Informationen.

Ebene 2: Missionskritische Entscheidungen

Die Ebene 1 kann die Verantwortung für Teilaufgaben der Mission an die Ebene 2 delegieren, die dann die operativen Entscheidungen fällt. Die Ebene 1 hat allerdings immer noch die Oberhoheit und kann jederzeit wieder das Kommando übernehmen, wenn sie beschließt, eine bestimmte Teilaufgabe abzubrechen.

Ebene 3: Informationsverarbeitung und Spezialentscheidungen

In der Ebene 3 werden Information für die darüber liegenden Ebenen vorverarbeitet und Spezialentscheidungen gefällt. Die einzelnen Module der Ebene 3 tauschen die Informationen mittels eines dedizierten Bus für entscheidungskritische Informationen, dem Management-Bus aus. Dieser wurde vom Systembus getrennt, um sicherzustellen, dass die relevanten Informationen stets mit großer Geschwindigkeit verteilt werden können, unabhängig von einer möglichen Überlastung des Systembus.

Während den verschiedenen Flugphasen variiert die Menge an Information, die die Ebene 1 von den Modulen der Ebene 3 benötigt. Daher – und aus Gründen der Redundanz - hat jedes Modul der Ebene 3 eine direkte Verbindung zur Ebene 1. Falls die Ebene 1 die Verantwortung an die Ebene 2 delegiert hat, so müssen die Informationen auch direkt zum entsprechenden Modul der Ebene 2 geliefert werden. (Diese Verbindungen wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit in Bild 1 weggelassen.)

Ebene 4: Systeme

Alle Flugzeugsysteme bilden die Ebene 4. Mittels des Systembus kommunizieren sie mit den Spezialmodulen der Ebene 3. Zusätzlich benötigen einige Module eine dedizierte Hochgeschwindigkeitsverbindung zu einigen speziellen Elementen, wie beispielsweise die Flugführung zur Flugsteuerung, dem Treibstoffsystem und dem Triebwerk. Auch jene Spezialisten, die große Datenmengen mit anderen Systemen austauschen, benötigen hierzu dedizierte Verbindungen. Ein Beispiel hierfür ist der Austausch der digitalen Terraindaten zwischen der Navigationsdatenbank und dem Navigationsmodul.

Ebene 5: Subsysteme

Die Subsysteme, wie z.B. die Aktuatorik oder individuelle Navigationssensoren, sind Teil der fünften Ebene. Nachdem diese Subsysteme normalerweise nur mit wenigen spezifischen Systemen Information austauschen, ist hier der Einsatz eines Bus nicht sinnvoll, sondern die Verwendung dedizierter

Verbindungen zwischen diesen Systemen. Natürlich kann ein Subsystem direkte Verbindungen mit mehreren Systemen haben. So ist z.B. das *Health-Monitoring* mit allen Subsystemen direkt verbunden.

Innerhalb dieser Struktur muss der Management- und der Systembus nicht notwendigerweise als Bus ausgeführt werden, sondern kann auch als spezieller Speicherbereich innerhalb eines einzelnen Softwarepaketes umgesetzt werden.

In jenen Fällen, in denen eine Bodenstation in Kontakt mit dem UAV steht und dessen Führung übernommen hat, übersteuert sie die Entscheidungen der Ebene 1. Somit kann man sie als eine temporäre Ebene 0 innerhalb dieses hierarchischen Ansatzes verstehen.

Die Informationen, die zwischen den verschiedenen Ebenen ausgetauscht werden, haben verschiedene Priorität. Dies bedeutet, dass sie bindenden oder informativen Charakter haben. Im Beispiel der Kollisionsvermeidung passiert das Folgende: das Modul für Kollisionsvermeidung sagt eine Kollision voraus, wenn der gegenwärtige Kurs beibehalten wird. Dementsprechend hat die Meldung „Kollision im Kursverlauf“ die höchste Priorität und ist auch für die oberste Ebene 1 bindend. Wenn jedoch im Gegensatz das Wettermodul empfiehlt, die Fluggeschwindigkeit zur Lastreduktion in Turbulenz zu reduzieren, kann die Ebene 1 diese Empfehlung zugunsten eines höher gewichteten Zieles, wie z.B. der Kollisionsvermeidung, verwerfen.

Bild 1 entspricht der Arbeitsverteilung innerhalb des Cockpits einer Transportmaschine der 60er Jahre. Der Flugkapitän (Ebene 1) macht die strategischen Entscheidungen. Hierfür wird er durch die folgenden Crewmitglieder informiert und unterstützt: Der Co-Pilot (Ebene 3) übernimmt die Flugdurchführung und –steuerung. Der Bordingenieur (Ebene 3) überwacht den technischen Betrieb. Der Navigator (Ebene 3) bearbeitet Navigation und Flugplanung, während der Funker (Ebene 3) die Kommunikation übernimmt.

Die Crew-Mitglieder tauschen Informationen verbal oder in schriftlicher Form, ähnlich dem Management-Bus, aus. Der Systembus entspricht den Anzeiginstrumenten und Schaltern, mit deren Hilfe die einzelnen Besatzungsmitglieder Informationen über die individuellen Systeme erhalten. Die Ebene 2 entspricht dem Missionsleiter, der die Rolle des Kapitäns eines Militärflugzeuges in bestimmten Flugphasen übernimmt.

Auch die Entwicklung zum 2-Personencockpit (nur Kapitän und Co-Pilot) findet sich in Bild 1 wieder. Aufgrund der zunehmenden Automatisierung sind Kapitän und Co-Pilot hauptsächlich mit den strategischen Entscheidungen beschäftigt, während Systeme wie das Navigationssystem oder der Autopilot viele Unteraufgaben übernehmen. Im normalen Flugbetrieb wird die Ebene 3 ausschließlich von den Flugzeugsystemen abgedeckt, während diese in Notfällen die Informationen normalerweise soweit vorverarbeiten, dass sich die Besatzung noch immer auf die strategischen Entscheidungen konzentrieren kann. Nur in sehr außergewöhnlichen Umständen muss die Crew vollständig die Aufgaben der Ebene 3 übernehmen.

Das Verteilen der Entscheidungen auf verschiedene Ebenen entlastet die Ebene 1, die somit von Routineaufgaben freigehalten wird. Zusätzlich haben die „Spezialisten“-Module der Ebene 3 die notwendigen detaillierten Informationen, die für optimale Entscheidungen notwendig sind.

Diese hierarchische Struktur erlaubt den einfachen Austausch oder Ergänzung von Modulen, falls sie für spezielle Aufgaben notwendig sind. Ein Beispiel hierfür ist das Formationsflugmodul, welches in den folgenden Kapiteln erläutert wird. Ebenso lassen sich auch Module für spezielle Missionen wie z.B. „*Search and Rescue*“ mit geringem Aufwand in die Gesamtstruktur einbinden.

Das Modul Flugführung entspricht den heutigen *Auto-Flight* Systemen. Es steuert autonom das UAV gemäß den Kom-

Ebene 1: Strategie

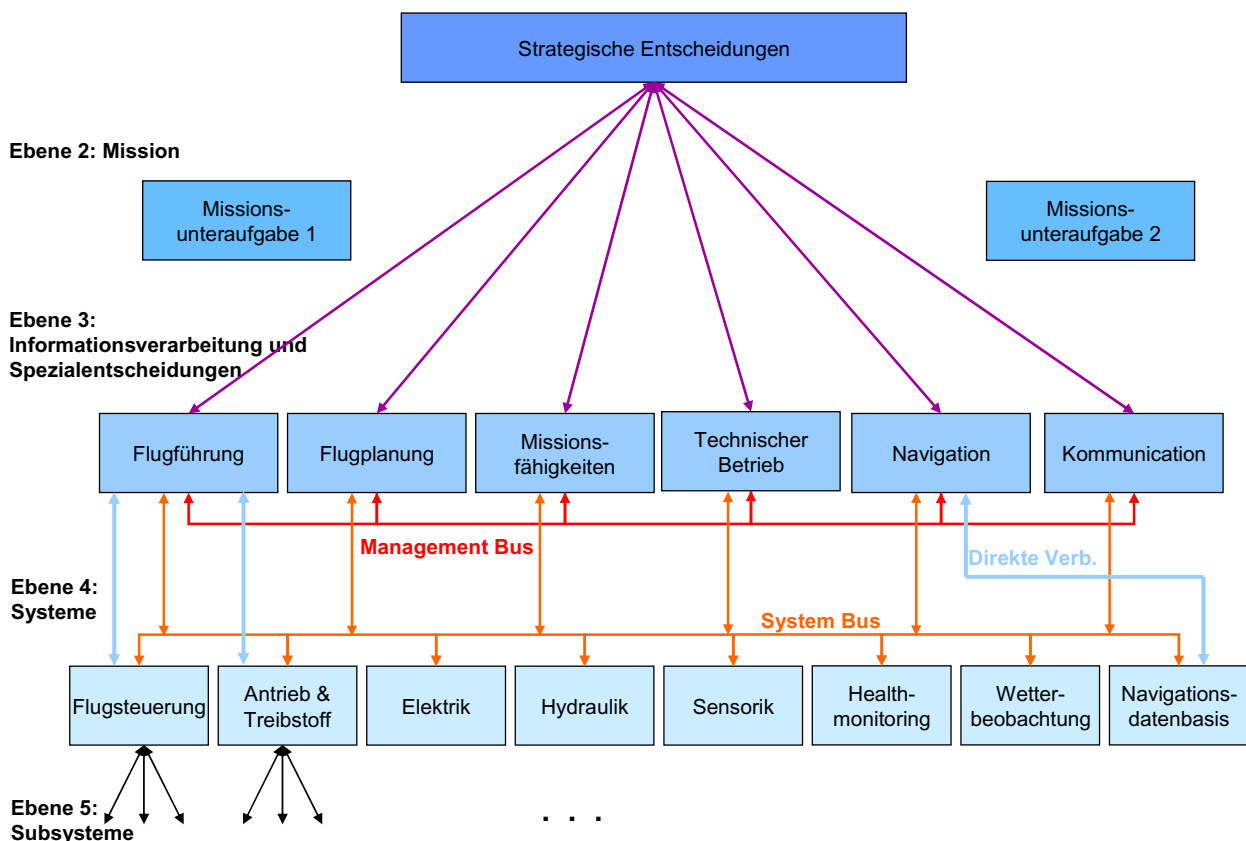


BILD 1. Hierarchische Entscheidungsstruktur

mandos der Ebene 1 unter Benutzung der Informationen der Flugplanung, der Missionsfähigkeiten und der Navigationsinformationen und unter Berücksichtigung der Einschränkungen, die vom Modul für technischen Betrieb geliefert werden. Allerdings müssen die Module eines UAV viele Aufgaben übernehmen, die die Systeme bisheriger Flugzeuge nicht leisten. Beispielsweise steuert das Flugführungsmodul auch das Fahrwerk, bestimmt die korrekte Landegeschwindigkeit etc.

Das Modul für den technischen Betrieb enthält das gesamte Systemmanagement, inklusive des Redundanzmanagements. Dementsprechend sind die meisten seiner Informationen an die Ebene 1 bindend, da sie gegenwärtige technische Beschränkungen enthalten.

2.2. Adaptive Systeme im Gegensatz zu Festen Regeln

Bei der Realisierung von Entscheidungssystemen gibt es zwei grundsätzlich unterschiedliche Ansätze. Entweder ist die Struktur auf feste, gegebene Regeln hin ausgelegt oder wird als lernendes adaptives System realisiert.

Einfach gesagt benutzen adaptive Systeme einen Agenten, der eine Situation analysiert und bewertet und daraus Regeln oder das weitere Vorgehen ableitet. Dieser Agent beginnt mit einem sehr begrenzten Grundwissen und erweitert dies mit selbst erworbener Erfahrung. Dies hat die folgenden Vorteile:

- Das System hat die immanente Fähigkeit, sich neuen Situationen anzupassen.
- Beim Design dieses System müssen nicht alle Eventualitäten vorgesehen werden. Es ist ausreichend, ein Grundverhalten zu installieren, das für verwandte Situationen anwendbar ist.

Natürlich gibt es auch Nachteile:

- Adaption und Lernen beruhen auf Belohnung und Bestrafung. Bei sicherheitskritischen Aufgaben kann schon eine einzige Bestrafung nicht akzeptabel sein. Im schlimmsten Fall ist diese der Totalverlust des UAV, was automatisch auch den Lernprozess beendet.
- Das System benötigt Zeit, um zu lernen. In diesem Zeitraum ist das Verhalten suboptimal.
- Adaptive Systeme in verschiedenen Flugzeugen werden mit unterschiedlichen Situation konfrontiert werden und lernen somit potentiell unterschiedliche Verhaltenweisen. Wenn dann diese Flugzeuge für eine gemeinsame Mission aufeinander treffen, ist möglicherweise ihr individuelles Verhalten nicht mehr gegenseitig kompatibel.

Diese Überlegungen zeigen, dass die Zulassung adaptiver Systeme für sicherheitskritische Anwendungen im Luftfahrtbereich schwierig und in der nahen Zukunft auch nicht zu erwarten ist.

Daraus schließen wir, dass die vorgegebenen Aufgaben am besten durch eine hierarchische Struktur mit festen Regeln gelöst werden können. Nichtsdestotrotz werden alle Entscheidungen aufgrund lokaler Informationen über eine Situation gefällt. Somit verhalten sich die Systeme autonom – und nicht automatisch.

3. AUTONOMER FORMATIONSFLUG

Sowohl theoretische Arbeiten [4] als auch neuere Flugtests [5] zeigen, dass der induzierte Luftwiderstand eines Flugzeuges deutlich reduziert wird, wenn es sich nahe der Wirbelschleppes eines vorausfliegenden Flugzeuges bewegt. Dieser

Effekt ist bereits in den 70er Jahren beschrieben worden [6,7]. Kroo [4] zeigte mittels einer linearen Betrachtung, dass eine Reduktion des induzierten Widerstandes von bis zu 40% möglich ist. Dieser Effekt ist auch dann vorhanden, wenn zwischen den Flugzeugen in Flugrichtung ein deutlicher Abstand liegt. Somit können die Flugzeuge auch ohne gefährlich kleinen Abstand in Formation fliegen. Die Flugtests der NASA untermauern diese Annahme für longitudinale Abstände von bis zu 5 Flügelspannweiten [5].

Kroo stellte fest, dass die Abnahme des Widerstandes von der Gleitzahl der einzelnen Flugzeuge abhängt. Die lineare Theorie zeigt, dass die Reduktion mit der Wurzel der Anzahl der an der Formation beteiligten Flugzeuge zunimmt. Somit kann der Formationsflug zur Optimierung des Langstreckenfluges von UAV eingesetzt werden.

Darüber hinaus führt der immer weiter steigende Luftverkehr immer wieder zur Verstopfung des Luftraumes und Überlastung der Flugsicherung. Die Flugsicherung kann für den Streckenflug eine Formation von Flugzeugen als einzelne Einheit behandeln. Die Kommunikation würde dann nur mit dem Führungsflugzeug der Formation und nicht mit jedem einzelnen Flugzeug selbst durchgeführt werden. Zusätzlich ist auch nur eine Flugfreigabe notwendig. Wird innerhalb der Formation automatisch von den Flugzeugen für die Separation gesorgt, so kann der notwendige Sicherheitsabstand deutlich kleiner sein, als wenn er durch die Flugsicherung vorgesehen würde. Somit wird sowohl die Arbeitsbelastung der Flugsicherungseinrichtungen als auch die Verstopfung des Luftraumes reduziert.

All dies zeigt, dass der Formationsflug eine interessante Alternative sowohl für die Luftfahrzeugbetreiber als auch für das Luftverkehrsmanagement darstellt.

Brachet et al [9] schlossen, dass ein automatisches Formationsflugsystem sogar für die Nachrüstung von existierenden bemannten Großraum-Frachtflugzeugen betriebswirtschaftlich attraktiv ist.

Keht man zu den vorher angesprochenen unbemannten Frachtflugzeugen für den trans-ozeanischen Warenverkehr

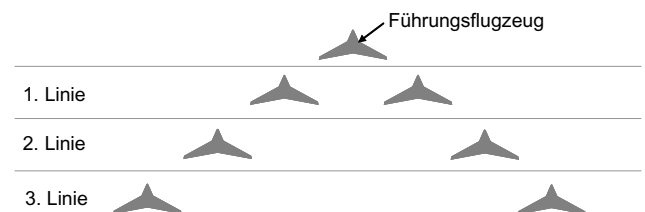


BILD 2. Hierarchische Struktur von 7 UAV

zurück, so ist es vorstellbar, dass sie von verschiedenen Flughäfen z.B. in Europa oder den USA starten, dann Formationen bilden und wie ein Gänseschwarm den Ozean überqueren (Bild 2). Nach der Überquerung würden sich die Formationen auflösen und jedes Flugzeug fliegt weiter zu seinem Ziel.

Dies erfordert von den UAV, dass sie in der Lage sind, sich in bestimmte Formationen einzuordnen und ihre entsprechende Position zu halten. Sie müssen die Formation auflösen oder bei Bedarf anpassen, z.B. aufgrund von Wetter oder Kollisionsrisiko mit andern Flugzeugen. Die für die erforderlichen Entscheidungsvorgänge notwendige Intelligenz dient als Beispiel für die autonomen Entscheidungshierarchien für unbemannte Luftfahrzeuge.

4. ANFORDERUNGEN AN DEN FORMATIONSFLUG

4.1. Grundlegende Annahmen

Die Anzahl der Flugzeuge innerhalb der Formation kann beträchtlich sein. Allerdings ist aufgrund von Verspätungen oder Defekten nicht *a priori* bekannt, wie viele Flugzeuge sich sammeln. Daher werden die folgenden Annahmen gemacht:

- Es wird eine nicht-geringe Anzahl von grundsätzlich gleichen Flugzeugen betrachtet.
- Die Anzahl der Flugzeuge innerhalb der Formation ist nicht von vornherein bekannt.
- Die Flugzeuge können beliebige Limitierungen aufgrund von Systemausfällen haben.
- Es ist anfänglich nicht bekannt, welche Flugzeuge sich sammeln.
- Vor der Formationsbildung ist unbekannt, welche Position die einzelnen Flugzeuge einnehmen werden. Allerdings gibt es Kriterien (z. B. Flugzeugmasse), die die Eignung für bestimmte Positionen einschränken.
- Alle Flugzeuge können miteinander kommunizieren.
- Jedes Flugzeug kennt den eigenen Zustand in Bezug auf technische Daten wie Masse oder Treibstoffmenge und auf gegenwärtige Begrenzungen. Beispielsweise wird die Beladung der Flugzeuge unterschiedlich sein, so dass sich die gesamte Formation daran anpassen muss.

Somit ergeben sich die folgenden Auslegungsanforderungen (in abnehmender Priorität):

- 1) Alle Flugzeuge führen den Streckenflug (über den Ozean) so sicher und wirtschaftlich wie möglich durch.
- 2) Teilweise Systemausfälle bei einzelnen Flugzeugen haben so wenig Einfluss auf die Gesamtheit wie möglich.
- 3) Die Formation benötigt minimale Kommunikation nach außerhalb.

4.2. Anforderungen der Flugsicherung

Prinzipiell gibt es 2 grundsätzliche Verfahren, wie mit den Anforderungen der Flugsicherung umgegangen werden kann:

- Jedes Flugzeug erhält eine Freigabe für eine bestimmte Flugrichtung und -höhe von der Flugsicherung.
- Alle Flugzeuge operieren auf einer vorher optimierten Route, wobei sie selbstständig für die Separation zwischen ihnen sorgen (*Free Flight* Konzept der FAA).

Nichtsdestotrotz wird es bei beiden Vorgehensweisen Abweichungen von der lateralen oder vertikalen Route geben, z.B. aufgrund von Wetter wie Gewitter oder Turbulenz.

Bei bemannten Flugzeugen in enger Formation wird heute ein Ansatz verfolgt, bei dem der Formationsführer die Rolle des alleinigen Verbindungsgliedes zu Flugsicherung oder Bodenstation übernimmt. Die anderen Teilnehmer in der Formation hören bei der Kommunikation mit, aber greifen nur bei Notfällen ein.

Dieses Vorgehen ist dort sehr erfolgreich und daher wird es als vorteilhaft angesehen, es auch bei unbemannten Flugzeugen einzusetzen.

4.3. Aufgabenstellung

Wie in 4.1 festgestellt, sammelt sich eine unbekannte Anzahl von Flugzeugen, die sich gegenseitig nicht „kennen“. Somit benötigen sie alle die gleichen intellektuellen Fähigkeiten, da dies die einzige Garantie ist, dass sich für eine beliebige Kombination von Flugzeugen eine Formation bilden kann. Kroo [1] zeigte, dass die genaue Figur der Formation von der Anzahl der Flugzeuge abhängt. Somit müssen sowohl die Wahl der Form als auch die Zuordnung der UAV zu den einzelnen Positionen autonom erfolgen.

Sollten beim Streckenflug Systemfehler oder sogar der Totalausfall eines Flugzeuges vorkommen, so müssen auch Entscheidungen über Formationswechsel autonom gefällt werden.

5. BEWÄLTIGUNG DER AUFGABENSTELLUNG

5.1. Lösungsansatz

Die Aufgabenstellung des Formationsfluges kann mit der in Kapitel 2 vorgestellten Architektur gelöst werden. Allerdings betrachten wir nun eine Gruppe von Flugzeugen mit einer Rangordnung innerhalb der Gruppe.

Die hierarchische Organisation ist nach einer militärischen Einheit oder Firma mit Vorgesetzten und Angestellten auf verschiedenen Ebenen modelliert. Alle Entscheidungen müssen zentral gefällt werden, um Diskrepanzen innerhalb der Organisation zu vermeiden. Gleichzeitig muss die Implementierung einer Entscheidung dezentral innerhalb einer Hierarchie so erfolgen, dass alle beteiligten Parteien vergleichbar belastet und lokale Überlastungen vermieden werden.

Zusätzlich beinhaltet dieses System die gegenseitige Überwachung. Vorgesetzte erkennen Fehlfunktionen der Untergebenen und agieren dementsprechend. Aber auch die Untergebenen können die Fehlentscheidungen von übergeordneten Instanzen erkennen und sind dann in der Lage, eine Anpassung der Organisation zu initiieren.

Hier ist anzumerken, dass diese Aussagen für die Organisation von Maschinen gemacht werden und nur bedingt auf menschliche Organisationen übertragbar sind.

5.2. Formationswahl

Das Flugzeug, das in der vordersten Position fliegt, ist das Führungsflugzeug, da keine anderen Flugzeuge seine vorausgerichteten Sensoren (z.B. Wetterradar) behindern und es mit verhältnismäßig wenig Einschränkungen agieren kann. Das Führungsflugzeug legt die Formation fest, die geflogen werden soll. Es ist das einzige, das mit der Außenwelt der Flugsicherung und Bodenkontrollstation kommuniziert. Es bestimmt die Position, die neu angekommene Flugzeuge einnehmen oder ob sie die Führungsrolle anstelle seiner selbst übernehmen sollen. Es legt die Ausweichmanöver für die ganze Formation fest, wird hierbei aber mit den Sensoren der anderen Flugzeuge unterstützt. Zusätzlich wird das Führungsflugzeug ununterbrochen von den anderen überwacht.

Eine Vorauswahl des Führungsflugzeuges auf dem Boden ist nicht möglich, da nicht alle Flugzeuge am vereinbarten Wegpunkt zum Sammeln eintreffen könnten. Zudem ist es denkbar, dass das Führungsflugzeug seine „Führungsfähigkeit“ während des Fluges verlieren kann, wenn z.B. das Wetterradar oder Satcom über dem Ozean ausfällt.

Ebene 1: Strategie

Ebene 2: Mission

Ebene 3: Informationsverarbeitung und Spezialentscheidungen

Ebene 4: Systeme

Ebene 5: Subsysteme

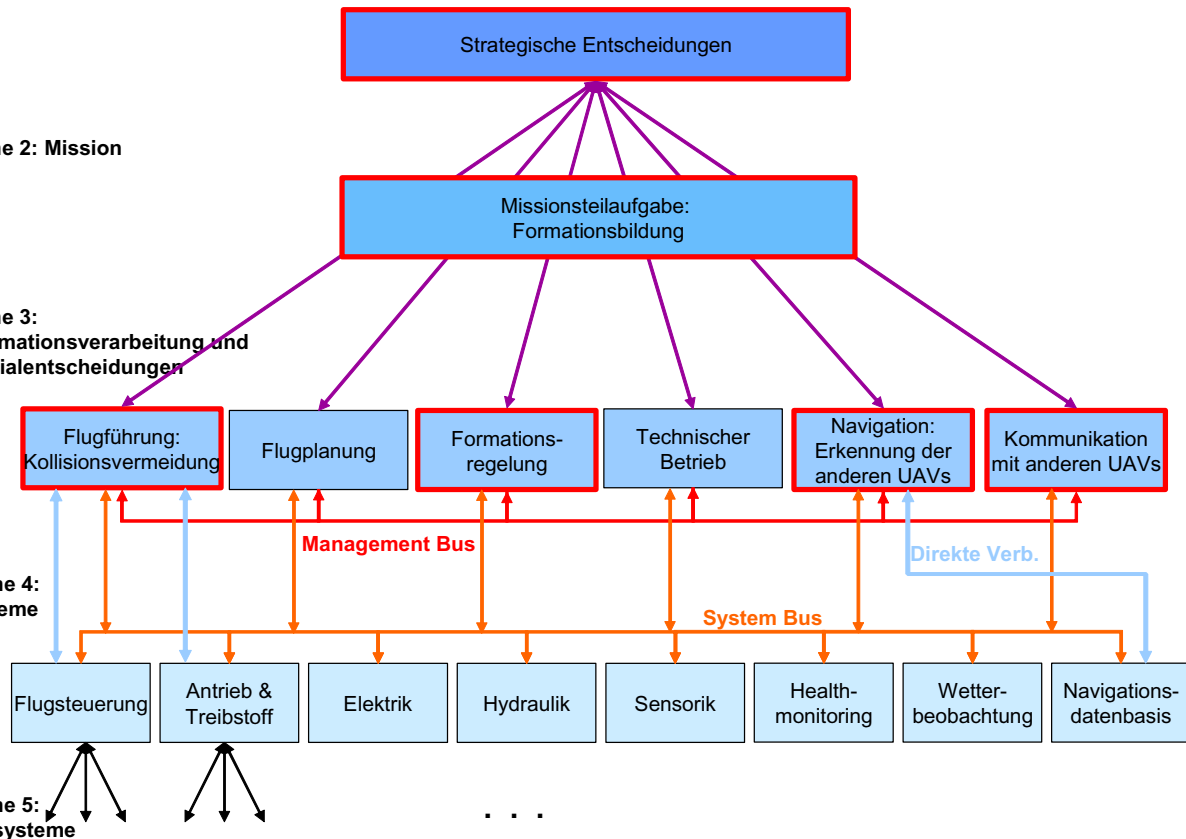


BILD 3. Hierarchische Entscheidungsstruktur während des Formationsfluges

Innerhalb der Formation fliegen alle Flugzeuge relativ zu dem entsprechenden Führungsflugzeug. Flugzeuge, die der bereits bestehenden Formation beitreten wollen, verhandeln ihre Position mit dem Führer innerhalb der erweiterten Position.

Die dabei notwendigen Entscheidungsinstanzen sind in Bild 3 dargestellt, wo sie mit einer roten Randlinie hervorgehoben sind.

Die Ebene 1 fällt die übergeordneten Entscheidungen gemäß den folgenden Prioritäten:

- Vor allem muß das Flugzeug sicher und wirtschaftlich zum Zielflughafen geführt werden.
- Möglicherweise vorhandene Beschränkungen müssen beachtet werden. Z.B. im Falle sehr empfindlicher Fracht können reduzierte maximal und minimal erlaubte Lastvielfache eine reduzierte Geschwindigkeit beim Flug in schweren Turbulenzen erforderlich machen.
- Die Route soll in der von der Flugsicherung vorgegebenen Geschwindigkeit und Höhe geflogen werden. Dabei sind dabei auch die Wegpunkte, die für das Rendezvous mit anderen Flugzeugen geplant wurden, anzufliegen.
- Soweit möglich soll der Formationsflug mit anderen Flugzeugen zur Reduktion des Treibstoffverbrauches genutzt werden.

Jedes mal, wenn die Ebene 1 der Entscheidungsstruktur – egal, auf welchem der UAV – die strategische Entscheidung zum Formationsflug fällt, so übergibt sie die Verantwortung an das missionsspezifische Modul „Formationsflug“ der Ebene 2. Diese Ebene 2 fällt dann alle Entscheidungen be-

züglich des Formationsfluges, solange die Ebene 1 nicht beschließt, den Formationsflug aufzugeben.

5.3. Sammeln der Luftfahrzeuge

Die Flugzeuge starten zu bestimmten Zeiten an verschiedenen Flughäfen und fliegen von dort aus auf vordefinierten Rendezvousbahnen. Sind es nicht mehr als 3 Flugzeuge, diese sich bei einem Rendezvous treffen, so können diese Flugbahnen 3 parallele Kurse mit ausreichender lateraler

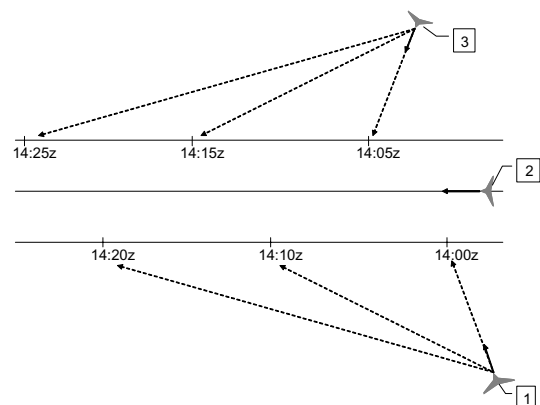


BILD 4. Flugbahnen für das Rendezvous (nicht maßstabsgerecht)

Separation, aber in derselben Höhe sein. Sie befinden sich beispielsweise 2 Höheneinheiten (wobei eine Höheneinheit z.B. 300 Fuß ist) unter der für die erste Formation geplanten

Höhe. Entlang dieses Kurses gibt es Wegpunkte mit vordefinierten Sollzeiten (Bild 4).

Nach dem Start bewegen sich die Flugzeuge zum ersten Wegpunkt mittels 4D-Navigation, d.h. die Geschwindigkeit wird so gewählt, dass der erste Wegpunkt zu der vordefinierten Sollzeit erreicht wird. Dabei ist jedoch ein gewisser zeitlicher Spielraum akzeptabel. Sollte ein Flugzeug dies nicht schaffen, so wird es versuchen, den nächsten Wegpunkt zu erreichen. Indem es dorthin mit einem zeitlichen Vorhalt fliegt, verbessert sich die Wahrscheinlichkeit, innerhalb der vorgegeben Zeit anzukommen.

Dabei wird der zeitliche Spielraum von der durch den Formationsflug möglichen Treibstoffersparnis bestimmt. Die zum Erreichen der Wegpunkte notwendige Geschwindigkeitsänderung darf nicht die Treibstoffersparnis aufbrauchen.

In Bild 4 befindet sich UAV 2 bereits auf dem Rendezvous-Kurs, während sich UAVs 1 und 3 noch auf Abfangbahnen bewegen.

Mit dieser Methode ist es möglich, maximal 3 UAV gleichzeitig zu sammeln. Werden mehr UAV als dies gesammelt, so müssen die Rendezvous gestaffelt werden, um ein Überlappen der einzelnen Flugbahnen zu vermeiden.

5.4. Auswahl des Führungsflugzeuges

Die Wahl eines Führungsflugzeuges ist Voraussetzung für den Formationsflug. Nach einer gewissen Zeit beginnt der Prozess für die Auswahl eines Führers innerhalb aller Flugzeuge, die bisher zum Sammeln gekommen bzw. bereits in Formation sind. Bis dahin ist innerhalb der Navigationsmodule die Kollisionsvermeidung aktiv. Das ändert sich nun und der folgende schrittweise Prozess beginnt:

- Entscheidung zur Bildung der Formation, unabhängig in jedem UAV gefällt
- Die Auswahl des Führungsflugzeuges durch Interaktion der einzelnen UAV
- Die Zuteilung von Positionen innerhalb der Formation für jedes UAV durch das Führungsflugzeug
- Flug auf die Position nach Anweisung durch das Führungsflugzeug und Halten der Position

Hierfür beginnen die Kommunikationsmodule omnidirektionale Kommunikation auf der gemeinsamen Frequenz der Formation (Marktprinzip). Jedes UAV sendet die folgenden Informationen:

- Eigene ID
- Position, Kurs und Fluggeschwindigkeit
- Relevante Parameter: Bereitschaft zum Formationsflug, Masse, Systemzustand, eventuelle Beschränkungen
- Vorschlag für die Reihenfolge in der Formation

Die vorgeschlagene Reihenfolge innerhalb der Formation beruht auf dem Führungsindex. Wir benutzen diesen Ausdruck als Maß für die Fähigkeit eines UAVs, die ganze Formation zu führen. Es wird auf Basis der Parameter berechnet, die die UAVs austauschen. Zusätzlich geht auch die individuelle ID des UAV in den Führungsindex ein. Damit wird sichergestellt, dass sich keine Mehrdeutigkeiten aufgrund von UAVs mit ansonsten gleichen Parametern ergeben.

Wir nehmen hier an, dass es für die Treibstoffersparnis der ganzen Formation vorteilhaft ist, wenn das schwerste Flugzeug auf der vordersten Position fliegt. Dann wird der Index wie folgt berechnet: Das UAV mit der höchsten Flugmasse, das ansonsten keine Systemeinschränkungen oder Flugbeschränkungen hat, erhält den höchsten Index. Bei Gleichheit entscheidet die Flugzeug-ID.

Das Flugzeug an der Spitze der Formation ist das UAV mit

dem höchsten Index, das mit dem niedrigsten Index fliegt an der letzten Position.

Jedes Flugzeug empfängt die Vorschläge für die Reihenfolge innerhalb der Formation. Mit diesen Informationen wird eine Matrix erstellt, die alle Vorschläge enthält. Für alle von den verschiedenen UAVs gemachten Vorschläge wird auch die Anzahl der Zustimmungen gespeichert.

Die beispielhafte Matrix in Bild 5 zeigt, dass 2 verschiedene Vorschläge gemacht worden sind. Die ID des vorgeschlagenen Leitflugzeuges ist in der ersten Zeile der Matrix enthalten, während die letzte Zeile anzeigt, wie viele Flugzeuge den entsprechenden Vorschlag gemacht haben. Der Vorschlag in der ersten Spalte ist nur von einem Flugzeug gemacht worden, während der in der zweiten Spalte von den übrigen 4 Flugzeugen kommt. Dieser Vorschlag hat die meiste Zustimmung und wird von den meisten akzeptiert.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 3 \\ 4 & 4 \\ 2 & 5 \\ 5 & 1 \\ \hline 1 & 4 \end{bmatrix}$$

← ID des vorgeschlagenen Führungsflugzeuges

← Vorgeschlagene Reihenfolge

← Anzahl der Zustimmungen

BILD 5. Matrix mit Führungsindex für 5 UAV

Sowohl UAV 1 als auch 2 senden eine Nachricht, um Ihre Bereitschaft zum Führen der Formation mitzuteilen. Das Signal von UAV 1 wird von den anderen Mitgliedern der Formation jedoch nicht bestätigt. Offensichtlich hat UAV 1 nicht erkannt, dass er nicht in der Lage ist, die Formation zu leiten. Somit übernimmt er nicht die Leitung der Formation, da er nicht von den anderen UAVs akzeptiert würde. UAV 2 erhält die Zustimmung von der Mehrheit der UAVs und übernimmt die Führung.

Die Reihenfolge der anderen Flugzeuge ist aus der zweiten Spalte in obigem Beispiel erkenntlich. Obwohl UAV 2 nicht für die Rolle des Führungsflugzeuges als geeignet angesehen wurde, so wird er doch als Nr. 2 in der Formation akzeptiert.

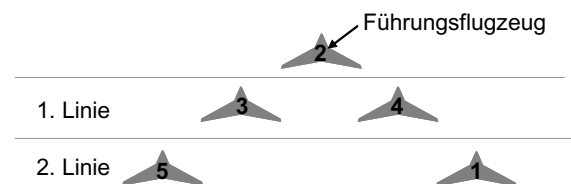


BILD 6. Formation gemäß der Führungsindexmatrix aus Bild 5

Nachdem das Leitflugzeug gewählt worden ist, unterscheiden sich die Prozesse innerhalb der einzelnen UAV. Das Führungsflugzeug weist jedem anderem Flugzeug eine Position zu. In diesen UAV arbeitet nun die Ebene 2 als Überwacher (siehe 5.7). Mittels des Kommunikationsmoduls gibt das Führungsflugzeug direkte Anweisungen an die Module „Formationsregelung“ in der Ebene 3 der einzelnen UAV.

Darüber hinaus kommuniziert nur das Führungsflugzeug mit der Bodenstation oder der Flugsicherung. Es befiehlt, dass die Kommunikation von omnidirektional auf gerichtet umgestellt wird, d.h. jedes UAV kommuniziert nur noch direkt mit dem Leitflugzeug, während die anderen nur mithören. Es

fragt die anderen UAV in kurzen Zeitabständen ab und sendet die aktuellsten Anweisungen. Als Antwort übermitteln die anderen Mitglieder der Formation die folgenden Informationen an das Leitflugzeug:

- Eigene ID
- Eigener Führungsindex
- Position, Kurs und Fluggeschwindigkeit
- Zuletzt empfangene Werte für kommandierte Position, Kurs und Fluggeschwindigkeit
- Relevante Parameter: Bereitschaft zum Formationsflug, Masse, Systemzustand, eventuelle Beschränkungen

Mit Hilfe der momentanen Informationen über Wetter und anderen Flugverkehr bestimmt das Führungsflugzeug die Ausformung der Formation, den Kurs und die Flughöhe, die die maximale Treibstoffmenge einspart und gleichzeitig alle individuellen Limitierungen berücksichtigt. Danach steuert es den Aufbau der Formation.

5.5. Aufbau der Formation

Zuerst geht das Führungsflugzeug auf die Reiseflughöhe. Danach kommandiert es sequentiell jedes UAV auf seine zugewiesene Position innerhalb der neuen Formation (siehe Bild 7). Es beginnt bei den UAV der 1. Linie (siehe Bild 2) und arbeitet sich schrittweise ans Ende der alten Formation. Um die neue Position zu erreichen, steigt jedes UAV um eine Höheneinheit auf die Zwischenflugfläche. Somit ist es zwischen den anderen UAV und dem Führungsflugzeug und kann seine laterale Position leicht und ohne komplexe Flugbahnen erreichen. Nachdem es seine laterale Position erreicht hat, steigt es auf die endgültige Flughöhe innerhalb der neuen Formation. Jeder dieser 3 Schritte wird einzeln kommandiert. Der Empfang eines jeden Kommandos und der Vollzug eines jeden Manövers wird bestätigt, bevor der nächste Schritt initiiert wird.

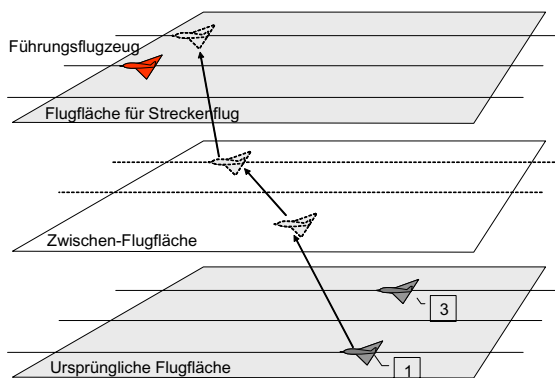


BILD 7. Algorithmus zum Positionswechsel

Der Einsatz einer zwischenliegenden Flughöhe hat den Vorteil, dass so leicht Kollisionen zwischen den Flugzeugen vermieden werden können. Außerdem besteht keine Gefahr, dass sich ein Flugzeug durch die Wirbelschleppe eines anderen Vorausfliegenden hindurchbewegt.

5.6. Integration weiterer Flugzeuge

Die Aufnahme weiterer Flugzeuge in die Formation geschieht auf ähnliche Weise.

Das neue Flugzeug fliegt ebenfalls auf einer Rendezvousbahn. Allerdings repräsentiert diesmal das Führungsflugzeug die gesamte Formation. Führungsflugzeug und Neuankömmling

tauschen die jeweiligen Führungsindices bzw. die zur Bestimmung notwendigen Informationen aus. Mit dieser Zahl bestimmt das Führungsflugzeug die Position des anderen UAV innerhalb der Formation.

Ist diese Position bereits durch ein anderes UAV besetzt, so kommandiert das Führungsflugzeug die anderen UAV an ihre neuen Positionen, diesmal jedoch von hinten beginnend. Sobald der Raum für das neue UAV frei ist, fliegt es über die Zwischenflugfläche in Position.

Übernimmt der Neuankömmling die Leitung, dann behält der gegenwärtige Führer die Leitungsrolle, bis der Wechsel in die neue Formation abgeschlossen ist. Dann übergibt er die Führung an das UAV mit dem höheren Führungsindex.

5.7. Überwachung während des Formationsfluges

5.7.1. Gegenseitige Überwachung der untergeordneten UAV

Für die untergeordneten UAV ist die Ebene 2 der Entscheidungsstruktur im Überwachungsmodus. Hierzu wird laufend der technische Zustand des Flugzeuges, basierend auf Systemstatistiken und Informationen des Moduls für den technischen Betrieb, bestimmt und daraus der Führungsindex berechnet. Dieser wird dann den anderen UAV der Formation übermittelt.

Parallel dazu bestimmt die Ebene 2 auch einen beobachteten Führungsindex der anderen UAV. Hierfür nützt es die übermittelten Parameter für Masse, Systemzustand und eventuelle Beschränkungen. Außerdem prüft es kontinuierlich die echte Position der UAV gegenüber der vom Führungsflugzeug übermittelten. Dieser Abgleich kann ggf. durch den Einsatz eines Bordradars verfeinert werden. Werden die Abweichungen von der vorgegebenen Position größer als ein bestimmtes Maß, so wird das entsprechende UAV als fehlerhaft bewertet, ein hinreichend niedriger Führungsindex zugewiesen und dieser an das Führungsflugzeug gesandt.

Dieses vergleicht den empfangenen Index mit seinem eigenen Vorschlag. Falls mehrere UAV ein anderes als fehlerhaft bewerten, so wird das Führungsflugzeug dem beschädigten Flugzeug eine neue, weiter hinten liegende Position zuweisen. Reagiert das entsprechende Flugzeug nicht, so fliegt die gesamte Formation ein Ausweichmanöver, um das offensichtlich unsteuerbare Flugzeug abzusondern.

5.7.2. Überwachung des Führungsflugzeuges

Vergleichbar zu obigem Vorgehen überwacht die Ebene 2 der UAV auch die Entscheidungen des Führungsflugzeuges. Dies ist möglich, da alle Flugzeuge die gleichen Informationen besitzen. Wird eine schwerwiegende Abweichung von der erwarteten Entscheidung festgestellt, so wird der Führungsindex des Leitflugzeuges heruntergesetzt.

Selbst wenn nur ein einziges Flugzeug den Führer als beschädigt ansähe, so würde es ein Signal an alle zum Wiederbeginn der omni-direktionalen Kommunikation senden. Damit wird der gleiche Prozess, der bereits zur ursprünglichen Bestimmung des Leitflugzeuges geführt hatte, neu initiiert. Wiederum führt ein Vergleich der einzelnen Vorschläge aller UAV zur Bestimmung eines neuen Führungsflugzeuges. Währenddessen folgen allerdings die einzelnen Flugzeuge immer noch den Vorgaben des noch die Aufgabe innehabenden Leiters.

Wenn der neue Leiter übernimmt, so lässt er die gesamte Formation zuerst 2 Höheneinheiten sinken, bevor er den Aufbauprozess erneut beginnt.

5.8. Auflösen der Formation

Das Auflösen der Formation läuft analog zum Aufbau der

Formation ab. Die UAV sinken nacheinander auf eine niedrigere Flugfläche, gehen dort auf einen neuen Kurs und verlassen die Formation.

Verlässt das Führungsfahrzeug die Formation, so beginnt, wie vorher, der Auswahlprozess aufs Neue.

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Dieser Artikel schlägt eine Architektur zur Entscheidungsfindung vor, die auf den Strukturen menschlicher Organisationen beruht. Auch die Prozesse, die zu Entdeckung und Isolation von defekten Flugzeugen dienen, ähneln denen von Menschen. Ein (zeitweiliger) Führer wird gewählt, der taktischen Entscheidungen für alle fällt. Allerdings überwacht ihn jeder andere Agent, um rechtzeitig Fehlverhalten zu entdecken und ihn abzulösen, falls notwendig. Die demokratischen Prozesse finden ohne richtende Instanz statt, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass der Schiedsrichter selber defekt ist.

Die Anwendung dieser Verfahren ist nicht auf den Formationsflug beschränkt. Dieser wird nur als interessantes Beispiel für die autonome Organisation einer Gruppe von Agenten oder Prozessen genutzt. Zukünftig können derartige Entscheidungsprozesse auch in Piloten-Assistenzsystemen oder zur Bewältigung von komplexen Aufgaben ganz ohne menschliche Interaktion eingesetzt werden.

7. LITERATUR

- [1] Chandler, P.R., Pachter, M., "Hierarchical Control for Autonomous Teams", AIAA 2001-4149, Montreal, Canada, August 2001
- [2] Bošković, J.D., et al, "A Multi-Layer Architecture for Intelligent Control of Unmanned Aerial Vehicles", AIAA 2002-3473, Portsmouth, VA., May 2002
- [3] Yavnai, A, "Hybrid Architecture Intelligent Autonomous Mission Controller for High Autonomy UAV", AIAA 2003-6639, San Diego, CA, Sept. 2003
- [4] Kroo, I., "Distribute Control Concepts: The Flight of Geese", Aircraft Design Group, Stanford University, May 1999, <http://adg.stanford.edu/aero/geese.html>
- [5] Wagner, G., et al., "Flight Test Results of Close Formation Flight for Fuel Savings". AIAA paper 2002-4490, Monterey CA, Aug 2002.
- [6] Lissaman, P.B.S., Schollenberger, C.A., "Formation Flight of Birds", Science 168 (1970)
- [7] Hummel, D, "Recent Aerodynamic Contributions To Problems of Bird Flight", Proceedings 11th Congress. International Council Aerospace Sciences (ICAS), Lisbon 1978
- [8] Vachon, M, et al, " F/A-18 Aircraft Performance Benefits Measured During The Autonomous Formation Flight Project", AIAA2002-4491, Monterey CA, Aug. 2002
- [9] Brachet, J B, et al. "Architecture and Evaluation of a Formation Flight System for Existing Cargo Aircraft". Eingereicht zum 43rd Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, 2005