

This is the author's copy of the publication as archived with the DLR's electronic library at <http://elib.dlr.de>. Please consult the original publication for citation.

Autonomes Missionsmanagement für unbemannte solarbetriebene Flugzeuge mit extrem langer Flugdauer

Federico Mothes; Andreas Klöckner; Jane Jean Kiam; Martin Köhler; Alexander Pollok; Alexander Knoll; Axel Schulte

High-Altitude-Pseudo-Satellites (HAPS), auch High-Altitude-Long-Endurance Aircraft (HALE) genannt, gewinnen zunehmend an Bedeutung. Da diese solar-elektrisch betriebenen Flugzeuge aus Gewichtsgründen über sehr wenig gespeicherte elektrische Energie verfügen und eine geringe Festigkeit aufweisen, stellen die Themen Energiemanagement und Wetter für den Betrieb eine große Herausforderung dar. Zukünftig wird ein höherer Automatisierungsgrad der HAPS-Systeme angestrebt, damit der Missionsbetrieb auch bei Fehlfunktionen, wie etwa dem Verlust der Kommunikation zur Bodenstation, sichergestellt ist. Das Ludwig Bölkow Campus-Förderprojekt StraVARIA befasst sich mit der Automatisierung von Funktionen im Kontext des Wettergeschehens. Die vorliegende Publikation stellt im Besonderen den Themenkomplex "Autonomes Missionsmanagement" vor.

Copyright Notice

The author has retained copyright of the publication and releases it to the public according to the terms of the DLR elib archive.

Citation Notice

```
@INPROCEEDINGS{mothes2016autonomes,
  author = {Federico Mothes and Andreas Klöckner and Jane Jean Kiam and Martin Köhler and Alexander Pollok and Alexander Knoll and Axel Schulte},
  title = {Autonomes Missionsmanagement für unbemannte solarbetriebene Flugzeuge mit extrem langer Flugdauer},
  booktitle = {65. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK). "Luft- und Raumfahrt – Hochtechnologie aus Deutschland"},
  year = {2016},
  month = {13 - 15 September},
  abstract = {High-Altitude-Pseudo-Satellites (HAPS), auch High-Altitude-Long-Endurance Aircraft (HALE) genannt, gewinnen zunehmend an Bedeutung. Da diese solar-elektrisch betriebenen Flugzeuge aus Gewichtsgründen über sehr wenig gespeicherte elektrische Energie verfügen und eine geringe Festigkeit aufweisen, stellen die Themen Energiemanagement und Wetter für den Betrieb eine große Herausforderung dar. Zukünftig wird ein höherer Automatisierungsgrad der HAPS-Systeme angestrebt, damit der Missionsbetrieb auch bei Fehlfunktionen, wie etwa dem Verlust der Kommunikation zur Bodenstation, sichergestellt ist. Das Ludwig Bölkow Campus-Förderprojekt StraVARIA befasst sich mit der Automatisierung von Funktionen im Kontext des Wettergeschehens. Die vorliegende Publikation stellt im Besonderen den Themenkomplex "Autonomes Missionsmanagement" vor.},
  owner = {kloe_ad},
  timestamp = {2016.09.20}
}
```

- [1] Federico Mothes, Andreas Klöckner, Jane Jean Kiam, Martin Köhler, Alexander Pollok, Alexander Knoll, and Axel Schulte. Autonomes Missionsmanagement für unbemannte solarbetriebene Flugzeuge mit extrem langer Flugdauer. In 65. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK). "Luft- und Raumfahrt – Hochtechnologie aus Deutschland", 13 - 15 September 2016.

AUTONOMES MISSIONSMANAGEMENT FÜR UNBEMANNTE SOLARBETRIEBENE FLUGZEUGE MIT EXTREM LANGER FLUGDAUER

F. Mothes¹, A. Klöckner², J. J. Kiam³, M. Köhler², A. Pollok², A. Knoll¹, A. Schulte³

**Hochschule München¹, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt²,
Universität der Bundeswehr München³**

Zusammenfassung

High-Altitude-Pseudo-Satellites (HAPS), auch High-Altitude-Long-Endurance Aircraft (HALE) genannt, gewinnen zunehmend an Bedeutung. Da diese solar-elektrisch betriebenen Flugzeuge aus Gewichtsgründen über sehr wenig gespeicherte elektrische Energie verfügen und eine geringe Festigkeit aufweisen, stellen die Themen Energiemanagement und Wetter für den Betrieb eine große Herausforderung dar. Zukünftig wird ein höherer Automatisierungsgrad der HAPS-Systeme angestrebt, damit der Missionsbetrieb auch bei Fehlfunktionen, wie etwa dem Verlust der Kommunikation zur Bodenstation, sichergestellt ist. Das Ludwig Bölkow Campus-Förderprojekt StraVARIA befasst sich mit der Automatisierung von Funktionen im Kontext des Wettergeschehens. Die vorliegende Publikation stellt im Besonderen den Themenkomplex „Autonomes Missionsmanagement“ vor.

1. DAS PROJEKT STRAVARIA

Im Rahmen des Forschungsprojekts "Autonomy Considerations for Stratospheric High Altitude Pseudo-Satellites made in Bavaria" (StraVARIA) arbeiten die Verbundprojektspartner Airbus Defence and Space (ADS), Airbus Group Innovation (AGI), Universität der Bundeswehr München (UniBwM), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und die Hochschule für angewandte Wissenschaften München (HM) an einer Steigerung der Autonomie und Sicherheit von HAPS-Plattformen. Insgesamt besteht das Projekt aus den fünf Themenbereichen Anforderungen (ADS), Wetter (AGI, DLR, UniBwM), Kommunikation (AGI), Autonomes Missionsmanagement (DLR, HM, UniBwM) und Simulation (ADS, DLR). In BILD 1 ist die Architektur von StraVARIA dargestellt.

HAPS Plattformen weisen als wichtigste Eigenschaft eine sogenannte "lokale Persistenz" auf. Für ein begrenztes Zielgebiet bieten sie ununterbrochene satellitenähnliche Kommunikations- und Erdbeobachtungsdienste über einen längeren Zeitraum, der momentan noch durch die Lebensdauer der Batterien begrenzt ist. Höhenplattformen füllen

damit die Lücke zwischen Satelliten und unbemannten Flugzeugen. Die verhältnismäßig zu ihren Abmessungen sehr leichten Flugzeuge sind hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit, Manövrierfähigkeit und Flugleistung sehr eingeschränkt. Dies ist besonders dann von Nachteil, wenn das Wettergeschehen in die Missionsplanung mit einbezogen werden muss. Die meiste Zeit einer Mission bewegen sich HAPS-Plattformen in der weitgehend "wetterfreien" Stratosphäre. Kritische Missionsphasen sind jedoch der besonders energieintensive Steigflug, bei dem eine möglichst optimale Versorgung der Solarzellen gewährleistet werden muss, der Sinkflug sowie die Landung. Während dieser drei Phasen kann es dabei zu einem Aufeinandertreffen mit gefährlichen Wettererscheinungen kommen. Um mehrwöchige Flugmissionen absolvieren zu können, muss ein effizientes Energiemanagement betrieben werden. Im Allgemeinen gilt, dass HAPS-Plattformen tagsüber an Höhe gewinnen, was einer Zunahme an potentieller Energie entspricht. Zusätzlich werden auch die Batterien über die vorhandenen Solarzellen aufgeladen. Nachts, wenn keine Energie mehr über die Sonneneinstrahlung gewonnen werden kann, geht das Flugzeug zur Schonung der Batterien in den Sinkflug über. Dabei können die Plattformen so tief absinken, dass das Wettergeschehen eine Rolle spielt.

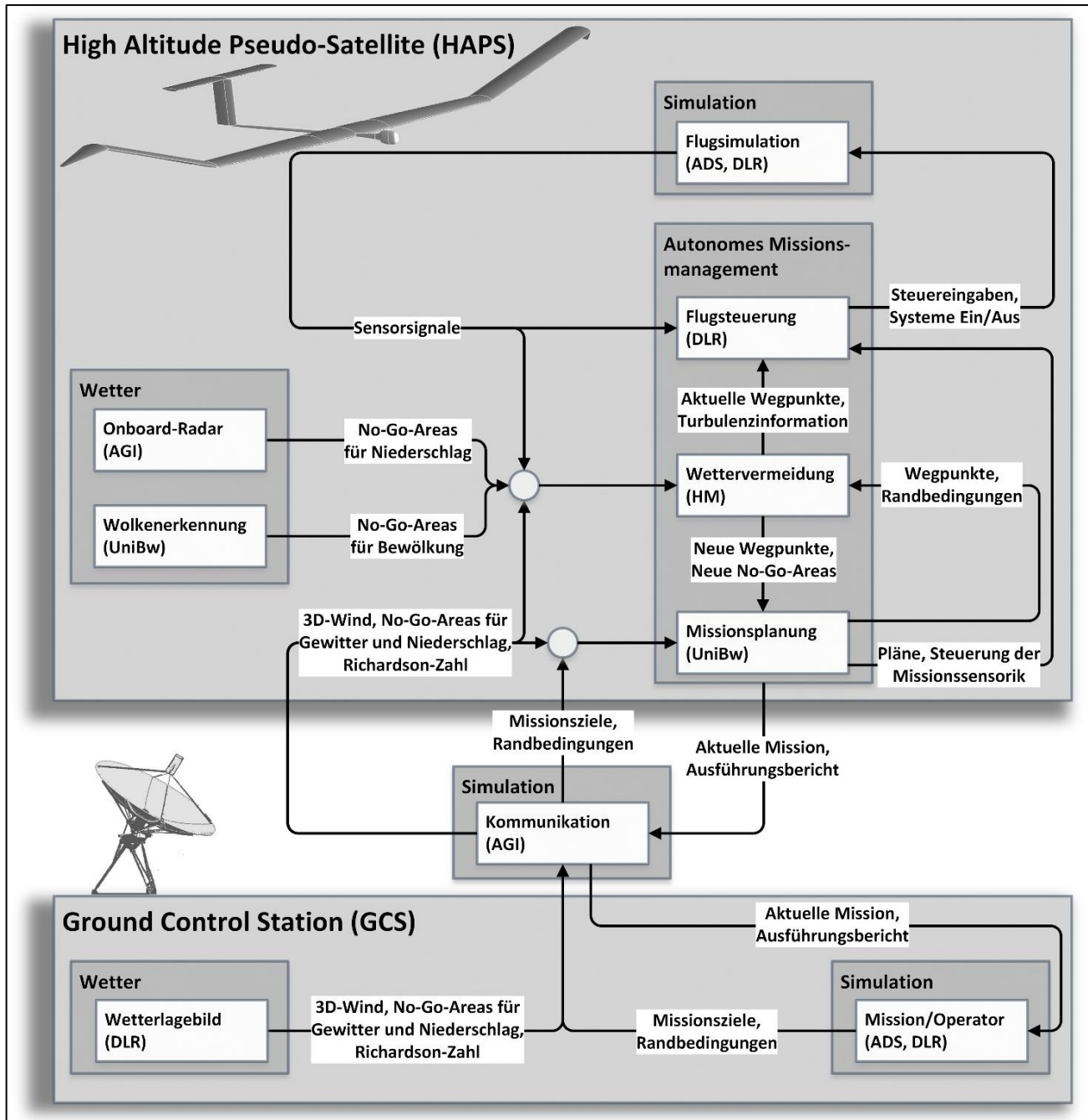


BILD 1. Systemarchitektur des Projekts StraVARIA.

Zu diesem Zeitpunkt ist der Ladezustand der Batterien am niedrigsten und es sind nur wenige Reserven für mögliche Ausweichmanöver vorhanden. Für einen effizienten und sicheren Missionsbetrieb ist die Berücksichtigung des Wettergeschehens somit von hoher Bedeutung. Zukünftig sollen HAPS-Plattformen in der Lage sein, Schlechtwettergebiete zu erkennen und zu vermeiden und dabei gegebenenfalls selbständig ihre vorgegebene Trajektorie bzw. Mission zu aktualisieren. Im Projekt StraVARIA werden im Themenkomplex „Autonomes Missionsmanagement“ die drei Bereiche Energiehaushalt, Wetter und Mission untersucht. Diese sollen dabei im Rahmen einer einheitlichen Missionsmanagementstrategie zusammengeführt und in einer abschließenden Gesamtsimulation getestet werden.

2. AUTONOMES MISSIONSMANAGEMENT FÜR HÖHENPLATTFORMEN

Im folgenden Kapitel werden die drei Teilprojekte des Autonomes Missionsmanagements von StraVARIA vorgestellt und deren Ergebnisse präsentiert.

Das Zusammenspiel dieser Komponenten kann anschaulich mit den Vorgängen beim Autofahren erklärt werden. Die „Missionsplanung“ übernimmt die Rolle eines Navigationssystems, welches basierend auf den aktuellen Informationen den Weg von Startpunkt bis Zielpunkt berechnet (langfristige Missionsplanung). Die „Wettervermeidung“ übernimmt die Rolle eines vorausschauenden Beifahrers. Bei unerwarteten Gefahren (z.B. überflutete Straße) kann

dieser empfehlen, von der Planung des Navigationssystems abzuweichen. Solch eine Wegänderung entspricht dem Hinzufügen bzw. Entfernen von Wegpunkten durch die Wettervermeidung (mittelfristig-reaktive Missionsplanung). Die „Flugsteuerung“ entspricht dem Fahrer. Gerät das Fahrzeug etwa beim Befahren einer vereisten Straße ins Schleudern, steuert er entgegen (kurzfristig-reaktive Flugführung). Zudem führt er die Anweisungen des Beifahrers und des Navigationssystems aus.

2.1. Flugsteuerung

Zielsetzung ist die Entwicklung einer integrierten Flugsteuerung als Echtzeitkomponente der Systemautonomie, deren Anbindung an die Plattform, an die Missionsplanung und an weitere Planungssysteme. Während der Missionsdurchführung müssen Informationen über Flugzustand und Energiemanagement sowie Daten aus der Umfeldsensorik an Bord des Flugzeugs integriert werden. Da nicht jederzeit mit einem unterbrechungsfreien Kommunikationskanal gerechnet werden kann, müssen basierend auf diesen Daten in Echtzeit und ohne Eingriff des Bedieners oder Missionsplaners kurzfristige und lokale Entscheidungen bezüglich Nutzlast-, Energie- und Flugmanagement getroffen werden können. Dies ist die Aufgabe der integrierten Flugsteuerung, die unter den Teilaspekten Missionsmanagement, der zugrunde liegenden Bahnoptimierungs- und den grundlegenden Flugregelungsstrategien entwickelt wird.

2.1.1. Flugregelung

Die Flugregelung stellt die direkte Anbindung an das Flugzeug bereit. Dazu werden Bahnvorgaben aus den übergeordneten Regelkreisen in Stellgrößen des Flugzeugs wie bspw. Schub- und Steuerflächenkommandos umgewandelt. Dabei werden auch die zentralen Limitierungen des Flugzeugs berücksichtigt.

Während die Stabilisierung und laterale Steuerung auf Grund der Trägheit des Flugzeugs von einfachen Regelkreisen auf der Basis nicht-linearer dynamischer Inversion [1] übernommen wird, kommt für die äußeren Regelkreise das Total Energy Control System (TECS) [2] zum Einsatz (siehe BILD 2). Diese Konfiguration wurde bereits in früheren Studien zu solarbetriebenen Höhenplattformen als effektiv erachtet [3].

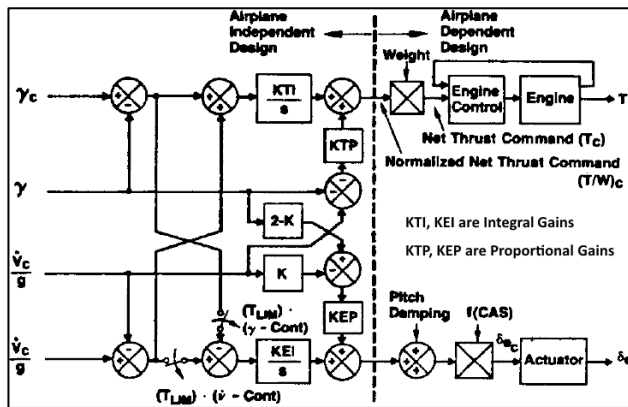


BILD 2. Total Energy Control System. [2]

Die Reglerkonfiguration legt bereits in den unteren Schichten der Regelung ein starkes Augenmerk auf den Aspekt

der benötigten Energie. Mit den Steuerungsgrößen des Bahnwinkels γ und der Beschleunigung $\dot{\gamma}$ werden Zuwachsraten der potentiellen sowie der kinetischen Energie kommandiert. Zuwächse in der totalen Energie werden über den Schub, Ausgleichsprozesse über den Anstellwinkel geregelt. Mit dieser Konfiguration liegen zudem natürliche Schnittstellen zu der übergeordneten Ebene der Bahnprimitive vor.

2.1.2. Optimierte Bahnprimitive

Die Bahnoptimierung unter Energieaspekten bildet die Grundlage für eine effiziente Missionsdurchführung. Sie sorgt für eine energieoptimale Ausführung der Vorgaben aus dem Missionsmanagement und bildet damit die Schnittstelle zwischen dem Missionsmanagement und der Flugregelung. Limitierungen des Flugzeugs können auch in dieser Ebene effizient betrachtet werden. [4] Voraussetzung für diese Konfiguration ist ein detailliertes Modell des Flugzeugs, wie es im Teilprojekt Simulation erstellt wird. [5][6]

Im Gegensatz zur konventionellen Wegpunktsteuerung werden über optimierte Bahnprimitive auch die Verläufe der Flugbahn zwischen diesen Wegpunkten spezifiziert. So können beispielsweise Wegpunkte möglichst effizient oder möglichst schnell angefliegen werden oder Wegpunkte auf verschiedenen Höhen können direkt oder mit distinkten Steigphasen erreicht werden. Der Missionsplaner hat damit die Wahl von verschiedenen Varianten zur Ausführung derselben Aktivität. Alle diese Varianten werden als Fähigkeiten des Flugzeugs den nächsthöheren Regelkreisen zur Verfügung gestellt.

Erste Optimierungsergebnisse weisen darauf hin, dass optimale Bahnprimitive von denen üblicher Passagierflugzeuge erheblich abweichen. So ist beispielsweise der optimale Kurvendurchflug dadurch gekennzeichnet, dass potentielle und kinetische Energie des Flugzeugs dynamisch ineinander umgewandelt werden (vgl. BILD 3).

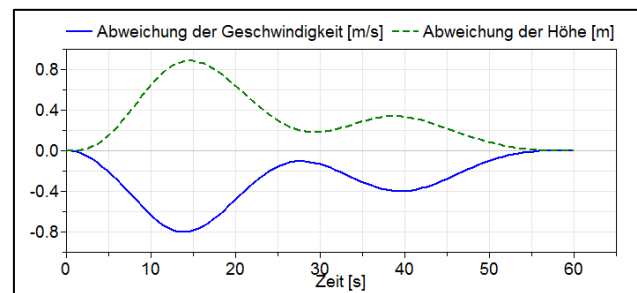


BILD 3. Geschwindigkeits- und Höhenverlauf.

Die energieoptimale Kurve weist ferner eine erhebliche Querschleunigung auf (BILD 4). Die entsprechenden Aktuatorauslenkungen sind in BILD 5 dargestellt. Weitere Optimierungen zeigen zudem, dass in dem hier verwendeten Modell ein Abstieg von etwa 9 km während der Nacht zu erwarten ist (BILD 6), wobei – entgegen üblicher Annahmen für Solarflugzeuge – die untere Grenze des erlaubten Höhenbandes nicht für längere Zeit gehalten wird. Die genauen Ursachen für diese Ergebnisse stehen noch nicht fest.

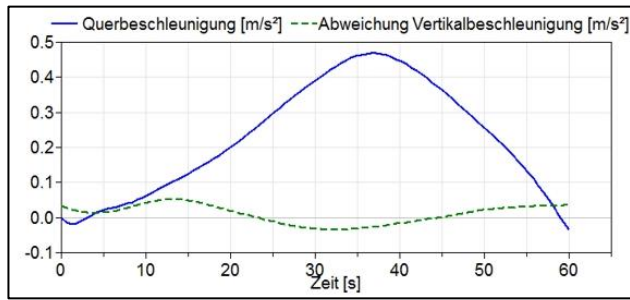


BILD 4. Quer- und Vertikalbeschleunigung.

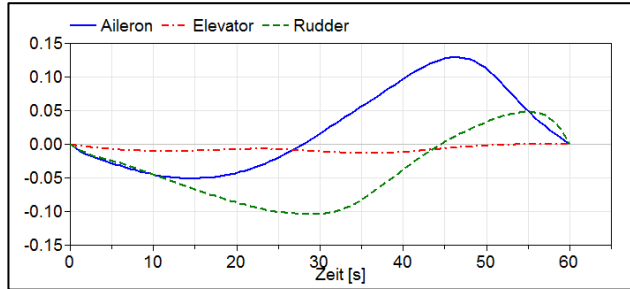


BILD 5. Aktuatorauslenkungen für eine 90°-Kurve.

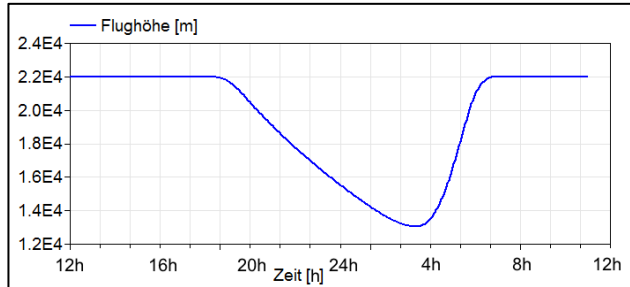


BILD 6. Höhenprofil eines 24h-Zyklus, mittags begonnen.

2.1.3. Reaktives Missionsmanagement

Die Fähigkeiten des Flugzeugs werden im reaktiven Teil des Missionsmanagements als Submodule von abstrakteren Missionsplänen verwendet.

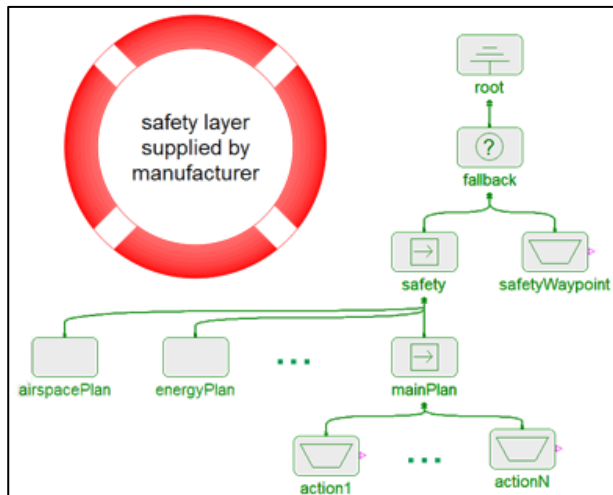


BILD 7. Sicherheitsschichten im Missionsplan.

Das reaktive Missionsmanagement erhält diese Missionspläne vom Missionsplaner zur Ausführung und stellt zudem

eigene Sicherheitsmechanismen bereit. Es bildet damit die reaktive Komponente der Missionsdurchführung und ergänzt den deliberativen Missionsplaner. Im Sinne einer begrenzten Rationalität wird hier zugunsten der Reaktionszeit auf eine aufwändige Planung verzichtet.

BILD 7 zeigt einen Entwurf der Sicherheitsmechanismen im Missionsmanagement basierend auf der Methode der Verhaltensbäume [7][8][9][10]. Das Missionsmanagement beinhaltet reaktive Strategien zur Sicherung des Luftraums und der verfügbaren Energie. Die von der Wettervermeidungsstrategie entwickelten Ansätze werden im Rahmen des Projekts StraVARIA zusätzlich eingefügt. Der Hauptplan besteht aus einer Sequenz von Aktionen, die von der Missionsplanung erzeugt werden. Die darin verwendeten Aktionen bestehen aus den oben beschriebenen Bahnprimitiven und weiteren Aktionen zur Steuerung von beispielsweise Sensoren und Datenübertragung.

Das reaktive Missionsmanagement stellt damit die Verbindung zwischen den flugzeugnahen Systemen und den Planungs- und Wetteranalyse-Systemen bereit. Es integriert Missionspläne und Vermeidungsstrategien und meldet den aktuellen Zustand des Flugzeugs an diese Systeme zurück. Wesentliche Aspekte des Missionsmanagements sind Modularität, Robustheit und Transparenz für den Bediener. [11] Es werden daher hier explizit auch neuartige Algorithmen wie bspw. die oben gezeigten Verhaltensbäume betrachtet und eingesetzt.

2.2. Wettervermeidung

Etwa 21% aller Flugunfälle in der allgemeinen Luftfahrt stehen im Zusammenhang mit widrigem Wetter. [12] HAPS-Flugzeuge sind aufgrund ihrer systemimmanenten Eigenschaften weitaus empfindlicher als normale Flugzeuge. Das Wetter spielt in gewissen Phasen jeder Mission eine sehr wichtige Rolle. Während der langen Auf- und Abstiegsphasen ist aufgrund der stark eingeschränkten Festigkeit der Flugzeugstruktur, der extrem geringen Flächenbelastung, der schlechten Manövrierbarkeit der langsamen Geschwindigkeit sowie des geringen Schubüberschusses eine besonders vorausschauende Flugführung erforderlich. Aktuell werden im Missionsbetrieb die verfügbaren Wetterinformationen von Menschen interpretiert und entsprechende Vermeidungsstrategien vom Boden aus eingeleitet. Eine autonome Interpretationsmöglichkeit mit der Ableitung von Maßnahmen existiert bislang nicht. Die Aufgabe dieses Teilprojekts ist die Entwicklung von Algorithmen, die eine autonome Einleitung geeigneter Maßnahmen als Schutz vor widrigem Wetter ermöglichen. Dies führt zur Steigerung der Autonomie von HAPS-Plattformen. Die Wettervermeidungsstrategie ergänzt dabei als reaktiver Part die autonome Missionsplanung.

2.2.1. Verfügbare Wetterinformationen

Innerhalb von StraVARIA stellt der Themenkomplex „Wetter“ vorprozessierte Informationen zur aktuellen und zukünftigen Wetterlage zusammen. Hierzu zählen das dreidimensionale Windvektorfeld sowie Gebiete, die bei Durchflug eine Gefahr für die Struktur der Plattformen darstellen können. Solche Gebiete werden als No-Go-Areas bezeichnet und liegen in Form von Polygonen bzw. Objekten im XML-Format vor. Dies gewährleistet geringe Datenmengen und erlaubt eine schnelle Verarbeitung. Dies ist wichtig, da

auf den Plattformen nur eine geringe Rechenleistung zur Verfügung steht, da sowohl an Gewicht als auch Energie gespart werden muss.

Für den Nowcast (Vorhersage bis 6 Stunden) von Niederschlag und Gewittern stellt das Deutsche Luft- und Raumfahrtzentrum für Physik der Atmosphäre verschiedene Algorithmen zur Verfügung. Rad-TRAM (Radar TRacking and Monitoring) [13] kennzeichnet Gebiete mit Niederschlag oberhalb eines gewählten Grenzwerts. In BILD 8 ist exemplarisch ein Bodenradarbild des DWD (farbig) über Bayern zu sehen. Die schwarzen Polygone werden von Rad-TRAM erzeugt und beinhalten in diesem Fall Gebiete mit einer Radarreflektivität über 37dBZ, was einem Niederschlag von etwa 7,48mm/h entspricht. Die schwarzen Linien stellen die bisherige Zugbahn der Flächenschwerpunkte dar. Graue Polygone zeigen die prognostizierte Form und Lage des Niederschlags in einer Stunde.

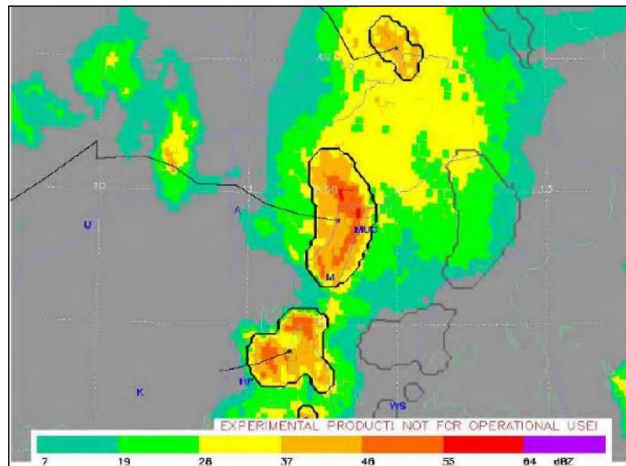


BILD 8. Beispiel für No-Go-Areas über Bayern. [14]

Gewitter sind für HAPS-Plattformen besonders gefährlich, da in deren Umgebung mit Böen, Windscherung, Hagel, Blitzschlag und Turbulenz gerechnet werden muss. Mit den beiden Algorithmen Cb-TRAM (Cumulonimbus TRacking And Monitoring) [15] und Cb-LIKE (Cumulonimbus-Likelihood) [16] können sowohl die verschiedenen Stadien von Gewitterwolken (Cumulus-, Reife-, Auflösungsstadium) detektiert und die räumliche Verlagerung der Gewitter bis zu 6 Stunden vorhergesagt werden.

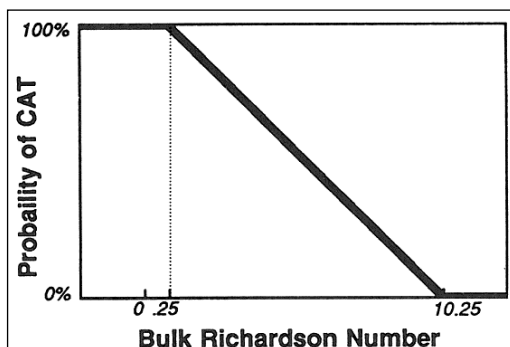


BILD 9. Empirischer Zusammenhang zwischen der Richardson Zahl und der Wahrscheinlichkeit von Clear Air Turbulence. [17]

Die Richardson-Zahl (Ri), mit der eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit und Intensität von sogenannter Clear-

Air-Turbulence (CAT) möglich ist (vgl. BILD 9), wird ebenfalls zur Verfügung gestellt. [17]

Mit Hilfe einer hochauflösenden Kamera, der Universität der Bundeswehr München an Bord des Flugzeugs, werden Form und Position von Wolken erkannt und diese nach dem Grad der Gefährlichkeit klassifiziert. Airbus liefert ein simuliertes Onboard-Wetterradarbild, welches aus Bodenradarbildern erzeugt wird.

2.2.2. In-situ Turbulenzerkennung

HAPS-Plattformen weisen eine extrem geringe Flächenbelastung (meist $< 5\text{kg/m}^2$) auf, wodurch sie sehr stark auf Turbulenz ansprechen. Das Wetterlagebild kann keine ausreichende Information zur Turbulenz liefern, da selbst die Maschenweite von regionalen Wettermodellen (z.B. 2,8km bei COSMO-DE) viel zu groß ist, um die Wirbel zu erfassen, die für HAPS-Plattformen eine Gefahr darstellen.[18] Auch die zeitliche Auflösung der heutigen Wettermodelle (meist 1 Stunde) reicht nicht aus, um die teils kurzlebigen Wirbel vernünftig vorherzusagen. [19] Bis heute kann nur solche Turbulenz vorzeitig erkannt werden, welche mit erhöhtem Wassergehalt in Verbindung steht. Turbulenz in wolkenfreier Luft (CAT) kann nicht zuverlässig vorhergesagt oder frühzeitig detektiert werden. Zwar existieren LIDAR-Systeme, die in der Lage sind CAT zu erkennen, jedoch sind diese noch nicht marktreif und für den Einsatz auf HAPS-Plattformen zu groß, zu schwer und benötigen zu viel Energie. [20] Daher kann ein Einflug in Gebiete mit Turbulenz nicht ausgeschlossen werden. Da es sich um unbemannte Systeme handelt bleibt bisher bei einem Verlust der Kommunikation Turbulenz unerkannt. Um auch im autonomen Betrieb eine Erkennung und Klassifizierung von Turbulenz zu gewährleisten, überwacht die Wettervermeidung permanent die aktuellen Flugzustandsdaten. Wie ein Pilot erkennt das System Turbulenz z.B. an Schwankungen der Fahrt und Beschleunigungen, welche nicht kommandierte Änderungen der Lage und Position bewirken. Auch Schwankungen von Luftdruck und Lufttemperatur werden erfasst. Die Daten werden zeitlich betrachtet, um ein Auf- bzw. Abklingen zu detektieren. Eine frühzeitige Vermeidung von Turbulenz ist mit dieser Methode nicht möglich, dennoch ist diese Funktion für ein unbemanntes Flugzeug eine sinnvolle Ergänzung. Einerseits werden dafür keine zusätzlichen Sensoren benötigt, zudem kann eine Beurteilung der Situation auch ohne menschliche Überwachung erfolgen. Für die Entwicklung der In-situ-Turbulenzerkennung hat die Hochschule München eine Flugsimulation mit sechs Freiheitsgraden in Simulink entwickelt, welche die aerodynamischen Derivativa in Matlab mit einer Vortex-Lattice-Methode (Tornado) berechnet. [21]

2.2.3. Vermeidungsstrategien

Die Möglichkeiten zur Mitigation von Wetter umfassen den Einsatz von Systemen (z.B. Batteriebeheizung, Enteistung), die Vorgabe neuer Wegpunkte an die autonome Missionsplanung sowie Änderung der Bahn und Bahnparameter.

2.2.3.1. Vermeidung von No-Go-Areas

Die Wettervermeidung bzw. Vermeidung der No-Go-Areas kann allgemein als Kollisionsvermeidung betrachtet werden. Folgende Punkte erschweren dabei die Berechnung von Ausweichtrajektorien:

- Wettergebiete ändern ihre Form und können lateral/vertikal kontrahieren/expandieren, aber auch miteinander verschmelzen,
- Wettergebiete ändern zeitlich ihre Position,
- Wettergebiete haben keine klaren Konturen,
- verhältnismäßig zur Fluggeschwindigkeit eines HAPS können sich Wettergebiete schnell bewegen → eine Betrachtung als statisches Hindernis ist nicht möglich,
- es wird mit Prognosen geplant → deren Unsicherheit bedingt eine permanente Validierung der berechneten Bahn,
- Wind beeinflusst nicht nur die Bewegung des Wetters sondern auch in erheblichem Maß die Geschwindigkeit eines HAPS gegenüber dem Grund.

Für die Flugführung hat die Hochschule München einen weiteren Flugsimulator mit drei Freiheitsgraden entwickelt. Damit ist es möglich, die Estimated Time of Arrival (ETA) unter Berücksichtigung des dreidimensionalen Windes abzuschätzen. So können stets die zukünftige Form und Position von No-Go-Areas abgerufen und Konflikte erkannt werden. Die No-Go-Areas werden bezüglich ihrer räumlichen Dichte, Dynamik, Gefahr einer Vereinigung und der sich zeitlich vergrößernden Unsicherheit der Prognose interpretiert. Diese Parameter haben einen Einfluss auf die gewählten Abstände zwischen Flugzeug und widrigem Wetter. Deren stufenlose Skalierung ermöglicht auch in komplizierten Fällen noch eine Lösungsfindung. Gebiete durch die keine Flugroute ermittelt werden kann, werden als No-Go-Areas deklariert.

2.2.3.2. Strategie bei Turbulenz

Bei detektierter Turbulenz kann zur Abmilderung die Fahrt auf Manövergeschwindigkeit V_A verringert und der Modus des Autopiloten auf einen Turbulenzmodus (z.B. Halten des Anstellwinkels bzw. der Lage) umgeschaltet werden. Abhängig von der Intensität der Turbulenz kann auch eine Änderung der Trajektorie notwendig werden.

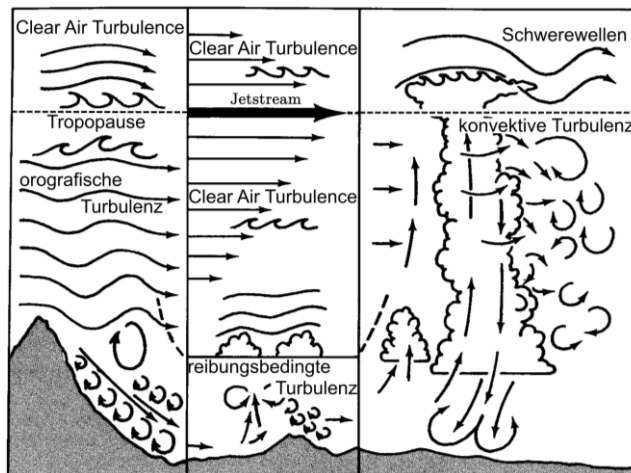


BILD 10. Verschiedene Formen von Turbulenz und deren räumliches Vorkommen. „Schwerewellen“ können noch in großer Entfernung ihres Entstehungsortes CAT verursachen. [22] [23]

Zur erfolgreichen Vermeidung von Turbulenz müsste deren

Ursache erkannt werden. Hier liegt die große Schwierigkeit, denn Turbulenz kann in Zusammenhang mit Thermik, Gewittern, Jetstreams, über Gebirge aber auch ohne erkennbaren Grund auftreten (BILD 10).

Selbst erfahrene Piloten können bezüglich der Ursache häufig nur Vermutungen anstellen. Die Interpretation von Radarbildern lässt Rückschlüsse auf Turbulenz zu. Eine automatische Deutung ist für die Zukunft vorgesehen. Sind in der Nähe konvektive Ereignisse mit typischen Formen zu erkennen (z.B. BILD 11), so kann eine Vergrößerung des Abstands zu einer Verbesserung der Lage führen.

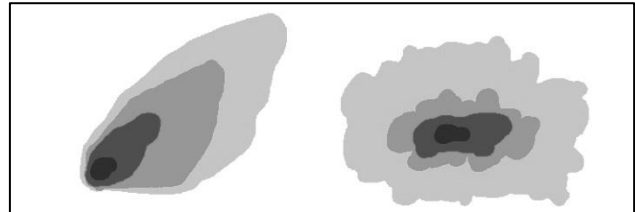


BILD 11. In der Umgebung von Radarbildern mit einem großem Gradienten (links) oder gewellten Umrissen (rechts) muss mit starker Turbulenz gerechnet werden.

Zeigen weder Radarbild noch Wolkenerkennung ein konvektives Ereignis an, so kann für die Flugführung die Richardson-Zahl herangezogen werden. Diese Größe ist das Verhältnis von vertikaler Stabilität zu Windscherung. [24] Als Faustformel können zwei kritische Werte angesetzt werden. Laminare Strömung wird unter einem Wert von $Ri < 0,25$ turbulent und turbulente Strömung über $Ri > 1$ laminar. [17] Der Wert $Ri < 0,25$ ist meist mit Turbulenzmeldungen von Piloten konsistent. [25] In der Folge werden Gebiete mit höherer Richardson-Zahl angefliegen. Gebiete mit erkannter Turbulenz werden für die Missionsplanung ebenfalls als No-Go-Areas gekennzeichnet.

2.3. Missionsplanung

Dieses Teilprojekt bearbeitet unter Berücksichtigung von Missionszielen, des Wetters und des Energiehaushalts einer HAPS-Plattform die (teil-)automatisierte Planung und Umanplanung einer Mission sowohl an Bord als auch in der Bodenkontrollstation.

2.3.1. Multilateraler Missionsplaner

BILD 12 beschreibt die Systemarchitektur der Missionsplanung aus BILD 1 genauer. Das Missionsplanungssystem (MPS) besteht aus zwei Modulen, dem Planer und der Planüberwachung. Die zwei Module arbeiten dabei in verzahnter Weise. [26] Um sicherzustellen, dass bei der Ausführung eines Plans keine Gefahren auftreten, wird dieser nach Erstellung und Ausführung von der Planüberwachung fortlaufend kontrolliert. Sollte dabei in absehbarer Zukunft ein gefährliches Ereignis detektiert werden, weist die Planüberwachung den Planer unverzüglich darauf hin, so dass dieser unmittelbar einen neuen Plan generiert. Wie in BILD 12 dargestellt ist das MPS in die HAPS-Plattform integriert und bekommt durch die Mensch-Maschine-Schnittstelle Befehle vom Operateur sowie die Zustandsparameter der Umgebung von On-Board-Sensorik und der Bodenkontrollstation. Nach erfolgreicher Berechnung wird der Plan an das Flugsteuerungsmodul weitergeleitet.

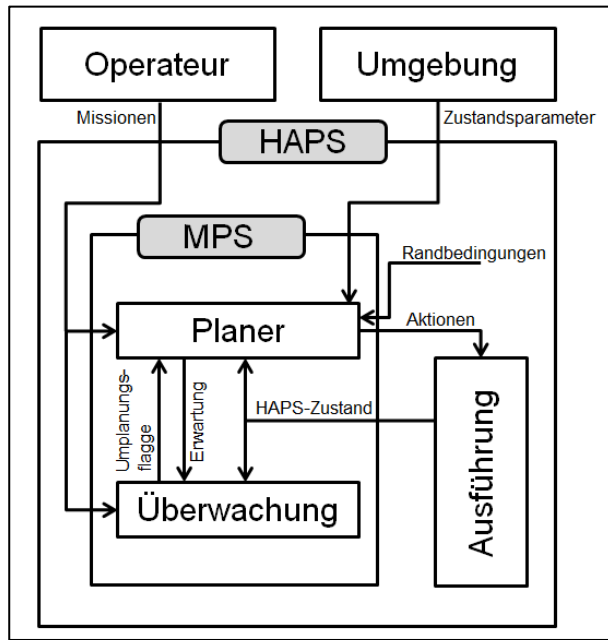


BILD 12. Architektur des Missionsplanungssystems.

2.3.1.1. Parametrischer Bahnplaner

Der Planer wird in zwei Stufen, der sogenannten parametrischen Planung und symbolischen Planung, ausgeführt. Die parametrische Planung bezieht sich auf die Berechnung des optimalen Pfads. Viele existierende Pfadplanungsmethoden sind für HAPS-Plattformen nicht geeignet, da sie den großen Einfluss des Windfelds auf die Trajektorie nicht berücksichtigen.

Eine adaptive Pfadplanungsmethode, die auf dynamisch realisierten Suchräumen basiert, wurde in [27] entwickelt. Darin enthält der Suchraum nur Knoten, die angesichts der Dynamik des HAPS im Windfeld erreichbar sind.

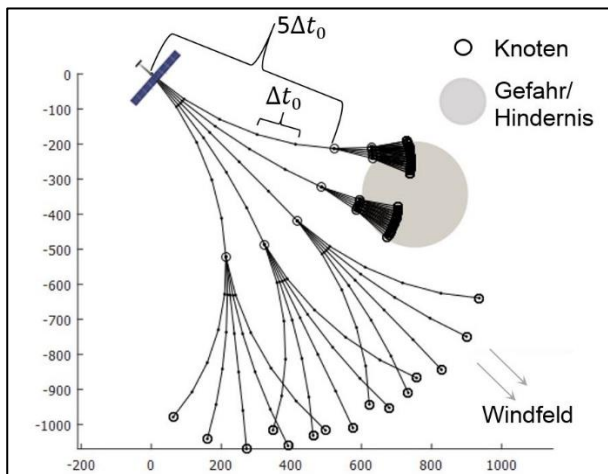


BILD 13. Dynamisch realisierbarer 2D Suchraum für HAPS im Windfeld.

BILD 13 stellt den zweidimensionalen dynamisch realisierbaren Suchraum dar. Jeder Knoten wird durch Integration von elementaren Aktionen vom HAPS über die Zeit berechnet. Die Integration kann in unserem Fall durch eine Riemannsumme mit einem geeigneten Zeitschritt angenähert

werden:

$$s_v \approx s_u + \sum_{k=1}^K \Delta t_0 \cdot a_k$$

wobei s_u und s_v den vorherigen bzw. den folgenden Zustandsknoten bezeichnen, Δt_0 wird als fundamentaler Zeitschritt bezeichnet und a_k als die fundamentale Aktion. [27] K steht für die Zahl der Zeitschritte: In der Nähe einer kritischen Zone wird zur Bestimmung der Knoten ein kleinerer Wert für K gewählt, wodurch sich die Dichte der Wegpunkte in diesem Bereich erhöht und der Plan genauer wird. Für Knoten, die nicht von gefährlichen Ereignissen betroffen sind, wird ein größerer Wert für K gewählt und zusätzlich die Menge aller möglichen Aktionssequenzen, die innerhalb von K durchgeführt werden können, auf eine Untermenge beschränkt.

Da die Rechenzeit einer optimalen Bahn exponentiell mit der Knotenzahl zunimmt, kann durch Auswahl einer reduzierten Knotenzahl in ruhigen Umgebungen die Recheneffizienz erhöht werden. Die Pfadplanungsmethode ist unabhängig von der Anzahl der räumlichen Dimensionen, da sich die Erstellung der Knoten durch die vordefinierte Aktionssequenz $\{a_0, \dots, a_K\}$ über den Zeitschritt $K\Delta t$ ergibt. Die aktionsbasierte Planung kann in der Praxis durch einen numerischen Planer wie in [28] implementiert werden.

2.3.1.2. Symbolischer Aufgabenplaner

Die allgemeine Missionsplanung wird durch einen Symbolischen Planer gelöst. Ein Beispielszenario wird in BILD 14 gezeigt werden.

Ein HAPS wurde mit einer Überwachungsmission im Missionsbereich 1 (MA1) bzw. einer Kartierungsmission im Missionsbereich 2 (MA2) beauftragt. In jedem Missionsbereich werden „Locations of Interest“ (LOIs) definiert, die jeweils durch Flugmuster (FP) überwacht bzw. kartiert werden müssen. Der HAPS muss durch den Korridor (C) zwischen den Missionsbereichen pendeln.

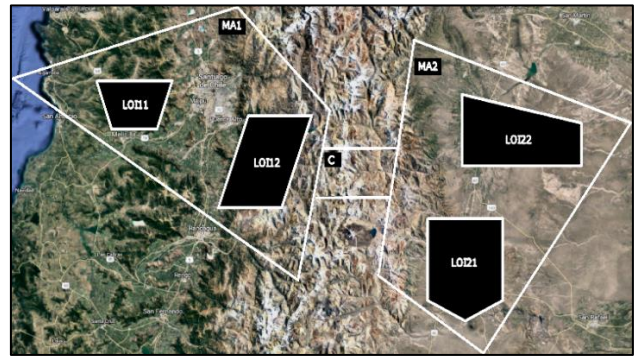


BILD 14. Beispielmissionsszenario für ein HAPS.

Der symbolische Planer basiert auf der Struktur eines „Hierarchical Task Networks“ (HTN). Dabei werden, wie in BILD 15 gezeigt, die Ebenen gemäß den räumlichen Größen der Aufgaben verteilt.

Diese Methode ermöglicht es, die Aufgaben entsprechend ihrer Qualität in Unteraufgaben zu zerlegen. Der fundamentale Zeitschritt Δt_0 wird dabei je nach der räumlichen Größe

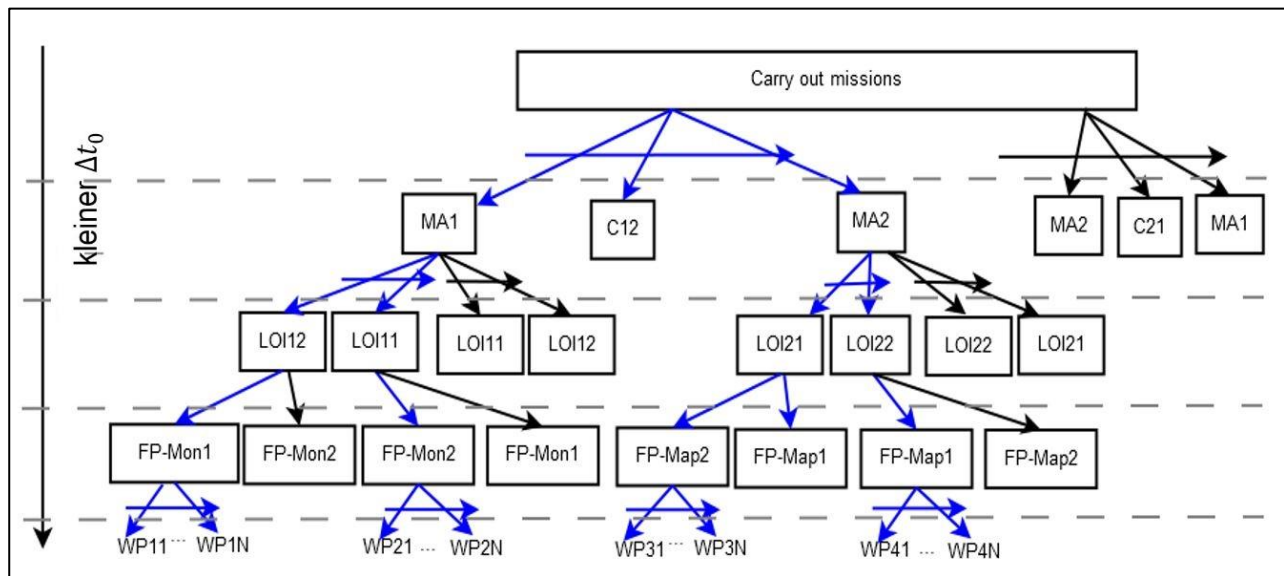


BILD 15. Symbolischer Planer in einer HTN-Struktur.

angepasst: Je höher die Ebene in der HTN-Struktur ist, desto größer ist der fundamentale Zeitschritt und desto schneller erfolgt die Planung, aber desto gröber ist auch die Planung. Nach Zerlegung der Aufgaben in Unteraufgaben erfolgt deren Anordnung in jeder Ebene so, dass die durch die sequentielle Abarbeitung der Aufgaben entstehenden Kosten minimal sind. In der zweiten Ebene sind beispielsweise die Kosten für die Ausführung der Missionen in der Reihenfolge MA1 → C12 → MA2 geringer, als in der Reihenfolge MA2 → C21 → MA1 (siehe BILD 15). In jeder Ebene werden die Aufgaben mit den geringsten Kosten weiter in feinere Unteraufgaben zerlegt. Dieser Prozess wird wiederholt, bis ein Plan aus den einzelnen Wegpunkten erstellt werden kann.

Da die berechneten Kosten die zur Anordnung der Aufgaben in den Ebenen benutzt werden nur eine obere Grenze für die tatsächlichen Kosten des endgültigen Plans der Wegpunkte [27] darstellen, ist der Plan nicht notwendigerweise optimal. Wenn die Echtzeitfähigkeit des Planers beibehalten werden soll, ist es kaum möglich, alle Aufgabenzerglegungen zu untersuchen. Die grobe Anordnung der Aufgaben in jeder Ebene soll daher nur als Richtschnur dienen. Falls zeitlich angemessen, führt der Planer weitere Zerlegungen der nächstbesten Zweige durch. Im Beispielszenario werden die Aufgaben FP-Mon2, FP-Mon2, FP-Map2, FP-Map1 in Wegpunkte zerlegt (vgl. BILD 15). Nach Ablauf der veranschlagten Planungszeit wird der beste Plan mit dem geringsten Kosten ausgeführt.

3. BEDEUTUNG FÜR DEN MISSIONSBETRIEB

Das im Projekt StraVARIA zu entwickelnde Missionsmanagement integriert Funktionalitäten auf allen Ebenen der Führung eines solarbetriebenen Höhenflugzeugs: Das Flugzeug wird energieoptimal durch Missionen geführt, es kann lokalen Wetterphänomen ausweichen und der Operator wird bei globalen Missionsplanungen unterstützt.

Das neue Flugkontrollsystem des DLR wird durch eine energieoptimierte Planung von Missionen eine bessere Ausnutzung des solar-elektrischen Antriebskonzepts sowie

eine Erweiterung des operationellen Betriebsbereichs ermöglichen, was letztendlich längere Flugmissionen in der Stratosphäre ermöglicht. Das Wettervermeidungssystem der HM erkennt Konflikte mit Wetter und leitet geeignete Maßnahmen ein. Durch die Erkennung von Gefahren, der Interpretation der Wetterlage und Anwendung der entsprechenden Vermeidungsstrategien werden die Missionserfüllung und die Sicherheit von HAPS-Plattformen deutlich verbessert. Die Komponenten der UniBwM werden zu einer Steigerung des Automatisierungsgrades bei der Planung, Überwachung und Durchführung von Missionen führen.

Die derzeitige Betriebsmannschaft einer solarbetriebenen Höhenplattform ist vorwiegend mit den Aspekten der Energieoptimalität und der Planung von Wettervermeidung beschäftigt. Genau diese Aspekte werden im hier vorgestellten Missionsmanagementsystem automatisiert. Damit wird das System eine erhebliche Entlastung der Mannschaft im Betrieb solcher Plattformen darstellen. Auf diese Weise werden zukünftig mehrere Höhenplattformen gleichzeitig von einer Crew bedient werden können.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Autonome Missionsmanagementfunktionen stellen technisches Neuland dar, denn bisher werden alle Entscheidungen von Menschen getroffen. Die autonomen Funktionen für die Bereiche Flugsteuerung, Wettererkennung und Missionsplanung werden zukünftig eine Reduktion der Arbeitsbelastung für den Menschen bei gleichzeitig verbesserter Sicherheit bewirken. Für die Zulassungsfähigkeit von autonomen Systemen werden wichtige Grundlagen geschaffen. Mit den Ergebnissen des Projekts wird nicht nur die Entwicklung von Höhenplattformen vorangetrieben. Automatisierte Funktionen sind ebenso für größere unbemannte wie bemannte Flugzeuge von großem Nutzen und können beispielsweise in Form von Pilotenassistenzsystemen eingesetzt werden. Ergebnisse des Projekts können so auf für das DLR-Leitkonzept des unbemannten Frachtflugzeugs verwendet werden.

5. DANKSAGUNG

Hiermit bedanken wir uns herzlich für die Förderung durch den Ludwig Bölkow Campus und das Bayrische Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie. Im Rahmen des Ludwig Bölkow Campus finden gemeinsame Forschungsvorhaben von Wissenschaft und Industrie auf den Gebieten der Luft- und Raumfahrt sowie der Öffentlichen Sicherheit statt. Durch dieses Projekt wird die Verzahnung von Industrie und Wissenschaft gefördert, die den Forschungs- und Luftfahrtstandort Bayern nachhaltig stärkt. Universitäten und Hochschulen profitieren bei der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses, zusätzlich bieten sich Möglichkeiten zur Promotion.

6. LITERATUR

- [1] Enns, D., Bugajski, D., Hendrick, R., & Stein, G. (1994). Dynamic inversion: an evolving methodology for flight control design. *International Journal of control*, 59 (1), 71-91.
- [2] Lambregts, A. A. (1983). Vertical flight path and speed control autopilot design using total energy principles. AIAA paper, 83.
- [3] Kastner, N., & Looye, G. (2013). Generic tecs based autopilot for an electric high altitude solar powered aircraft.
- [4] Mueller, R., & Looye, G. (2013). A constrained inverse modeling approach for trajectory optimization. In *AIAA Guidance Navigation and Control Conference, Boston, MA*.
- [5] Klöckner, A., Leitner, M., Schlabe, D., & Looye, G. (2013). Integrated modelling of an unmanned high-altitude solar-powered aircraft for control law design analysis. In *Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control* (pp. 535-548). Springer Berlin Heidelberg.
- [6] Klöckner, A., Looye, G., Müller, R., Kuchar, R., Re, F., & Leitner, M. (2014). Object-Oriented Aircraft Modeling with the DLR FlightDynamics Library.
- [7] Klöckner, A. (2013). Behavior trees for UAV mission management. *INFORMATIK 2013: Informatik angepasst an Mensch, Organisation und Umwelt*, 57-68.
- [8] Isla, D. (2005) Handling complexity in the Halo 2 AI, Game Developers Conference, Online Available: <http://www.naimadgames.com/publications/gdc05/gdc05.doc>.
- [9] Klöckner, A. (2014). The Modelica BehaviorTrees Library: Mission planning in continuous-time for unmanned aircraft. In *Proceedings of the 10th International Modelica Conference-Lund, Sweden-Mar 10-12, 2014* (No. 96, pp. 727-736). Linköping University Electronic Press.
- [10] Klöckner, A. (2015). Behavior Trees with Stateful Tasks. In *Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control* (pp. 509-519). Springer International Publishing.
- [11] Klöckner, A. (2016). Behavior Trees for Mission Management of High-Altitude Pseudo-Satellites. Dissertation. Universität der Bundeswehr München.
- [12] Kumar Jenamani, R., & Kumar, A. (2013). Bad weather and aircraft accidents—global vis-à-vis Indian scenario. *Current Science* (00113891), 104(3).
- [13] Kober, K., & Tafferner, A. (2009). Tracking and nowcasting of convective cells using remote sensing data from radar and satellite. *Meteorologische Zeitschrift*, 18(1), 75-84.
- [14] Forster, C., & Tafferner, A. (2012). Nowcasting Thunderstorms for Munich Airport. *The DLR Project Wetter & Fliegen*.
- [15] Zinner, T., Mannstein, H., & Tafferner, A. (2008). Cb-TRAM: Tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multi-channel Meteosat-8 SEVIRI data. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 101(3-4), 191-210.
- [16] Koehler, M., Tafferner A., & Gerz, T. (2016). Cb-LIKE - Cumulonimbus Likelihood: Thunderstorm forecasting with fuzzy logic. Submitted to *Meteorologische Zeitschrift*.
- [17] Stull, R. B. (2012). *An introduction to boundary layer meteorology* (Vol. 13). Springer Science & Business Media.
- [18] Hoyningen-Huene, P. (2013). *Systematicity: The nature of science*. Oxford University Press.
- [19] Sharman, R., & Lane, T. (Eds.). (2016). *Aviation Turbulence: Processes, Detection, Prediction*. Springer.
- [20] Barbaresco, F., Thobois, L., Dolfi-Bouteyre, A., Jeanin, N., Wilson, R., Valla, M., & Hallermeyer, A. (2015, March). Monitoring Wind, Turbulence and Aircraft Wake Vortices by High Resolution RADAR and LIDAR Remote Sensors in all Weather Conditions. In *URSI France JS 15. Journées Scientifiques 2015: Sonder la matière par les ondes électromagnétiques, Actes* (pp. 81-110).
- [21] Melin, T. (2000). User's guide and reference manual for Tornado. *Royal Inst. of Technology (KTH), Stockholm, Sweden*.
- [22] Lester, P. F. (1994). *Turbulence: A new perspective for pilots*. Jeppesen Sanderson.
- [23] Lane, T. P., Sharman, R. D., Trier, S. B., Fovell, R. G., & Williams, J. K. (2012). Recent advances in the understanding of near-cloud turbulence. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 499.
- [24] Endlich, R. M. (1964). The mesoscale structure of some regions of clear-air turbulence. *Journal of Applied Meteorology*, 3, 261-276.
- [25] Chan, P. W. (2008). Determination of Richardson number profile from remote sensing data and its aviation

application. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1, No. 1, p. 012043). IOP Publishing.

- [26] Gunderson, J. P., & Martin, W. N. A Probability-Aware Planning Architecture to Support Variable Autonomy. *American Association for Artificial Intelligence Technical Report SS-03, 4*, 83-88.
- [27] Kiam, J.J., Gerds, M., & Schulte, A. (2016). Fast Subset Path Planning/ Replanning to Avoid Obstacles with Time-Varying Probabilistic Motion Patterns. Eighth European Starting AI Researcher Symposium (STAIRS).
- [28] Scala, E., Haslum, P., Thiebaux, S., Ramirez, M. (2016). Interval-Based Relaxation for General Numeric Programming. 22nd European Conference on Artificial Intelligence (ECAI), 2016.