

ENTWICKLUNG UND BEWERTUNG VON FORMATIONSFLUGSZENARIEN UNBEMANNTER FRACHTFLUGZEUGE

Y. Brodersen^{1,2}, T. Luchkova¹, A. Temme¹, M. Lindner², J. Rosenow², M. Schultz¹

¹DLR Institut für Flugführung, Abteilung Luftverkehrssysteme, Braunschweig, DE
und ²TU Dresden, Professur für Technologie und Logistik des Luftverkehrs, Dresden, DE

Zusammenfassung

Der Formationsflug ziviler Luftfahrzeuge besitzt das Potenzial, aktuelle Forderungen des Luftverkehrs nach einer höheren ökologischen Effizienz bei gleichzeitiger Erweiterung der Luftraumkapazitäten zu erfüllen. Die vorliegende Arbeit betrachtet die Auswirkungen von Formationsflügen unbemannter Frachtflugzeuge auf den europäischen Luftverkehr. Die Auswirkungen werden dabei nach Kriterien wie Flugdistanz, Kraftstoffverbrauch und Arbeitsbelastung der Fluglotsen bewertet. Zentraler Bestandteil ist der Entwurf und die Modellierung entsprechender Szenarien für die Mission eines Hilfsgütertransportes von Europa nach Afrika. Zusätzlich erfolgt eine Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Nutzung unbemannter Formationen im vorhandenen Beispiel, wobei die drei Kostenblöcke Kraftstoff, Besatzung (Crew) und Flugsicherungsgebühren betrachtet werden. Abschließend erfolgt sowohl unter Hinzunahme der verkehrlichen Auswirkungen als auch der wirtschaftlichen Gesichtspunkte eine Bewertung des Einsatzes unbemannter Formationen im Frachtflugbereich.

1. MOTIVATION

Eine der aktuellen Herausforderungen der Luftfahrt des 21. Jahrhunderts ist die Forderung nach einer höheren ökologischen Effizienz des weltweiten Luftverkehrs. Gleichzeitig erfordern dabei insbesondere die weiterhin steigenden Verkehrszahlen [1] eine Erweiterung der Luftraumkapazitäten. Dies impliziert auch neue Arten der Verkehrsflusssteuerung, die auf eine ausgewogene Arbeitsbelastung der Fluglotsen abzielen [2].

Als vielversprechend erscheint hierbei der Formationsflug von Luftfahrzeugen, für den theoretischen Untersuchungen zufolge sowohl Kraftstoffeinsparungen [3] als auch Kapazitätserhöhungen [4] erzielt werden könnten. Neben der höheren Kraftstoffeffizienz, die aus der Ausnutzung der an den Flügelspitzen eines vorausfliegenden Luftfahrzeugs erzeugten Randwirbel über eine Reduktion des induzierten Widerstandes nachfolgender Luftfahrzeuge hervorgeht [5], ergeben sich auf Seiten der Flugsicherung vor allem höhere Luftraumkapazitäten, da die Formation als Einheit betrachtet werden kann, die nur eine minimal höhere Staffelung erfordert [4]. Trotz dieser Vorteile kommt das Formationsflugprinzip bisher allerdings nicht zuletzt wegen Bedenken hinsichtlich des geringeren Passagierkomforts bei höheren G-Kräften beim Flug auf den Randwirbeln bisher nur im Militärbereich zum Einsatz.

Es erscheint daher sinnvoll, den Fokus für einen zivilen Formationsflug zunächst auf den unbemannten Betrieb zu legen. Hier sind zudem wegen hoher Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit der technischen Systeme beider Aspekte, sowohl des Formationsfluges als auch unbemannter Flugsysteme, Synergieeffekte zu erwarten. Es ist anzunehmen, dass hier in den nächsten Jahrzehnten die Entwicklung von kleinen Systemen hin zu größeren *Remotely Piloted Aircraft Systems* (RPAS) für interkontinentale Langstreckenflüge geht, welche sich zunächst auf den

Bereich des unbemannten Frachttransports beschränken werden. Das Potenzial, welches sich hieraus hinsichtlich Personalplanung, Kraftstoffeffizienz und Netzwerkerschließung ergibt, wird allgemein als groß angenommen [8]. Insbesondere die Kraftstoffeffizienz kann hier beispielsweise aufgrund des fehlenden menschlichen Faktors an Bord der Luftfahrzeuge durch längere Flugzeiten und somit langsamere Fluggeschwindigkeiten erhöht werden. Es ist anzunehmen, dass diese Systeme vor allem in Nischenmärkten eingesetzt werden würden, z.B. in Regionen eines Hinterlandes mit mangelhafter Anbindung an eine Bodeninfrastruktur, wie sie unter anderem oftmals in Entwicklungsländern oder auch in Krisenregionen zu finden sind [8].

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) entwickelt im Rahmen des Projektes „Unmanned Freight Operations (UFO)“ [9] Betriebsszenarien, welche gezielt verschiedene operationelle Konzepte zum unbemannten Frachttransport in Kategorien über einer Nutzmasse von 20 Tonnen untersuchen und validieren sollen. Dabei adressieren diese Konzepte neben den Besonderheiten des Frachttransportes auch weiterführende Absichten zu einer ökonomisch und ökologisch effizienten Flugdurchführung. Hierbei stellt insbesondere der bereits genannte Formationsflug eine wahrscheinliche zukünftige Anwendung dar. Dieses Paper trägt im Rahmen des UFO-Projektes zur Erforschung der Auswirkungen von Formationsflügen auf den existierenden Luftverkehr in Europa bei.

Das Paper ist wie folgt organisiert: Im zweiten Abschnitt wird zunächst die Methodik der Simulation beschrieben. Der dritte Abschnitt behandelt eine Beschreibung des Aufbaus und der Annahmen der Untersuchungsszenarien. Im vierten Abschnitt erfolgt die Ergebnisdarstellung, welche sowohl mögliche Auswirkungen auf den umgebenden Verkehr als auch eine Wirtschaftlichkeitsanalyse umfasst. Das Paper endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2. SIMULATIONSUMGEBUNG

Um einen berechenbaren, gesamtheitlichen Überblick über die Auswirkungen eines Formationsfluges zu bekommen, wird hier auf die Schnellzeitsimulation zurückgegriffen. Dieser Abschnitt beschreibt die Informationen: (2.1.) Beschreibung der Simulationsumgebung, (2.2.) den für die Analyse ausgewählten Tag und Verkehrsdaten, und (2.3.) angewandtes Luftraummodell.

2.1. Tool-Beschreibung

Die Simulation des umgebenden europäischen Luftverkehrs und der Formation wird mit dem Schnellzeitsimulationstool AirTOP (*Air Traffic Optimizer*) durchgeführt.

AirTOP ist eine Schnellzeitumgebung zur en-route Simulation (Gate-to-Gate). In Abgrenzung zur Realzeitsimulation für die Untersuchung von Arbeitsabläufen und Mensch-Maschine-Interaktionen, referenziert der Begriff *Schnellzeit* hierbei die Möglichkeit, tausende von Flügen innerhalb weniger Minuten zu berechnen. Dabei enthält das Tool neben anderen Elementen beispielsweise die Modellierung des Streckenverkehrs und der Flugsicherungssektoren [6].

Schnellzeitsimulationen werden in vielen unterschiedlichen Fallstudien als erster Anhaltspunkt genutzt, um beispielsweise zu ergründen, auf welche Weise verschiedene Modifikationen eines Luftraums dessen Kapazität und den Verkehrsfluss beeinflussen (Szenarienanalyse). Dabei wird oftmals zunächst ein Referenzszenario gebaut, welches den aktuellen Status Quo korrekt wiedergibt. Zur Kalibrierung werden aufgenommene Verkehrsdaten und Informationen über die Verkehrsflusssteuerung sowie die Lufträume der Flugsicherung benötigt. Im Anschluss werden darauf aufbauend die einzelnen modifizierten Szenarien im Einklang mit dem Ziel der Untersuchung erstellt. Mithilfe eines Vergleichs zwischen den Untersuchungsszenarien und dem Referenzszenario können die Auswirkungen bewertet und diskutiert werden.

Um die Flugtrajektorien zu generieren und in AirTOP zu implementieren, kommt hier das am DLR entwickelte Tool RouGe (*Route Generator*) zum Einsatz, welches als Zwischenplattform die bereitgestellten Flugverlaufsdaten für den Import in AirTOP konvertiert. Die Informationen werden aus dem Originalformat in verschiedene Dateien exportiert, welche die folgenden Informationen enthalten: Flugpläne, Luftfahrzeuge, Routenführungen, Wegpunkte und Flugplätze.

2.2. Simulationstag und Verkehrsdaten

Die Datenbasis bezieht sich auf den kompletten Verkehrstag des 05.10.2016 in Europa (in der Simulation als „Tag 2“ bezeichnet). Als Basis dienen aufgezeichnete Daten der EUROCONTROL, wie auch Daten zur Simulation der Flugsicherungssektoren. Der gesamte originale Datensatz enthält 31.472 Trajektorien, welche in AirTOP als „Flight Plan“ bezeichnet werden. Bei Langstreckenflügen erfolgt der Abflug gegebenenfalls einen Tag vorher am 04.10.2016 („Tag 1“) oder die Landung entsprechend am 06.10.2016 („Tag 3“). Um die Simulation zu beschleunigen, wurden aus dem originalen Datensatz Flugpläne entfernt, die keine Relevanz für das Szenario haben. Das betrifft hauptsächlich Flüge mit

Leichtflugzeugen unter Flugfläche 100 sowie militärische Übungsflüge. Zwecks weitergehender Effizienz der Simulation wurde außerdem die Simulationszeit auf 15:00:00 UTC (Tag 1) bis 18:00:00 UTC (Tag 2) festgelegt. Die Startzeit der neu zu untersuchenden Flüge in den Szenarien soll im späteren Verlauf 06:00:00 UTC (Tag 2) sein, die Landung erfolgt spätestens gegen 18:00:00 UTC. Aufgrund dessen werden vom umgebenden Verkehr lediglich diejenigen Flüge aktiviert, welche nach 04:59:59 UTC (Tag 2) landen bzw. vor 18:00:00 UTC (Tag 2) starten. Somit ist gewährleistet, dass für die Szenarien sämtlicher relevanter Verkehr zur Verfügung steht. Die Zahl der aktiven Flugpläne des normalen Verkehrs beträgt nach Anwendung dieser Kriterien 24.333. Importierte Flüge folgen den in den Daten angegebenen Routen inklusive etwaiger Routenverkürzungen („Directs“) an dem entsprechenden Verkehrstag.

2.3. Angewandtes Luftraummodell

Die Flugsicherungssektoren bestehen im originalen Datensatz aus 9.609 Lufträumen, welche sich im Allgemeinen aus Basissektoren (Elementary Sectors, ES), zusammengelegten Sektoren (Collapsed Sectors, CS) und militärischen Gebieten zusammensetzen. Zur räumlichen Differenzierung sind über verschiedene Konfigurationen Öffnungszeiten der Lufträume definiert. Da der Umfang des Datensatzes die Geschwindigkeit der Simulation wesentlich negativ beeinflussen würde, ohne dabei einen Mehrwert zu erbringen, wurden die Lufträume zielgerichtet vereinfacht. In diesem Zuge wurden sämtliche militärischen Lufträume und Gefahrenzonen aus dem Datensatz entfernt und deren Sektoren zwecks Lückenschluss gegebenenfalls anderen übergreifenden Sektoren zugeordnet. Gleichzeitig wurden die Schemata für die Öffnungszeiten gelöscht und alle zusammengelegten Sektoren entfernt, um Doppelzuweisungen von Sektoren mit den Basissektoren zu vermeiden. Dadurch werden Luftfahrzeuge innerhalb der Basissektoren nur noch von je einem Lotsen kontrolliert. Zu Analyse Zwecken wurden die Basissektoren je einer Bezirkskontrollstelle ((Upper) Area Control Centre, (U)ACC) zugeordnet. Dieser übergeordnete Luftraum hat keine Kontrollfunktion, sondern erhält lediglich die Daten zu Flugstrecke, Konflikanzahl etc. von seinen jeweils zugeordneten Basissektoren, welche dann zusammenfassend dargestellt werden können.

3. AUFBAU DER SZENARIEN

Die hier zugrunde gelegte Annahme soll ein Hilfsgütertransport mit 45 Tonnen Fracht von Deutschland nach Ost-/Zentralafrika sein. Dabei stehen an drei Flugplätzen in Deutschland jeweils 15 t zum Abflug bereit, die entsprechend für drei unterschiedliche Zielorte in Afrika bestimmt sind. Die zu überwindende Distanz beträgt jeweils mindestens 3.000 NM. Die für diesen Zweck in den folgenden Transportszenarien neu hinzugefügten Flüge folgen dabei zur Vereinfachung und zur besseren Vergleichbarkeit untereinander dem Großkreis. Zur Erstellung und Durchführung der Simulationsszenarien kommt wie oben bereits erwähnt das Schnellzeitsimulationstool AirTOP (*Air Traffic Optimizer*) zur Anwendung.

3.1. Variationen der Szenarien

Zur Untersuchung werden vier Szenarien (S0-S3) definiert. S0 fungiert als Referenz- bzw. Basisszenario, die Szenarien S1-S3 stellen unterschiedliche Wege zum Transport der geforderten Frachtmasse dar.

3.1.1. Szenario S0

S0 stellt das Basisszenario dar, womit im späteren Verlauf bestimmte Werte verglichen werden. Hier finden sich lediglich die für den Referenztag importierten Flugpläne (s. 2.2). Es werden noch keine neuen Flüge hinzugefügt.

3.1.2. Szenario S1

In S1 wird zunächst die komplette Fracht zusammengefasst und mit einer einzelnen, konventionell bemannten Boeing 777-F transportiert. Zwecks späterer Verteilung der Fracht muss bei dieser Transportvariante ein Umschlag an einem Hauptstadtflughafen in Ostafrika erfolgen. Die Reiseflughöhe ist Flugfläche 350 bei Mach 0,84.

3.1.3. Szenario S2

Die Fracht wird nun entsprechend der Abflughäfen in dreimal 15 Tonnen unbemannt transportiert. Zu diesem Zweck kommen drei Turboprop-betriebene LM-100J (C-130J) zum Einsatz, welche hinsichtlich der geforderten Nutzmasse/Reichweite ein optimales Profil bieten und hier hypothetisch für den unbemannten Betrieb als RPA umgerüstet wurden. Im Gegensatz zur B777-F aus S1 bieten diese Luftfahrzeuge die Möglichkeit zum Abwurf der Fracht im Zielgebiet. Unter der Voraussetzung, dass diese Möglichkeit auch im unbemannten Betrieb besteht, kann der Transport direkt erfolgen.

Turboprop-Flugzeuge weisen nicht zuletzt aufgrund der natürlichen Geschwindigkeitsbeschränkung hinsichtlich Schockwellenentwicklung an der Propellerflügelspitze im höheren Geschwindigkeitsbereich im Allgemeinen niedrigere Fluggeschwindigkeiten als Turbojet/-fangetriebene Luftfahrzeuge auf. Durch diesen Umstand wird hier die Flugzeit signifikant erhöht, was allerdings aufgrund der Eigenschaft als unbemannter Flug keinen Faktor darstellt und durch die wesentlich bessere ökologische Effizienz ausgeglichen wird, wie im späteren Verlauf noch gezeigt wird. Als jeweilige Reiseflughöhe wird FL290 genutzt (Mach 0,58).

3.1.4. Szenario S3

Die drei RPA aus S2 schließen sich in S3 für einen Großteil des Flugweges zu einer Formation zusammen. Im Formationsabschnitt wird die Einheit der Formation durch ein einzelnes zu simulierendes Luftfahrzeug dargestellt, welches eine entsprechend höhere Staffelung erfährt. Im Vor- und Nachlauf werden alle drei Luftfahrzeuge einzeln mit ihrer jeweiligen Standardstaffelung simuliert. Die Abflugzeiten sind sekundengenau aufeinander abgestimmt, sodass die Formation problemlos und verzögerungsfrei gebildet werden kann.

3.2. Annahmen

Die Simulation unterscheidet sich von der Realität in einigen wesentlichen Punkten. Unter anderem werden dabei die folgenden Punkte angenommen:

- Keine Wettereinflüsse (Wind, Luftdruck, ...),
- Ad-hoc-Transport (keine langfristige Planung),
- Priorisierung des Hilfsgütertransports (heißt hier: keine Ausweichpflicht; anderer Verkehr muss ausweichen),
- Aufgrund der Priorisierung erfolgt keine zusätzliche Staffelung für den Faktor des unbemannten Fluges,
- Keine Berücksichtigung gesperrter Lufträume,
- Keine Verzögerungen an den Abflughäfen, d.h. keine Warteverfahren in der Luft,
- Die minimale vertikale Staffelung beträgt immer 1.000 Fuß (auch für die Formation) und
- Die minimalen lateralen Staffelungswerte ergeben sich in Anlehnung an Vorgaben der amerikanischen FAA [7] nach TAB 1.

von \ zu	Formation	Einzelflug
Formation	7 NM	6 NM
Einzelflug	6 NM	5 NM

TAB 1. Staffelungswerte in der Simulation

4. ERGEBNISSE

Dieser Abschnitt beschreibt in 4.1 die Ergebnisse zu den verkehrlichen Auswirkungen sowie in 4.2 die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

4.1. Ergebnisse bezogen auf die verkehrlichen Einflüsse

Zunächst ist anzumerken, dass der Charakter des unbemannten Fluges der Luftfahrzeuge in dieser Teilauswertung zu den Auswirkungen keine Rolle spielt. Durch die absolute Priorisierung entfällt jegliche gegebenenfalls zusätzlich nötige Staffelung (eigentlich nötig wegen längerer Latenzzeiten im Übertragungsweg etc.). Die RPA finden lediglich in der später folgenden Wirtschaftlichkeitsanalyse Berücksichtigung.

Zur Darstellung der Auswirkungen auf anderen Verkehr werden die Veränderungen bestimmter Parameter gegenüber dem Basisszenario betrachtet. Hierzu werden die neu hinzugefügten Hilfsgüterflüge aus den Gesamtergebnissen herausgerechnet. Die Werte beziehen sich demnach lediglich auf den bereits importierten Verkehr, der auch im Basisszenario vorliegt.

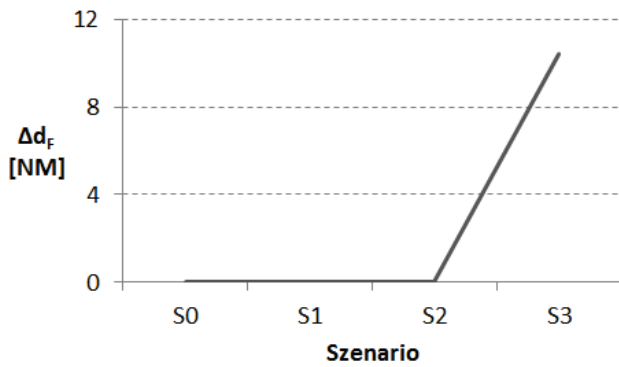


BILD 1. Differenz der Gesamtflugdistanz d_F in Nautischen Meilen [NM]

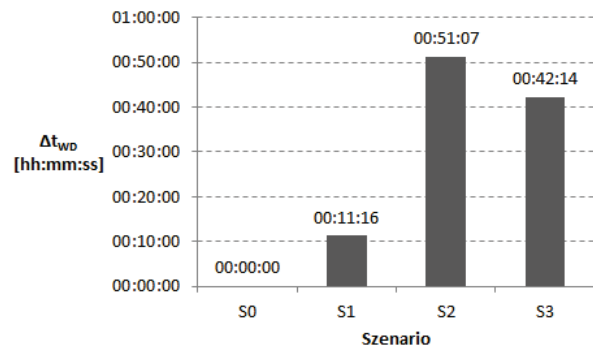


BILD 3. Differenz der gesamten Lotsenbelastungszeit (*Workload*)

In BILD 1 wird die Differenz der geflogenen Gesamtdistanz aller importierten Flüge in den einzelnen Szenarien gegenüber S0 angegeben. Für diesen Wert treten demnach lediglich in S3 leichte Veränderungen auf, der Unterschied beträgt etwa 10,4 NM. Die Diagramme für Flugzeit und Kraftstoffverbrauch gestalten sich entsprechend ähnlich und werden daher hier nicht explizit aufgezeigt. Die Veränderungen in S3 resultieren in einer Differenz der Flugzeit von 2m 20s und in einer vernachlässigbaren Kraftstoffdifferenz von 43,6 kg.

Im Folgenden werden nun zwei weitere Faktoren analysiert und miteinander verglichen. Zum einen die Anzahl der durch die neuen Flüge zusätzlich verursachten Konflikte. Zum anderen die zusätzliche Lotsenbelastungszeit, welche sich hier auf alle Flüge, auch die neu hinzugefügten, bezieht.

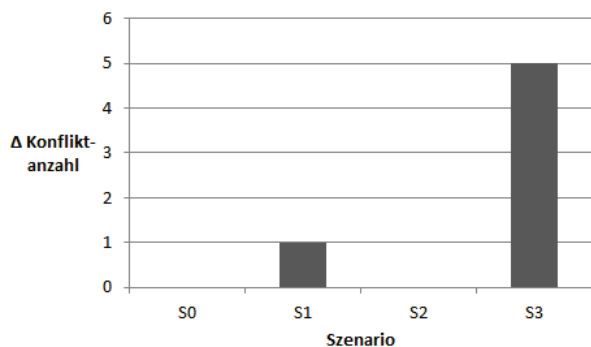


BILD 2. Anzahl zusätzlicher Konflikte gegenüber S0

BILD 2 zeigt die Anzahl zusätzlich verursachter Konflikte der neuen Flüge gegenüber S0. Die einzigen Veränderungen treten in S1 (Konventionell) mit einem und in S3 (Formation) mit fünf zusätzlichen Konflikten auf. Die einzeln fliegenden RPA in S2 generieren dagegen keine neuen Konflikte.

Bei der Lotsenbelastungszeit (BILD 3) weist S2 gegenüber S1 einen um 39m 51s erhöhten Wert auf. In S3 sinkt die Belastungszeit im Vergleich zu S2 um 8m 53s. Die Gründe für die Veränderungen können entweder bei zusätzlich erforderlichen Konfliktlösungen oder bei den Überwachungszeiten liegen. Die Gesamtbelastungszeit liegt in S3 um 30m 58s höher als bei S1.

Gegenüber dem Basisszenario S0 steigt die gesamte Belastungszeit im Einzelflugszenario (S2) um 51m 07s (ca. 0,096%) an, während sie im Formationsflugszenario (S3) lediglich um 42m 14s (0,079%) zunimmt.

Dieser Umstand fällt außergewöhnlich stark auf, da S3 fünf zusätzliche Konflikte verzeichnet, während in S2 keine weiteren Konflikte auftreten (s. BILD 2). Demzufolge ist anzunehmen, dass durch die lange Flugzeit die zusätzlichen Überwachungszeiten für die einzeln fliegenden RPA in S2 einen größeren Einfluss auf die Gesamtbelastungszeit als die vereinzelt auftretenden Konflikte in S3 haben. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass der Differenzwert im konventionellen Szenario (S1) mit 11m 16s (0,021%) am minimalsten ist, obwohl auch dort ein Konflikt entsteht. Dies kann damit begründet werden, dass die drei RPA in S3 im Zu- und Ablauf noch jeweils einzeln überwacht werden, in S1 aber bereits ab dem Start in EDDP lediglich ein LFZ kontrolliert werden muss.

Als Schlussfolgerung ließe sich nach diesem Ergebnis anführen, dass eine kontinuierlich höhere Überwachungszeit einen größeren Anteil an der Gesamtbelastungszeit hat als die Zeit, welche für die Lösung vereinzelt auftretender Konflikte nötig ist. Allerdings steigt die Belastungszeit in S3 gegenüber S1 an, was gegebenenfalls wiederum auf die erhöhte Konfliktanzahl zurückzuführen ist.

4.2. Kostenbewertung der Hilfsgüterflugszenarien

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Wirtschaftlichkeitsanalyse der einzelnen Transportszenarien. Bei der Kostenbetrachtung beschränkt sich diese Arbeit auf Kosten, die sich in den zu betrachtenden Szenarien für eine Formation gegenüber Einzelflügen auf unterschiedliche Weise darstellen. Im Wesentlichen trifft dies auf die drei operativen Kostenblöcke Kraftstoff, Besatzung (Crew) und Flugsicherung zu. Letzterer macht im Regelfall zwar lediglich einen kleinen Teil der Gesamtbetriebskosten aus, wird aber zwecks Anschaulichkeit dennoch

miteinbezogen. Andere Kosten werden aufgrund ihres ebenfalls prozentual geringen Anteils (z.B. Flughafennutzungsgebühren) oder ihrer Komplexität (z.B. Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten) nicht berücksichtigt. Alle Kosten werden in dieser Arbeit mit ausgewählten Parametern monetär quantifiziert. Die Berechnungswährung ist Euro (EUR, €).

4.2.1. Kraftstoffkosten

Die Kraftstoffkosten im Luftverkehr entwickeln sich abhängig vom Rohölpreis und stellen den größten Anteil an den direkten Betriebskosten eines Fluges dar. Alternative Antriebskonzepte, welche z.B. Solarenergie nutzen oder bei denen der Kraftstoff aus Biomasse gewonnen wird, werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Zur Berechnung der absoluten Kraftstoffkosten wird der von der *International Air Transport Association (IATA)* und der Firma Platts gemeinsam herausgegebene *Jet Fuel Price Monitor* zugrunde gelegt. Mit Stand zum 19. Mai 2017 lag der angegebene Durchschnittskostenwert für die Region Europa & GUS bei 503,4 US-Dollar pro metrische Tonne. Für diese Arbeit wird der gegebene Wert zu einem Umrechnungskurs vom 3. Juni 2017 in 446,266 € umgerechnet. Dieser Preis pro metrische Tonne versteht sich exklusive der Kosten für die Durchführung der Betankung durch einen Bodenverkehrsdienstleister, welche hier nicht beachtet werden.

In Szenario S3 sollen zwei der drei RPA im Formationsabschnitt eine Kraftstoffeinsparung von je 15% erfahren. Die Einsparung der gesamten Formation beträgt somit 10%.

4.2.2. Crewkosten

Da es sich bei dem angestrebten Szenario um unbemannte Luftfahrzeuge handelt, ist anzunehmen, dass für jedes einzeln fliegende RPA je ein fernsteuernder Pilot eingesetzt wird. Im Falle des Formationsfluges übernimmt ein einzelner Pilot nach der Formationsbildung die Kontrolle und Verantwortung über die gesamte Formation. Es wird eine monetäre Bewertung der Personalkosten pro Stunde und Pilot vorgenommen. Dabei ist anzunehmen, dass bei einem ferngesteuerten Betrieb die physische und psychische Belastung des Piloten mit höherer Automation abnimmt. Im Gegensatz zu konventionellen Flügen wird das Gehalt leicht niedriger ausfallen, während die Anzahl der Flugstunden theoretisch angehoben werden kann. Hierfür sind jedoch zunächst arbeitspsychologische Studien erforderlich. Bei konventionellen Flügen müssen dagegen noch zusätzlich die Unterbringungskosten der Besatzung am Zielort und gegebenenfalls die Kosten für die Übernahme des Luftfahrzeuges durch eine zweite Besatzung in die Kalkulation miteinbezogen werden. Es wird für die spätere Auswertung angenommen, dass die Personalkosten eines fernsteuernden Piloten auch unter Berücksichtigung von wegfallenden Akklimatisierungszeiten in etwa 157 €/h entsprechen. Unterbringungs- und Verpflegungskosten am Zielort fallen für die fernsteuernden Piloten nicht an. Hinsichtlich der Formation werden weitere Piloten, die sich dann gerade in der Ruhephase befinden, nicht miteinberechnet (Crewanzahl = 1).

Der konventionelle Transport mit der B77L soll mit einem Kapitän (251 €/h) und einem Ersten Offizier (157 €/h) durchgeführt werden. Unter Einbeziehung eines

pauschalen zusätzlichen Spesenbetrages von 50 €/h für Übernachtungs- und Verpflegungskosten ergibt sich ein Betrag von 301 €/h bzw. 207 €/h. Für die Verteilung der Güter kommt im konventionellen Szenario nach dem Umschlag eine Ilyushin Il-76TD mit einer fünfköpfigen Besatzung (inkl. Flugingenieur, Lademeister etc.) zum Einsatz. Die Personalkosten für dieses Muster sollen hier durchschnittlich 150 €/h betragen.

4.2.3. Flugsicherungsgebühren

Die Flugsicherungsgebühren spielen innerhalb der Gesamtkosten eines Fluges in der Regel eine prozentual untergeordnete Rolle, da Kraftstoff-, Crew- und Wartungskosten diese um ein Vielfaches übersteigen. In Deutschland wird im Luftfahrthandbuch, Teil GEN 4.2, nach internationalem Standard eine genaue Definition angegeben, die sich in An- und Abfluggebühren sowie Streckenflug unterscheidet. Die Berechnungsformeln kommen auch in dieser Arbeit mit entsprechenden Eingangswerten zum Einsatz. Hierbei ist anzumerken, dass hier nur die Region Europa miteinbezogen wird. Die Region Afrika wird aufgrund fehlender zuverlässiger Angaben über aktuelle Kostensätze nicht berücksichtigt.

4.2.4. Ergebnis der Kostenrelationen

In TAB 2 werden die Ergebnisse für die Wirtschaftlichkeit der Szenarien in Relation zueinander gesetzt.

	Beschreibung	Kraftstoff	Crew	ATC	Summe
S1	Konventionell	27.859,45 €	4.812,52 €	2.984,18 €	35.656,15 €
S2	RPA (einzeln)	24.360,34 €	4.369,83 €	4.400,25 €	33.130,42 €
		- 12,6%	- 9,2%	+ 47,5%	- 7,1%
S3	RPA (Formation)	23.039,05 €	2.339,30 €	2.834,40 €	28.212,75 €
		- 17,3%	- 51,4%	- 5,0%	- 20,9%

TAB 2. Gesamtergebnis für die drei betrachteten Kostenblöcke in den Szenarien

S3 liefert mit dem Formationsflug über alle drei Kategorien das beste Ergebnis. Deutlich wird dies vor allem bei den Kraftstoffkosten und den Kosten für die Besatzung. Bei letzteren sei noch einmal erwähnt, dass auf dem Formationsabschnitt lediglich ein Pilot gezählt wird. Die Gesamtkosten von S3 liegen knapp 21% unter denen von S1 und etwa 14,8% unter denen von S2. In S2 werden gegenüber S1 ca. 7,1% eingespart.

Im Vergleich der Szenarien ist zusätzlich zu erwähnen, dass dem konventionellen Flug in S1 eine Anlieferung der Fracht nach Leipzig (je 15 t) über den Straßenweg vorausgehen muss. Es erfolgt hier keine Berechnung der Kosten für die Anlieferung, sondern lediglich eine qualitative Aussage zur zusätzlich benötigten Zeit. Pauschal soll die Anlieferung inklusive der Verladezeiten einen Tag in Anspruch nehmen, wobei die Anlieferung von verschiedenen Standorten aus am selben Tag parallel erfolgen kann.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Aus den Ergebnissen zu den verkehrsbezogenen Metriken wird ersichtlich, dass die neuen Flüge den bereits vorhandenen Basisverkehr in den Szenarien kaum

in nennenswerter Weise beeinflussen. Zwar treten in S3 fünf zusätzliche Konflikte auf, diese werden aber von der simulierten Flugsicherung so gelöst, dass die Werte für Flugdistanz, Flugzeit und Kraftstoffverbrauch nur minimal vom Basisszenario.

Die Wahl der Strecken in den Szenarien basierte auf einer vorherigen Recherche zu aktuellen Krisenregionen in Nord- und Zentralafrika. Da mehrere Ziele zur Auswahl standen, sind die Ergebnisse hinsichtlich der Auswirkungen auf anderen Verkehr (Konfliktanzahl etc.) als zufällig einzustufen. Zudem repräsentieren die Ergebnisse bei den genutzten Tagflügen eine hohe Verkehrsdichte. Eine tatsächliche Einführung eines solchen Betriebes für Hilfsgütertransporte würde sich aller Wahrscheinlichkeit nach auf Nachtflüge, d.h. auf Flüge in verkehrsschwachen Zeiten, beschränken. Weitere Alternationsmöglichkeiten könnten sich wie folgt darstellen:

- Nutzung anderer Flughöhen,
- Änderung der Fluggeschwindigkeit,
- Bildung größerer Formationen, die nicht mehr dem Standard entsprechen und daher eine nochmals erhöhte Staffelung erfahren und
- Variation der Flugstrecken, Beachtung gesperrter (militärischer) Lufträume.

Im zweiten Untersuchungsblock, welcher sich der Wirtschaftlichkeit der Transportszenarien widmete, wurde für das Formationsflugszenario (S3) mit 28.212,75 € die niedrigste Gesamtsumme dreier betrachteter Kostenblöcke berechnet. Auch S2 weist in dieser Hinsicht niedrigere Kosten als S1 auf, obwohl hier die Flugsicherungsgebühren durch die einzeln fliegenden RPA am höchsten liegen. Die zwei Umstände, die zugunsten der RPA ausfielen, waren zum einen die niedrigeren Besatzungskosten und zum anderen der geringere spezifische Kraftstoffverbrauch des genutzten Luffahrzeugmusters.

Durch die Formation konnten die Kraftstoffkosten (23.039,05 €) im Vergleich zu S2 (24.360,34 €) lediglich um 1.321,29 € (5,4%) gesenkt werden. Da der Sprung von S1 (27.859,45 €) auf S2 mit 3.499,11 € (12,6%) wesentlich signifikanter ausfällt, ist anzunehmen, dass das größte Einsparpotenzial für Kraftstoff bezogen auf den hier vorgestellten Einsatzzweck weniger in der Nutzung von Formationen als vielmehr in der Wahl des Luffahrzeugmusters zu finden ist. Die Besatzungskosten weisen über die Szenarien hinsichtlich der drei berücksichtigten Kostenblöcke einen sinkenden prozentualen Anteil auf. Die Gründe finden sich in den hohen Stundenkosten in S1 und der Reduzierung auf einen Formationspiloten während des Formationsabschnittes in S3. Der Flugsicherungskostenanteil fällt in S2 erwartungsgemäß höher als in den anderen Szenarien aus, da hier drei Einzelflüge über eine längere Flugstrecke betrachtet werden.

Neben den drei berücksichtigten Kostenblöcken wurden mehrere weitere Blöcke (Wartung und Instandhaltung, Flugplatzgebühren, Bodenabfertigung, etc.) hier nicht miteinbezogen, wodurch sich in der Realität die Ergebnisse anders darstellen können. Ein wesentlicher Punkt ist dabei, dass der Kraftstoffverbrauch in der Simulation nicht realistisch erscheint. Beispielsweise erfolgt keine Änderung des spezifischen Verbrauchs aufgrund Massenabnahme während des Fluges.

Allgemein konnten in dieser Arbeit jedoch

weitreichende Vorteile eines Formationsfluges gegenüber Einzelflügen und konventionellen Transporten festgestellt werden. Dies manifestiert sich sowohl in der kostenseitigen Betrachtung als auch in den untersuchten Auswirkungen auf anderen Verkehr. Hierbei ist besonders die durch die Einheitsbetrachtung sinkende Lotsenbelastung zu referenzieren. Zudem muss in den RPA-Szenarien die Zeitersparnis durch die wegfallende vorherige Anlieferung über den Straßenweg berücksichtigt werden, was einen weiteren Vorteil gegenüber dem konventionellen Transport darstellt. Für den hier untersuchten Transportauftrag ist der Einsatz einer RPA-Formation daher empfehlenswert. Gegebenenfalls weichen die Annahmen für die Abflugorte in der Realität allerdings ab, wodurch beispielsweise der Zeitvorteil der nicht benötigten Anlieferung wegfallen könnte. Des Weiteren wurden hinsichtlich Personal- und Flugsicherungskosten vereinfachte Prinzipien genutzt, welche die Formation begünstigen, aber zukünftig nicht zwangsläufig so zur Anwendung kommen werden. Unbemannte Formationen stellen in ihrem Wesen mit der Kombination aus unbemannten Luffahrzeugen und Formationsflug außerdem zwei gänzlich neue Faktoren im zivilen Luftverkehr dar. Die Einführung eines solchen Betriebskonzeptes ist mit hohen Forschungs- und Investitionskosten verbunden, weswegen sich eine Amortisierung der Kosten mitunter erst einige Jahre oder Jahrzehnte nach der Einführung einstellen könnte.

Eine weitere Erforschung der Auswirkungen von Formationsflügen ist vor dem Hintergrund steigender Verkehrszahlen in Ballungsräumen dennoch als sinnvoll einzustufen, da diese Arbeit gezeigt hat, dass die Flugsicherung durch Formationen unter anderem eine tendenziell höhere Verkehrsmenge überwachen könnte.

- [1] **EUROCONTROL**. *Seven-Year Forecast February 2017 – Flight Movements and Service Units 2017-2023*. Edition Number: 17/01/02-100. Edition Validity Date: 28/02/2017.
- [2] **I. Gerdes, A. Temme, M. Schultz**. *Dynamic Airspace Sectorization using Controller Task Load*. SESAR Innovation Days 2016. 10.11.2016.
- [3] **Bower G., Flanzer, T., und Kroo, I.** *Formation Geometries and Route Optimization for Commercial Formation Flight*. AIAA-2009-3615 - San Antonio: AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2009.
- [4] **Haissig C. M.** *Military formation flight as a model for increased capacity in civilian airspace*. IEEE Cat. No.04CH37576 - Salt Lake City: The 23rd Digital Avionics Systems Conference, 2004.
- [5] **Ning A., Flanzer, T., and Kroo, I.** *Aerodynamic Performance of Extended Formation Flight [Artikel] // Journal of Aircraft*. - 2011. - Vol. 48, No. 3.
- [6] **Luchkova T. et al.**, *Analysis of Impacts an Eruption of Volcano Stromboli could have on European Air Traffic*, ATM Seminar, Lisbon 2015.
- [7] **Federal Aviation Administration**. *JO 7110.65W – Air Traffic Control (Abschnitt 5-5-8: ADDITIONAL SEPARATION FOR FORMATION FLIGHTS)*. 27. Oktober 2015.
- [8] **Van de Ven, Erik**. <https://www.japcc.org/unmanned-cargo-aircraft/>. JAPCC Journal Issue 19. Artikel.
- [9] **Temme A. und Helm S.**, *Unmanned Freight Operations*. DLRK 2016. Braunschweig, 2016.