

MISSIONSPLANUNG UND DISPONIERUNG VON UNBEMANNTEN FLUGGERÄTEN FÜR DEN TRANSPORT MEDIZINISCHER GÜTER

P. Müller*, A. Sturm*, S. Seitz*, D. Moormann*

* Institut für Flugsystemdynamik, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird die im Projekt EULE konzipierte Architektur für das Flottenmanagement unbemannter Fluggeräte zum Transport eiliger medizinischer Güter vorgestellt. Zunächst wird der vorgesehene Betrieb beschrieben und anschließend die sich daraus ergebenden Schnittstellen des Flottenmanagements abgeleitet. Dazu wird erläutert, welche regulatorischen Einschränkungen für den geplanten Flugbetrieb bestehen. Darauf aufbauend wird die notwendige Architektur des Flottenmanagements definiert. Die Missionsplanung des Flottenmanagements erstellt aus den über die Schnittstellen erhaltenen Daten die Flugmissionen. Die Zuweisung von Fluggeräten zu Missionen wird innerhalb des Flottenmanagements durch die Disponierung vorgenommen. Das Flottenmanagement berücksichtigt dabei auch Fälle, in denen an dem gewünschten Startort kein Fluggerät zur Verfügung steht und erst von einer anderen Station bereitgestellt werden muss. In diesem Fall entscheidet die Disponierung auf Basis einer Kostenfunktion, welche umliegende Station das Fluggerät bereitstellt. Nachdem die Gesamtarchitektur des Flottenmanagements vorgestellt wurde, werden Missionsplanung und Disponierung für drei Anwendungsfälle exemplarisch veranschaulicht.

Keywords

Missionsplanung; Disponierung; Transport medizinischer Güter

1. EINLEITUNG

Ein wichtiger Anwendungsfall für den Einsatz von unbemannten Fluggeräten ist der Transport eiliger medizinischer Güter. Dieser Anwendungsfall wird im Forschungsprojekt Europäische UAV-unterstützte Transport-Lösungen für Medizinische Güter (EULE) erforscht. Im Projekt EULE sollen unterschiedliche medizinische Güter zwischen verschiedenen medizinischen Einrichtungen, wie zum Beispiel Krankenhäusern und Laboren, transportiert werden. Dies soll automatisiert auch über längere Strecken mit unbemannten Fluggeräten (UAV) durchgeführt werden.

Für den Transport müssen die Anforderungen der unterschiedlichen Transportgüter berücksichtigt werden. Zu diesen Anforderungen zählen einzuhaltende Temperaturbereiche und maximal zulässige Beschleunigungen, die während des Transportes mit Sensoren überwacht werden müssen. Um eine reibungslose Be- und Entladung der medizinischen Güter zu ermöglichen, sind sogenannte Medports an den Start- und Landeorten vorgesehen. Ein Medport besteht aus einem Roboterarm, der das verwendete Fluggerät in der Luft mit einem Greifer aufnimmt und dem Krankenhauspersonal so zugänglich macht, dass der Cargo Container gut erreichbar ist. Im Rahmen des Projekts wird das Fluggerät TW-Neo verwendet. Bei dem Fluggerät handelt es sich um ein Kippflügelflugzeug, das effizient lange Strecken zurücklegen und trotzdem senkrecht Starten und Landen kann. Das Fluggerät kann über eine austauschbare Nase für unterschiedliche Nutzlasten konfiguriert werden.

Ein sicherer Transport ist nur möglich, wenn das unbemannte Fluggerät in den Luftraum integriert wird, um Konflikte mit anderen Luftraumteilnehmern zu vermeiden. Dazu wird ein Unmanned Traffic Management (UTM) System genutzt. In Abbildung 1 ist das angestrebte Betriebsgebiet des zu entwickelnden Systems vereinfacht dargestellt.

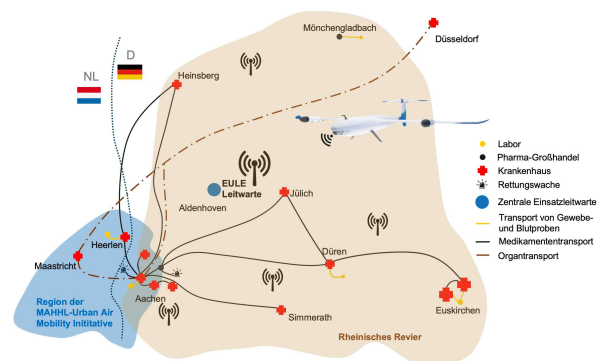


BILD 1. Angestrebtes Betriebsgebiet im Projekt EULE

In diesem Beitrag wird die für den Transport eiliger medizinischer Güter konzipierte Architektur für das Flottenmanagement von unbemannten Fluggeräten vorgestellt, die Aufgabe des Flottenmanagements besteht darin, eine Mission auf Basis eines Transportauftrages zu planen und das am besten dafür geeignete Fluggerät auszuwählen. Die Zuordnung eines Fluggeräts zu einer Mission erfolgt auf Basis einer Kostenfunktion. Im vorangegangenen Projekt FALKE wurde für eine ad-hoc Planung von

Missionen ein Ansatz vorgestellt, der auf Basis von Anwenden festgelegten Prioritäten und durch den aktuellen Flugzustand des UAVs die Reihenfolge der Aufträge festlegt. Der Ansatz wird in [1] beschrieben. Die dort im Detail bereits stattfindende Planung auf lokaler Bahnebene ist im Projekt EULE im Flottenmanagement nicht erforderlich, da dort ein größerer Planungshorizont vorhanden ist und pro Flug nur eine Transportmission durchgeführt wird, sodass hier zunächst nur eine globale Bahnplanung durchgeführt werden muss.

2. FLOTTENMANAGEMENT IM PROJEKT EULE

Das Flottenmanagement erstellt Missionen, verwaltet die Fluggeräte, weist den Fluggeräten Missionen zu und führt diese durch. Diese Aufgaben werden auf drei Hauptbestandteile aufgeteilt. In Abbildung 2 sind die Hauptbestandteile des Flottenmanagements dargestellt. Zum Flottenmanagement gehört neben der Missions-

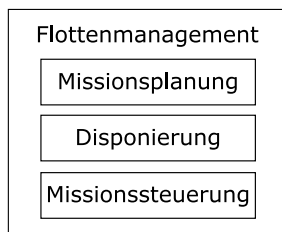


BILD 2. Hauptbestandteile des Flottenmanagements

planung und der Disponierung der Fluggeräte auch die Missionssteuerung, die die Mission durchführt und überwacht. Auf diese wird in diesem Beitrag allerdings nicht weiter eingegangen.

2.1. Aufgaben der Missionsplanung und Disponierung

Die Aufgabe der Missionsplanung und Disponierung besteht darin, die Transportaufträge der medizinischen Einrichtungen nach eingereicher Priorität und Dringlichkeit abzuarbeiten. Dabei muss auch die Bereitstellung eines geeigneten Fluggeräts berücksichtigt werden, sollte am Startort des Transportauftrags kein für den Transport des medizinischen Transportguts geeignetes Fluggerät verfügbar sein.

2.2. Regulatorische Rahmenbedingungen in Deutschland

Für den Betrieb unbemannter Fluggeräte sowie den Transport medizinischer Güter sind bestimmte Rahmenbedingungen zu beachten, die im Folgenden erläutert werden. Der Betrieb muss im Einklang mit den geltenden rechtlichen Vorgaben erfolgen – insbesondere im Hinblick auf Flugrouten und die Art der transportierten Güter. Die im Folgenden beschriebenen Rahmenbedingungen beschränken sich auf die Situation in Deutschland. So darf ein Flugbetrieb außerhalb der Sichtweite nur nach erfolgter Genehmigung durch die Landesluftfahrtbehörde beziehungsweise das Luftfahrtbundesamt

erfolgen. Die Regeln für den Betrieb eines unbemannten Luftfahrzeugs sind dabei in der LuftVO [2] und der EU-Verordnung 2019/947 [3] niedergeschrieben. Zur Erlangung einer entsprechenden Genehmigung muss zunächst eine Risikoabschätzung nach den Vorgaben des Specific Operational Risk Assessment (SORA) durchgeführt werden. Eine Zusammenfassung des Prozesses ist in [4] zu finden. Hier wird für das verwendete Fluggerät und das beantragte Fluggebiet eine Risikoabschätzung durchgeführt und die Risikoklasse ermittelt, die am Ende die Anforderungen an den Betrieb und die notwendige Zuverlässigkeit des unbemannten Fluggeräts festlegt. Im SORA-Prozess muss bereits berücksichtigt werden, ob es sich bei der angedachten Fracht um ein Gefahrgut handelt. Ist dies der Fall erhöhen sich die Anforderungen an den Betrieb [4–6]. Beispielsweise handelt es sich laut [3] bei infiziertem Blut um ein Gefahrgut. Durch diese Rahmenbedingungen darf die Missionsplanung Missionen nur innerhalb des auf diese Weise genehmigten Gebiets planen. Zu diesen Einschränkungen kommen die Naturschutzgebiete hinzu, die nur nach den Regeln der LuftVO § 21h (Regelungen für den Betrieb von unbemannten Fluggeräten in geografischen Gebieten nach der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947) Absatz 6 überflogen werden dürfen, oder wenn die einzelnen Naturschutzbehörden dem Betrieb ausdrücklich zugestimmt haben [2, 3]. Diese Rahmenbedingungen führen zu Einschränkungen an eine spontane Anpassung des Einsatzgebiets sowie die Erweiterung der zu transportierenden Güterarten, da hier zunächst zu prüfen ist, ob diese unter den in einer bestehenden Genehmigung geltenden Annahmen transportiert werden dürfen. Die zu transportierenden medizinischen Güter stellen darüber hinaus zusätzliche Anforderungen an die Umgebungsbedingungen während des Transports, z.B. an die Temperatur, sowie an die erforderliche Dokumentation. Die gesetzlichen Bestimmungen sind in Deutschland im Arzneimittelgesetz und im Transplantationsgesetz geregelt [7, 8].

2.3. Architektur des Flottenmanagements

In Abbildung 3 ist das Flottenmanagement bestehend aus den Komponenten Missionsplanung, Disponierung und Missionssteuerung sowie den Schnittstellen nach außen dargestellt. Die Pfeile geben dabei an, in welche Richtung Daten über die Schnittstellen übermittelt werden. Über die Schnittstelle zu den medizinischen Einrichtungen werden die grundlegenden Daten der Aufträge übermittelt. Diese beinhalten neben Start- und Zielort die Art und das Gewicht des Transportguts sowie die Anforderungen an die Umgebungsbedingungen und die Priorität des Auftrags. Über diese Schnittstelle wird der medizinischen Einrichtung auch der aktuelle Status der Aufträge mitgeteilt. Über die Schnittstelle zum Medport wird zum einen der Status des Medports abgefragt, zum anderen wird dem Medport der Zeitpunkt mitgeteilt, wann dieser die notwendigen Vorbereitungen für einen Start oder eine Landung treffen soll.

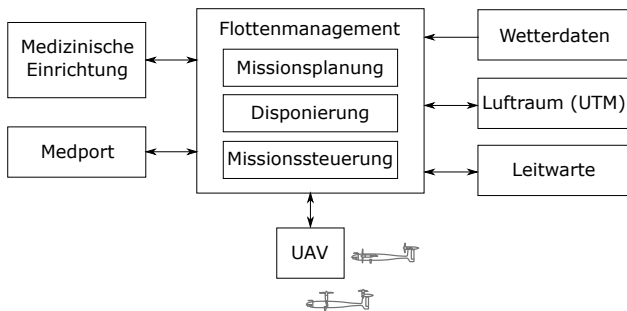


BILD 3. Architektur des Flottenmanagements

Für die Abschätzung der für einen Flug benötigten Energie werden über eine weitere Schnittstelle die Wetterdaten für das Fluggebiet inklusive der vorherrschenden Windsituation abgerufen. Dadurch wird ein windabhängiger Energieverbrauch berücksichtigt.

Über die Schnittstelle zum UTM-System wird abgefragt, ob für das Betriebsgebiet Luftraumeinschränkungen existieren, die bei der Bahnplanung berücksichtigt werden müssen. Zudem werden Freigaben für geplante Routen beim UTM angefragt.

Die UAVs werden über eine weitere Schnittstelle an das Flottenmanagement angeschlossen. Die Schnittstelle wird genutzt, um Telemetriedaten vom Fluggerät und der transportierten Fracht zu übermitteln und die von der Missionsplanung geplanten Missionen an das entsprechende UAV zu senden.

Die Leitwarte ist als freigebende und überwachende Instanz vorgesehen. Jede Mission muss von den Leitwarte freigegeben werden. Während der Mission wird die Leitwarte mit Informationen zum Missionsfortschritt versorgt und kann eingreifen.

2.4. Ablauf des Flottenmanagements

In Abbildung 4 ist der Ablauf des Flottenmanagements dargestellt. Die drei Hauptbestandteile des Flottenmanagements werden zentral auf einem Server ausgeführt, wobei die Missionsplanung und Disponierung in weitere Bestandteile und Prozessschritte zerlegt werden. Diese Bestandteile und der sich ergebende Ablauf der Missionsplanung und Disponierung werden im Folgenden beschrieben.

Der Prozess des Flottenmanagements beginnt, sobald Aufträge über die Schnittstelle empfangen werden und im Modul Missionsplanung in die entsprechenden Tabellen in der Datenbank abgelegt werden. In der Datenbank sind Information über die Aufträge, Fluggeräte und Medportstandorte abgelegt. In der Tabelle Transportaufträge sind die Aufträge gespeichert, die über die Schnittstelle zu den medizinischen Einrichtungen empfangen wurden. Zu den Auftragsdaten zählen neben Start- und Zielort auch Priorität des Auftrags, Art des Transportguts, Gewicht, Temperatur und Vibrationsempfindlichkeit sowie der Eingangszeitpunkt des Auftrags. Um zu verhindern, dass die Wartezeit für Aufträge zu groß wird, ist die maximale Anzahl der wartenden Aufträge, die sich in der Transportaufträge Tabelle befinden dürfen, beschränkt. Die Obergrenze der wartenden Aufträge

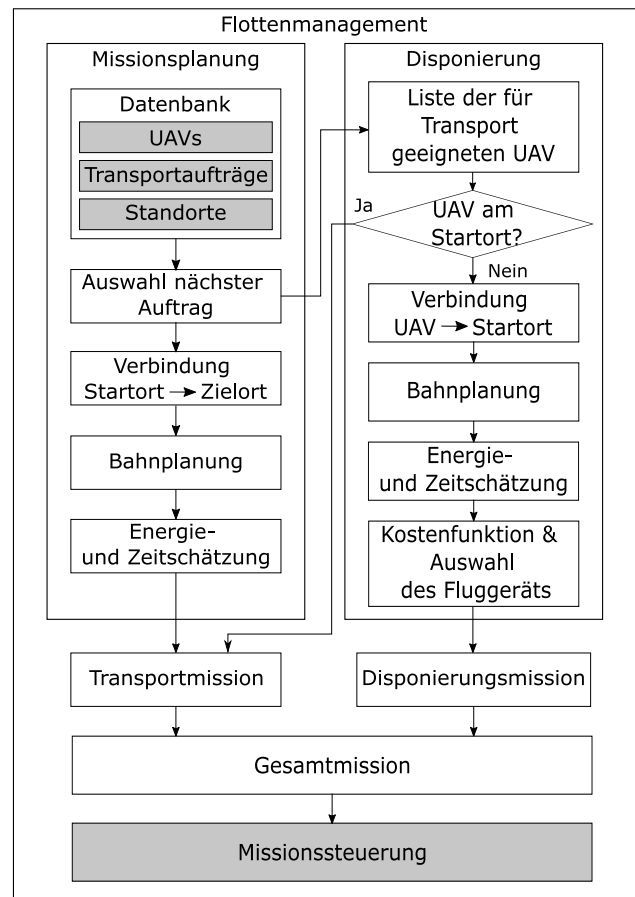


BILD 4. Ablaufplan des Flottenmanagements für EULE

richtet sich dabei nach der Anzahl der zur Verfügung stehenden Fluggeräte. Bei Überschreitung dieser Grenze wird geprüft, ob ein neu eingegangener Auftrag eine höhere Priorität aufweist als ein noch nicht begonnener Auftrag in der Tabelle der Transportaufträge. Ist der neu eingegangene Auftrag niedriger priorisiert, wird er abgelehnt. Ist ein Auftrag aus der Tabelle niedriger priorisiert, wird dieser aus der Tabelle entfernt und der Auftraggeber informiert, dass der Auftrag nicht durchgeführt wird. In der Tabelle Standorte werden die Positionen der Medports und ihr Status nachgehalten. Der Medportstaus gibt darüber Auskunft, ob aktuell ein Fluggerät am Medport aufgenommen ist und ob dieses aktuell für das medizinische Personal zugänglich ist. In der UAV-Tabelle werden die Leistungsdaten der eingesetzten UAVs abgelegt. Zu diesen zählen die Reichweite, die Ausstattung und die maximale Nutzlast des UAVs. Darüber hinaus wird dort gespeichert, ob ein UAV einsatzbereit ist, sich in der Wartung befindet oder ob es bereits eine Mission durchführt. Es wird davon ausgegangen, dass eine UAV-Flotte aus UAVs des gleichen Typs eingesetzt wird, die sich nur durch Anpassungen an verschiedene Nutzlasten (medizinische Güter) unterscheiden, aber die selben Energieverbrauchsdaten aufweisen.

Im nächsten Schritt der Missionsplanung wird, sobald mindestens ein UAV verfügbar ist, der nächste zu bearbeitende Auftrag ausgewählt. Dafür werden die Aufträge zunächst nach ihrer Priorität und innerhalb der glei-

chen Prioritätskategorie nach ihrem Eingangszeitpunkt sortiert.

Wurde der nächste Auftrag ausgewählt, beginnt der Prozess der eigentlichen Missionsplanung. Da unabhängig davon, ob bereits ein UAV am Startort verfügbar ist, stets die Route zwischen Start- und Zielort des Transportauftrags geplant werden muss, werden zunächst die Standortdaten aus der Datenbank ausgelesen und an die Bahnplanung übermittelt. Die Bahnplanung erhält darüber hinaus das erlaubte Fluggebiet, in dem die Bahn geplant werden darf, inklusive der Höheninformationen. Zusätzlich werden bisher unbekannte temporäre Luftraumeinschränkungen über die Schnittstelle zum UTM-System abgerufen. Für die Bahnplanung bietet es sich an, einen Bahnplanungsalgorithmus, wie den CO-WEX [9] zu verwenden, der bereits die Einschränkungen des Fluggeräts, wie den minimalen Kurvenradius, bei der Planung berücksichtigen kann.

Sobald eine fliegbare Bahn geplant wurde, wird im nächsten Schritt der Missionsplanung mit Hilfe eines Modells des UAVs eine Energie- und Zeitabschätzung durchgeführt, um zu prüfen, ob die verfügbare Akkukapazität des UAVs für die Mission ausreicht. Bei der Abschätzung werden auch die aktuellen Windverhältnisse berücksichtigt. Kann für ein UAV keine fliegbare Bahn ermittelt, so wird dieses in der weiteren Disponierung nicht mehr berücksichtigt.

Parallel zur Planung der Bahn für den Flug zwischen Start- und Zielort des Transportguts läuft der Prozess der Disponierung eines geeigneten Fluggeräts an. Dazu werden zunächst anhand der Anforderungen des Auftrags geprüft, welche UAVs hinsichtlich ihrer Nutzlast und Ausstattung (z. B. Sensoren zur Überwachung von Vibrationen) verwendet werden können. Im nächsten Schritt wird geprüft, ob bereits ein für diesen Transport geeignetes Fluggerät am Startort verfügbar ist. Ist dies der Fall, so ist die Disponierung an diesem Punkt abgeschlossen und die Transportmission kann mit der durch die Missionsplanung geplanten Bahn an die Missionssteuerung übergeben werden. Ist dies jedoch nicht der Fall, wird für jedes geeignete UAV die Verbindung vom UAV Standort zum Startpunkt der Transportmission ermittelt und an die Bahnplanung übergeben. Diese plant analog zur Bestimmung der Bahn vom Start- zum Zielort der Transportmission für jedes geeignete UAV eine fliegbare Bahn. Anschließend wird für jede geplante Bahn eine Energie- und Zeitabschätzung durchgeführt. Übersteigt der dabei ermittelte Energieverbrauch die Akkukapazität des verwendeten UAVs, wird dieses UAV von der Disponierung nicht weiter berücksichtigt. Die Bahnplanung und Abschätzung der benötigten Energie und Zeit wird dabei für alle verwendbaren UAVs parallel durchgeführt, um die für die Disponierung eines UAVs benötigte Zeit zu reduzieren.

Mit der von der Bahnplanung berechneten Strecke und dem Ergebnis der Energie- und Zeitabschätzung wird im Anschluss das Fluggerät mit den niedrigsten, von der in Abschnitt 2.5 beschriebenen Kostenfunktion berechneten Kosten ausgewählt.

Die geplante Flugbahn des ausgewählten UAVs wird als Disponierungsmission zusammen mit der von der Missi-

onsplanung geplanten Transportmission zu einer Gesamtmission zusammengefasst und an die Missionssteuerung übergeben. Diese ist dafür zuständig, die Missionen auf das zugeteilte UAV hochzuladen und zu prüfen, ob die beteiligten Medports einsatzbereit sind. Die Missionsfreigabe muss von der Leitwarte für jede Teilmission einzeln gegeben werden. Die Missionssteuerung wird im Rahmen dieses Beitrags nicht weiter betrachtet.

2.5. Kostenfunktion der Disponierung

Der Disponierung des Fluggeräts wird die in Gleichung 1 gegebene Kostenfunktion zugrunde gelegt. Dabei bezeichnet C_i die Kosten für die Bereitstellung des UAVs. Die benötigte Energie, Zeit und Strecke für die Bereitstellung des UAVs wird mit den maximal zur Verfügung stehenden Werten des UAVs normiert, um eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlich ausgestatteten UAVs zur erreichen. Über die Faktoren k_i wird der Anteil der einzelnen Parameter gewichtet. Für die Disponierung im Projekt EULE gilt: $k_1 > k_2 > k_3$, dies wird dadurch begründet, dass eine zu hohe Ausreizung der Akkukapazität zu Problemen hinsichtlich der Energiereserven bei sich ändernden Windverhältnissen führen kann. Grundsätzlich wird gefordert, dass $E_{\text{Flug}}/E_{\text{max}} < 0,75$ ist, um eine Reserve gegenüber Ungenauigkeiten in der Windvorhersage und Energieschätzung zu gewährleisten. Es wird stets angenommen, dass die Akkus der Fluggeräte zu Beginn einer Mission vollständig geladen sind. Nach einer erfolgten Disponierungsmission werden die Akkus des Fluggeräts gegen vollständig geladene Akkus getauscht.

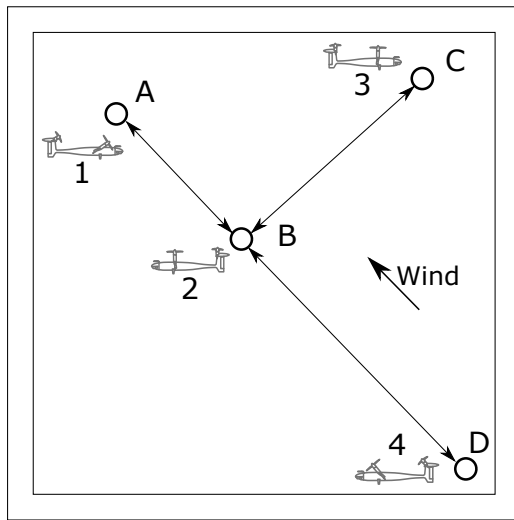
$$(1) \quad C_i = k_1 \cdot \frac{E_{\text{Flug}}}{E_{\text{max}}} + k_2 \cdot \frac{t_{\text{Flug}}}{t_{\text{max}}} + k_3 \cdot \frac{d_{\text{Flug}}}{d_{\text{max}}}$$

3. ANWENDUNGSBEISPIELE

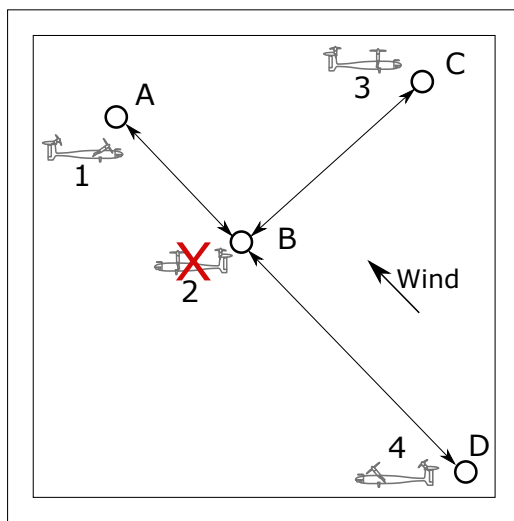
In folgendem Abschnitt soll anhand von drei Beispielen erläutert werden, wie die Disponierung genutzt wird, um festzulegen, welches UAV dazu verwendet wird, einen Transportauftrag durchzuführen. Für die Beispiele wird ein Einsatzgebiet betrachtet, in dem es vier Medportstationen gibt, die mit A-D bezeichnet werden. An jedem dieser Medportstandorte wird ein UAV stationiert, die UAVs sind mit den Nummern 1-4 gekennzeichnet. Das Einsatzgebiet mit den drei Beispielen ist in Abbildung 5 dargestellt.

Für die Beispiele wird angenommen, dass keine Hindernisse zwischen den Medportstandorten existieren und der im Einsatzgebiet vorherrschende Wind konstant ist. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Fluggeräte mit einer konstanten aerodynamischen Geschwindigkeit von $V_A = 25 \text{ m/s}$ fliegen. Der Abstand zwischen den Medportstationen ist in Tabelle 1 gegeben.

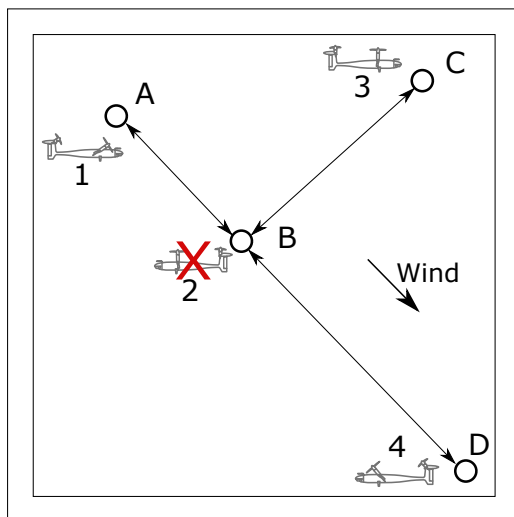
Für die drei Beispiele werden zwei Transportaufträge betrachtet für das Beispiel (a) wird Transportauftrag 1 und für die Beispiele (b) und (c) Transportauftrag 2 betrachtet. Die im Transportauftrag enthaltenden Daten werden hier auf den Startort und das Ziel sowie das Gewicht des zu transportierenden Transportguts reduziert. Eine



(a)



(b)



(c)

BILD 5. Einsatzgebiet mit drei Beispielen

Übersicht der beiden Transportaufträge ist in Tabelle 2 gegeben.

Zur Vereinfachung wird bei den UAVs nur der aktuelle Standort und die transportierbare Nutzlast betrachtet.

Strecke	Distanz
AB	30 km
BC	40 km
BD	50 km

TAB 1. Distanzen zwischen den Medportstationen

Auftrag Nr.	Start	Ziel	Gewicht
1	B	D	0,5 kg
2	B	D	1 kg

TAB 2. Beispielaufträge

Eine Übersicht der Daten der UAVs ist in Tabelle 3 zusammengefasst.

UAV	Standort	Nutzlast
1	A	1,5 kg
2	B	0,75 kg
3	C	1,25 kg
4	D	1,1 kg

TAB 3. UAV Daten

Die Energieabschätzung wird für die Beispiele vereinfacht durch Gleichung 2 durchgeführt. Bei dieser vereinfachten Abschätzung wird angenommen, dass das UAV zehn Prozent seiner verfügbaren Energie für den Start- und Landevorgang verbraucht. Zu diesem Grundverbrauch kommt ein Anteil, der den Verbrauch im Reiseflug annähert und mit der Flugdauer in Minuten multipliziert wird.

$$(2) \quad \frac{E_{\text{Flug}}}{E_{\text{max}}} = 0.1 + 0.0105 \frac{1}{\text{min}} \cdot t_{\text{Flug}}$$

Für die Beispiele werden die in Tabelle 4 gegebenen Parameter zur Bestimmung der Kosten mit Gleichung 1 verwendet.

3.1. Beispiel (a)

Für das Beispiel (a) wird ein konstanter Wind von $V_W^{(a)} = 10 \text{ m/s}$ aus Süd-Ost angenommen. Das zu Beispiel (a) zugehörige Einsatzgebiet ist in Abbildung 5a dargestellt. Es wird der erste Transportauftrag betrachtet. Die Überprüfung der UAVs ergibt, dass für den ersten Auftrag alle UAVs im Einsatzgebiet geeignet sind. Damit ist auch bereits ein geeignetes UAV, in diesem Fall UAV 2, am Startort des Auftrags verfügbar und die Disponierung kann hier beendet werden. Damit stellt Beispiel (a) den einfachsten Fall dar.

3.2. Beispiel (b)

Im zweiten Beispiel wird Auftrag zwei betrachtet, wie im ersten Beispiel wird ein Wind von $V_W^{(b)} = 10 \text{ m/s}$ aus Süd-Ost angenommen. Das zum zweiten Beispiel gehörende Einsatzgebiet ist in Abbildung 5b zu sehen. Bei der Überprüfung der geeigneten UAVs fällt auf, dass UAV 2 auf Grund seiner zu niedrigen maximalen Nutzlast für

Parameter	Wert
k_1	3
k_2	2
k_3	1
$t_{\max}$	60 Minuten
$d_{\max}$	100 km

TAB 4. Parameter der Kostenfunktion

Auftrag 2 ungeeignet ist. Dies führt dazu, dass kein geeignetes Fluggerät am Startort der Mission vorhanden ist. Nun werden zunächst die Bahnen von den Standorten der geeigneten UAVs zum Startort des Auftrags bestimmt und die Energie und Zeit unter Berücksichtigung des Windes abgeschätzt. Dabei sollte beachtet werden, dass im Beispiel (b) UAV 1 Gegenwind hat und sich somit die Geschwindigkeit über Grund des UAVs verändert und es langsamer als die angegebenen 25 m/s fliegt. UAV 4 hat Rückenwind und kann deutlich schneller fliegen. Daraus ergeben sich die in Tabelle 5 eingetragenen Flugzeiten der Strecken AB und DB. Bei UAV 3 kommt der Wind genau von der Seite, sodass sich auch hier die Geschwindigkeit über Grund verändert. Mit den für die Beispiele getroffenen Annahmen ergeben sich die in Tabelle 5 zusammengefassten Werte.

UAV	V_K	$\frac{E_{\text{Flug}}}{E_{\text{max}}}$	Zeit	Kosten
1	15 m/s	0,45	33,33 min	2,7611
2	-	-	-	-
3	22,91 m/s	0,406	29,1 min	2,5866
4	35 m/s	0,35	23,81 min	2,3437

TAB 5. Auswertung der Kostenfunktion Beispiel (b)

Mit Tabelle 5, lässt sich ermitteln, dass UAV 4 die niedrigsten Kosten verursacht, obwohl es die längste Strecke zurücklegen muss. Dies liegt an dem deutlich niedrigeren Energieverbrauch, aufgrund der für das UAV günstigen Windrichtung. In diesem Fall wird UAV 4 für die Durchführung des Transportauftrags ausgewählt.

3.3. Beispiel (c)

Beispiel (c) baut auf Beispiel (b) auf, es wird der gleiche Transportauftrag betrachtet, allerdings hat sich die Windrichtung gegenüber dem zweiten Beispiel um 180° gedreht und sich gleichzeitig die Windgeschwindigkeit auf $V_W^{(c)} = 12 \text{ m/s}$ erhöht. Das zu Beispiel (c) gehörige Einsatzgebiet ist in Abbildung 5c dargestellt.

Wie in Beispiel (b) ist auch in Beispiel (c) das UAV 2, auf Grund seiner geringen maximalen Nutzlast, nicht verwendbar, sodass kein geeignetes UAV am Startort verfügbar ist. Die Disponierung muss daher, wie schon in Beispiel (b), das am besten geeignete UAV zum Startpunkt transferieren. Mit der geänderten Windsituation ergeben sich die in Tabelle 6 zusammengetragenen Werte. Dabei gelten die gleichen Erklärungen für die unterschiedlichen Flugzeiten und Geschwindigkeiten wie in Beispiel (b), nur hat UAV 1 nun Rückenwind, UAV 4 Gegenwind

und UAV 3 Seitenwind. Beim Überprüfen der Werte fällt

UAV	V_K	$\frac{E_{\text{Flug}}}{E_{\text{max}}}$	Zeit	Kosten
1	37 m/s	0,24	13,51 min	1,4761
2	-	-	-	-
3	21,93 m/s	0,419	30,4 min	2,6709
4	13 m/s	0,77	64,1 min	4,9560

TAB 6. Auswertung der Kostenfunktion Beispiel (c)

auf, dass UAV 4 mit $E_{\text{Flug}}/E_{\text{max}} = 0,77 > 0,75$ mehr Energie verbrauchen würde als zugelassen, sodass es von der weiteren Disponierung ausgeschlossen werden muss. Damit bleiben nur UAV 1 & 3 für die Durchführung des Transportauftrags übrig, wobei UAV 1 dabei die deutlich niedrigeren Kosten verursacht und somit für die Durchführung des Transportauftrags ausgewählt wird.

3.4. Transportauftrag

Für den durchzuführenden Transportauftrag ergeben sich für die unterschiedlichen Windsituationen die in Tabelle 7 aufgelisteten Flugdauern und Verbrauchswerte. Die Transportmissionen von Beispiel (a) und (b) sind identisch, da der Wind für beide Beispiele gleich ist. Bei allen Transportmissionen liegt der Energieverbrauch unter der geforderten Grenze, sodass die Missionen mit den gegebenen Windverhältnissen durchgeführt werden können.

Beispiel	Strecke	$\frac{E_{\text{Flug}}}{E_{\text{max}}}$	Zeit
(a)	50 km	0,68	55,55 min
(b)	50 km	0,68	55,55 min
(c)	50 km	0,34	22,52 min

TAB 7. Distanz, Flugdauer und Energieverbrauch der Transportmissionen

4. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurde ein Flottenmanagementsystem für die Missionsplanung und Disponierung unbemannter Fluggeräte zum Transport medizinischer Güter vorgestellt. Dazu wurden zunächst die regulatorischen Rahmenbedingungen in Deutschland und die Aufgaben des Flottenmanagements zusammengefasst. Im Anschluss wurden die Schnittstellen und die Architektur des Flottenmanagements erläutert. Das Flottenmanagement wird dabei in Missionsplanung, Disponierung und Missionssteuerung unterteilt. Darauf aufbauend wurde der Ablauf der Missionsplanung und der Disponierung erläutert und die Kostenfunktion präsentiert, die die Grundlage der Disponierungsentscheidung bildet. Anhand dreier Beispiele wurde die Kostenfunktion weiter untersucht und ihre Funktionsweise im Zusammenspiel mit dem restlichen Flottenmanagement veranschaulicht.

FÖRDERUNG

Das Projekt EULE wird im Rahmen der Innovationsinitiative mFUND durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Kontaktadresse:

philipp.mueller@fsd.rwth-aachen.de

Literatur

- [1] Isabelle Barz. *Flugbahnplanung für Kippflügelflugzeuge zur Unterstützung im Rettungseinsatz*. Dissertation, 2023. DOI: [10.18154/RWTH-2023-03181](https://doi.org/10.18154/RWTH-2023-03181).
- [2] *Luftverkehrs-Ordnung: LuftVO*. Bundesministerium der Justiz, 2021.
- [3] Europäische Kommission. EU-Verordnung 2019/947, 2019.
- [4] EASA. Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems: - Revision from September 2022. 2022.
- [5] *Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods by Air*, volume 9284 of *Doc / International Civil Aviation Organization*. Council of ICAO, 2023-2024 edition edition, 2022. ISBN: 9789292656881.
- [6] Civil Aviation Authority. Advisory Circular (AC) 102-37: Unmanned Aircraft Systems (UAS) Carrying Dangerous Goods.
- [7] *Gesetz über Spenden, Entnahme und Transplantation von Organen und Geweben (Transplantationsgesetz - TPG)*. Bundesministerium der Justiz, 1997.
- [8] *Gesetz über den Verkehr mit Arzneimitteln (Arzneimittelgesetz - AMG)*. Bundesministerium der Justiz, 1967.
- [9] I. Barz, L. Danielmeier, S. Seitz, und D. Moormann. Kollisionsfreie Flugbahnen für Kippflügelflugzeuge auf Basis des Wavefront-Algorithmus unter Berücksichtigung flugmechanischer Beschränkungen. DOI: [10.25967/530192](https://doi.org/10.25967/530192).