

AUTOMATISCHE WETTERVERMEIDUNG FÜR EIN UNBEMANNTES, SOLARBETRIEBENES FLUGZEUG

Federico Mothes, Alexander Knoll
Hochschule München

ZUSAMMENFASSUNG

Ein Konzept zur Vermeidung widriger Wettererscheinungen für ein unbemanntes Leichtflugzeug wird vorgestellt. Wegen der Möglichkeit eines Kommunikationsausfalls wird eine solche Funktionalität zur Wettervermeidung zukünftig zulassungsrelevant sein. Anhand historischer Wetterdaten wird an einer automatischen Erzeugung sicherer Flugpfade von Start bis Ziel geforscht. Gefährliche Wetterphänomene werden geometrisch als skalierbare No-Go-Areas repräsentiert. Ein Überblick zu den verfügbaren Wetterdaten wird gegeben und Methoden für den Umgang damit erklärt. Es wird auf die Erzeugung von sogenannten Sicherheitsmargen für die Wetterprognosen eingegangen. Die Fähigkeiten eines onboard Vermeidungsalgorithmus werden beschrieben. Dieser plant mit konkaven, zeitvarianten Polygonen der Prognosen und berücksichtigt den Einfluss von Wind. Für eine gewählte Flughöhe wird eine laterale Vermeidungstrajektorie berechnet. Dazu werden erste Ergebnisse gezeigt. Schließlich wird ein generisches Modell eines HAPS vorgestellt. Zusammen mit tatsächlich gemessenem Wetter dient dieses zur Verifikation der Fliegbarkeit der, auf Basis der Vorhersagen, berechneten Trajektorien.

1. EINLEITUNG

High-Altitude-Pseudo-Satellites (HAPS) sind Flugzeuge, die für mehrwöchige, unbemannte Einsätze in der Stratosphäre ausgelegt sind. Sie bieten lokale Persistenz und decken als Trägerplattform von Aufklärungsaufgaben bis zur Bereitstellung von Kommunikationsdiensten ein weites Funktionsspektrum ab. Etwa 21% aller Flugunfälle in der allgemeinen Luftfahrt stehen im Zusammenhang mit widrigem Wetter. [1] HAPS sind aufgrund ihrer systemimmanenten Eigenschaften (extremer Leichtbau, große Streckung und geringe Flugleistungen) weitaus empfindlicher als herkömmliche Flugzeuge. Auch wenn HAPS die meiste Zeit in der Stratosphäre und somit über dem Wetter fliegen, spielt dieses in gewissen Phasen jeder Mission eine sehr wichtige Rolle. Während der langen Auf- und Abstiegsphasen ist eine weit vorausschauende Flugführung erforderlich. Die Federal Aviation Administration bezeichnet Vermeidung als einen integralen Bestandteil der Flugplanung. [2] Aus diesen Gründen forscht die Hochschule München im Rahmen des bayrischen Forschungsprojekts StraVARIA (Autonomy Considerations for Stratospheric High Altitude Pseudo-Satellites made in Bavaria) an einer Steigerung der Sicherheit unbemannter Plattformen. [3] Aus Energie- und Gewichtsgründen kann in einem HAPS kein Wetterradar verbaut werden. Somit ist man bei Vermeidung von Wetter ausschließlich auf externe Daten angewiesen. Aufgrund der geringen verfügbaren Bandbreite werden vorprozessierte Wetterdaten in Form von geometrischen Körpern im kompakten XML-Format (eXtensible Markup Language) übertragen. Die Übertragung von sog.

Wetterobjekten vom Boden an Flugzeuge wurde auch von [4] vorgeschlagen. Vor allem zur Vermeidung konvektiver Ereignisse für Verkehrsflugzeuge arbeiten zahlreiche Autoren mit geometrischen Objekten. Dabei handelt es sich meist um statische [5] oder dynamische [6][7][8], konvexe, Polygone. Anders als bei schnellen Flugzeugen können bei der Flugplanung für HAPS Gebiete mit widrigem Wetter nicht statisch betrachtet werden. Die verhältnismäßig geringe Fluggeschwindigkeit erfordert eine zeitvariante Betrachtung von Position und Form der Gefahrenzonen. Teil des Konzepts ist es, Wetterphänomene als vollständig zeitvariable Objekte darzustellen. Eine Herausforderung bei der Flugplanung ist der Umgang mit der Unsicherheit der Vorhersagen. Um zu vermeiden, dass sich das Flugzeug nach einem Update in einer Gefahrenzone befindet, findet die Flugplanung stets auf Basis der neusten Daten statt. Zusätzlich wird mit Sicherheitsmargen gearbeitet, etwa für Gewitter wie in [9] beschrieben. Damit es dadurch nicht zu einer übermäßigen Sperrung von freiem Raum kommt wird mit konvexen Polygonen gearbeitet. Für die Berechnung von Trajektorien wird der Einfluss des Winds berücksichtigt, da dieser u.U. nicht kompensiert werden kann.

2. METEOROLOGISCHE DATENSÄTZE

Das Institut für Physik der Atmosphäre (PA) des DLR stellt im Rahmen von StraVARIA historische Wetterdaten (Messungen und Prognosen) in Form von vorprozessierten Wetterobjekten zur Verfügung (TAB 1). Die Daten werden zur Entwicklung und Erprobung einer Wettervermeidung genutzt.

2.1. Konzept der No-Go-Areas

Die Übergänge in der Natur sind zwar fließend, dennoch lassen sich Gebiete anhand von Schwellenwerte (z.B. Radarreflektivität) voneinander abgrenzen. Teil des Konzepts in StraVARIA ist die vorprozessierte Darstellung von widrigem Wetter in Form von Polygonen. Diese werden No-Go-Areas (NGA) genannt. Dass dies sinnvoll ist zeigen sogenannte GFAs (Graphical Forecasts for Aviation), wie sie heutzutage teilweise von Piloten genutzt werden. Die geometrische Darstellung von Wetterinformationen (BILD 1) verbessert sowohl deren Wahrnehmung als auch die Fähigkeit gefährliches Wetter zu vermeiden. [10]



BILD 1. Die Darstellung verschiedener Wetterinformationen helfen Piloten bessere Go/No-Go Entscheidungen zu treffen. Auch Gebiete mit vorliegenden Warnungen wie etwa G-AIRMETs (Graphical AIRman's METEorological Advisorys) können angezeigt werden. [11][12]

Der Begriff No-Go-Area muss insbesondere von sog. No-Fly-Zones abgegrenzt werden. Es handelt sich dabei nicht um fest definierte, statische Bereiche, sondern um 2- bzw. 3-dimensionale Geometrien, deren Form und Position zeitvariant und vom Flugzeugtyp abhängig sind, da die Schwellenwerte für deren Erzeugung individuell angepasst werden können. NGAs stellen zeitlich veränderliche, semi-permeable Gebiete dar, die bei Durchflug potentiell eine Gefahr für die entsprechende Plattform bergen. Die geometrische Darstellung gewährleistet eine schnelle Verarbeitung bei gleichzeitig geringer Datenmenge. [4] NGAs können mit Sicherheitsmargen (siehe Kapitel 3.3) erweitert werden und sind unter gewissen Bedingungen permeabel, etwa wenn sich ein Flugzeug nach einem Wetterupdate innerhalb einer neu entstanden NGA befindet.

2.2. Historische Wetterdaten

Es stehen historische Datensätze für drei wetteraktive Tage aus 2016 zu Verfügung. Für den Nowcast von Niederschlag und Gewittern werden die Daten der Algorithmen Rad-TRAM, Cb-TRAM und Cb-LIKE geliefert. Als Indikator für Clear-Air-Turbulence (CAT) dient die sog. Richardson-Zahl. Gebiete mit unzulässig hohen Windgeschwindigkeiten sind ebenfalls als NGAs verfügbar. Die Daten werden jeweils im XML-Format abgelegt, welches sich wegen des geringen Speicherbedarfs und seiner guten Kompatibilität anbietet. Die Daten zum 3-dimensionalen Windfeld werden im GRIB-Format (GRIdded Binary) zur Verfügung gestellt.

2.2.1. Starkregen und Gewitter

Gewitter sind für Flugzeuge und besonders HAPS-Plattformen gefährlich, da neben dem Niederschlag in deren Umgebung mit Böen, Windscherung, Turbulenz, Blitzschlag, Hagel und Vereisung gerechnet werden muss.

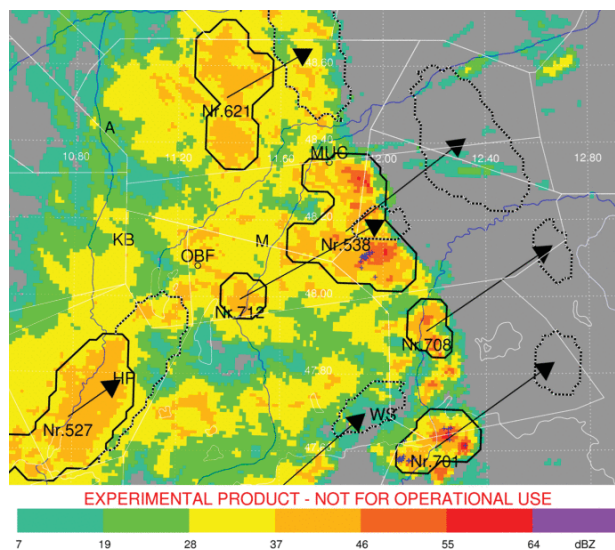


BILD 2. No-Go-Areas von Rad-TRAM über Bayern. [13]

Der Algorithmus Rad-TRAM (Radar TRacking and Monitoring) erkennt Gebiete mit Niederschlag oberhalb eines gewissen Schwellenwerts und teilt diesen Identifikationsnummern zu. In BILD 2 ist exemplarisch ein Bodenradarbild des DWD um den Flughafen München zu sehen. Die schwarzen Polygone beinhalten Gebiete mit einer Radarreflektivität ≥ 37 dbZ, was in etwa 7,48mm/h Niederschlag entspricht. Dieser Schwellenwert wird zwar allgemein als moderat eingestuft [14], wäre jedoch in der Realität für ein HAPS deutlich zu hoch. Dennoch nutzen die so erzeugten NGAs zur Erprobung einer Wettervermeidung. Die Spitzen der schwarzen Pfeile stellen jeweils die erwartete Position des Flächenschwerpunkts dar. Gepunktete Polygone zeigen die prognostizierte Form und Lage des Gewitters in einer Stunde. [15]

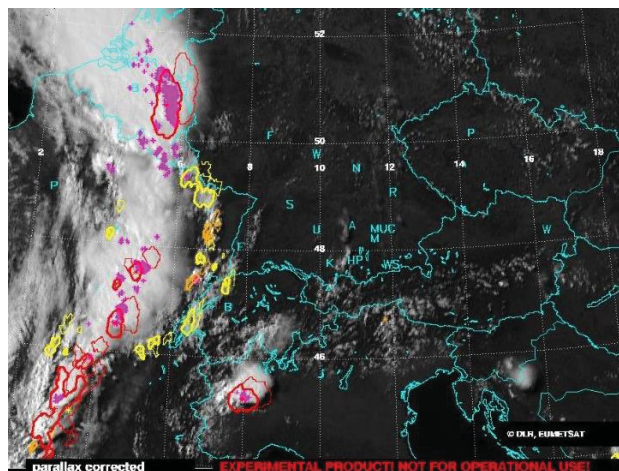


BILD 3. Cb-TRAM: Gelb kennzeichnet entstehende Gewitterwolken, Orange schnell entstehende Gewitterwolken und Rot Cumulonimbus im Reifestadium. Die jeweiligen Prognosen sind gestrichelt dargestellt. [16]

Cb-TRAM (Cumulonimbus TRacking And Monitoring) erkennt automatisch Gewitterzellen durch die Auswertung von Satellitendaten (Meteosat Second Generation). Die Daten beinhalten neben der Geometrie auch die Entwicklungsstadien der Gewitterwolken und eine einstündige Prognose. [16]

Der Algorithmus Cb-LIKE (Cumulonimbus- LIKE-lihood) berechnet aus Modelldaten von COSMO-DE einen Gewitterindikator von 0-100. Je höher dieser ist desto wahrscheinlicher ist es, dass Gewitter in einem Gebiet entstehen werden. Für gewisse Wahrscheinlichkeiten werden Polygone erzeugt. Die langfristigen Prognosen sind bis +6 Stunden verfügbar. [17]

2.2.2. Wind und Turbulenz

Bei einer verhältnismäßig langsamen Plattform wie einem HAPS ist der Einfluss des Windes groß und muss daher berücksichtigt werden. Das verwendete 3-dimensionale Windfeld wird vom COSMO-DE Modell berechnet. Die Vorhersagen reichen bis +21 Stunden. Zudem werden vom DLR-PA für einen gewählten Geschwindigkeitsschwellenwert NGAs für verschiedene Flughöhen erzeugt.

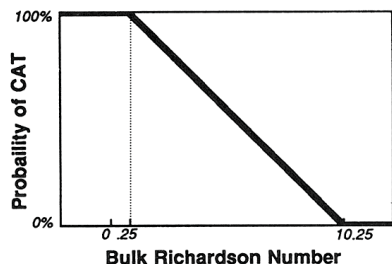


BILD 4. Empirischer Zusammenhang zwischen der Richardson Zahl und der Wahrscheinlichkeit für Clear Air Turbulence. [18]

Für sogenannte Clear-Air-Turbulence (CAT) wird die dimensionslose Richardson Zahl (Ri) herangezogen, die das Verhältnis von vertikaler Stabilität zu Windscherung ist. Sie gibt Auskunft über die Wahrscheinlichkeit und Intensität von CAT (siehe BILD 4). 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. Der Wert $Ri < 0,25$ ist meist mit Turbulenzmeldungen von Piloten konsistent. [18][19][20] Daher ist die Richardson-Zahl auch Teil des Vorhersage Algorithmus GTG (Graphical Turbulence Guidance). [21]

TAB 1. Überblick zu den Details der Wetterinformationen.

Wettertyp	Datenquelle	Algorithmus	Beschreibung	Vorhersagezeit	Prognose Interv.	Update Interv.	Format
Starkniederschlag	Radar	Rad-TRAM	Polygon	0-1 Stunde	5 Minuten	5 Minuten	XML
Gewitterzellen	Satellit	Cb-TRAM	Polygon	0-1 Stunde	5 Minuten	15 Minuten	XML
Gewitterzellen	COSMO-DE	Cb-LIKE	Polygon	1-6 Stunden	1 Stunde	1 Stunde	XML
Wind	COSMO-DE	-	Vektor/Polygon	1-21 Stunden	1 Stunde	3 Stunden	GRIB
Turbulenz	COSMO-DE	-	Polygon	1-21 Stunden	1 Stunde	3 Stunden	XML

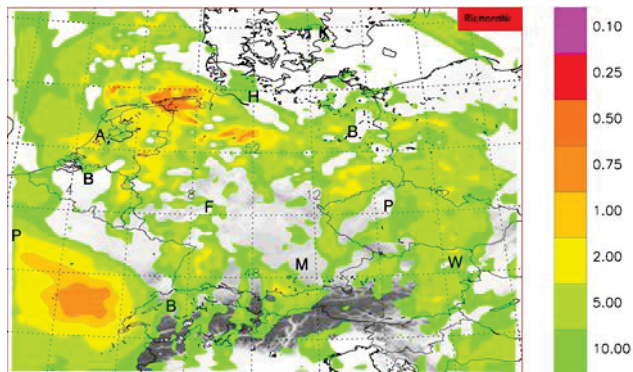


BILD 5. Beispiel einer einstündigen Prognose der Richardson-Zahl (farbige Flächen) für FL280. Aus Daten des COSMO-DE Modells erzeugt das DLR-PA NGAs für Gebiete gleicher Richardson-Zahl.

3. VERARBEITUNG VON WETTERDATEN

Der große Vorteil des Wetterlagebilds des DLR liegt in der geometrischen Vorinterpretierung der Wetterdaten in Form von Polygonen und Vektoren. Dennoch sind weitere Schritte notwendig um eine sichere räumliche Vermeidung zu berechnen. Einige davon werden hier vorgestellt. Für die Entwicklung einer Wettervermeidung wurde eine Testumgebung geschaffen. Dabei handelt es sich um ein Programm mit grafischer Benutzeroberfläche, welches zahlreiche Einstellmöglichkeiten für die Simulation bietet. Es ist möglich, alle verfügbaren Wetterdaten räumlich und zeitlich zu animieren. Die Generierung zufälliger Missionen zur Durchführung einer sehr großen Anzahl von Flügen durch Wettergeschehen sowie deren Aufzeichnung sind vorgesehen. Dies ermöglicht eine statistische Auswertung zur Methodvalidierung der Wettervermeidung.

3.1. Update der Wetterdaten

Ein historischer Datensatz z.B. für Gewitter beinhaltet das aktuell gemessene Lagebild sowie 12 Prognosen. In der Testumgebung wird nur das gemessene Wetter dargestellt und zwischen den Updates interpoliert. Die Berechnung von Vermeidungstrajektorien erfolgt jedoch stets auf Basis der aktuellen Prognosen. Damit kann nachvollzogen werden, wie gut die Flugplanung tatsächlich funktioniert.

3.2. Interpolation von No-Go-Areas

Eine Interpolation ermöglicht eine Erhöhung der zeitlichen Auflösung zwischen den Prognosen. Dies ist für die

Berechnung von Trajektorien notwendig, da die Planung diskrete Information voraussetzt. Die Interpolation kann für 2 oder 3 räumliche Dimensionen durchgeführt werden. Das BILD 6 zeigt ein Beispiel für 2 Dimensionen und den Zeitraum von 10 Minuten mit einem Intervall von 1 Minute.

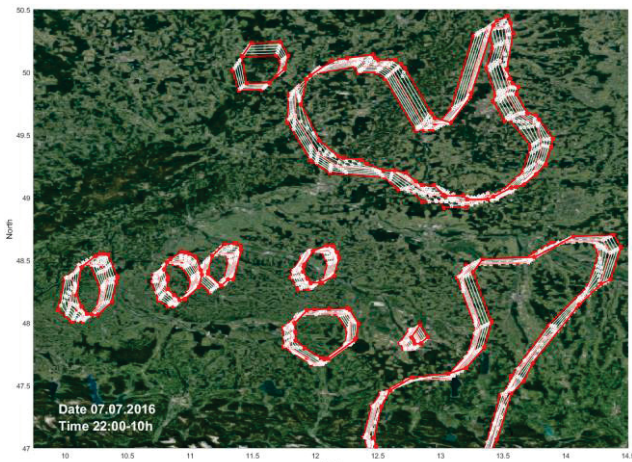


BILD 6. Einminütige Interpolation von Cb-TRAM Daten. Interpolierte Gewitter sind weiß, 5 minütige Prognosen rot dargestellt.

3.3. Sicherheitsmargen für Niederschlagsprognosen

Da bei meteorologische Berechnungen nicht alle Randbedingungen berücksichtigt werden und selbst kleinste Änderungen in den Startwerten sehr große Abweichungen verursachen können, ist Wetter zu einem gewissen Grad chaotisch. Genaue Prognosen (besonders lokal) sind kaum möglich. Je weiter eine Prognose in die Zukunft reicht desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese eintritt. Im Zusammenhang mit Unwettern werden häufig Wahrscheinlichkeitsprognosen herausgegeben. Beispiele dafür sind der oben erwähnte Algorithmus Cb-LIKE und die in BILD 7 gezeigte Starkwindprognose für einen Wirbelsturm.

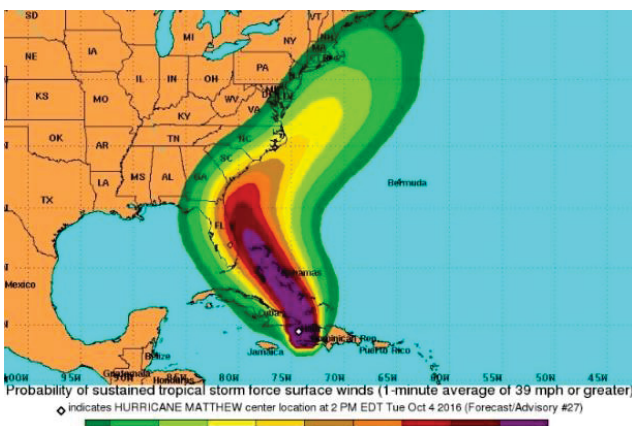


BILD 7. Probabilistische Windprognose im Zusammenhang mit einem Hurrikan. [22] Mit sinkender Wahrscheinlichkeit erweitert sich die abgedeckte Fläche beträchtlich.

Untersuchungen von [9] zu den Nowcasts von Rad-TRAM haben gezeigt, dass es möglich ist zeitabhängige Bereiche um Zellen mit Starkniederschlag auszuzeichnen,

welche mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit deren tatsächliche zukünftige Form einschließen. Dabei werden sowohl der laterale Versatz des Flächenschwerpunkts sowie die Formänderung eines Gewitters berücksichtigt. Nach [9] lässt sich der Sicherheitsabstand an verschiedenen Punkten einer Gewitter-NGA über ein quadratisches Polynom darstellen und ist eine Funktion des relativen Winkels ϕ zum Bewegungsvektor, eines wählbaren Perzentils p und der Zeit t . Der probabilistische Sicherheitsradius r_i ist in Bewegungsrichtung am größten und wird in entgegengesetzter Richtung minimal. Für $t_0 \leq t \leq +60$ Minuten kann dieser folgendermaßen angegeben werden:

$$r_i(t) = A(p, \phi_i)t^2 + B(p, \phi_i)t + C(p, \phi_i) \text{ mit } i = 1, \dots, n$$

Zur Erzeugung von probabilistischen Sicherheitsmargen werden in einem ersten Schritt alle prognostizierten NGAs in konvexe Form transformiert. Dies ist sinnvoll, da gewisse konkave Radarsignaturen mit Gefahren, wie starker Turbulenz oder Hagel assoziiert werden können. [23] Aus Kreisen mit den variablen Sicherheitsradien r_i werden neue konvexe Polygone gebildet (vgl. BILD 8).

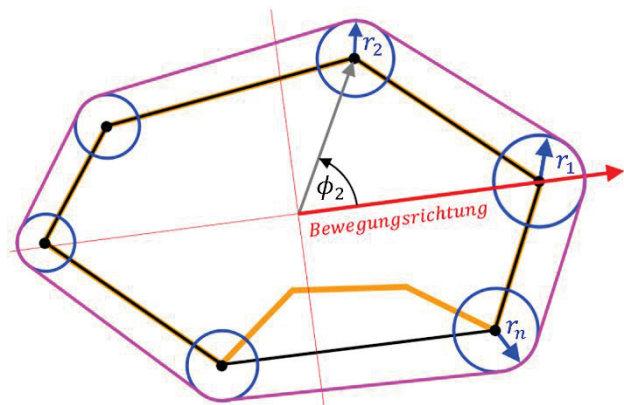


BILD 8. Schematischer Aufbau einer probabilistischen Sicherheitsmarge um eine Rad-TRAM Prognose (magenta), angelehnt an [9]. Orange ist die vorhergesagte NGA. In schwarz ist die konvexe NGA dargestellt.

Mit der gleichen Methode, werden die probabilistischen Sicherheitsmargen anschließend durch einen minimalen Sicherheitsabstand ($r_{min} = \text{const.}$) erweitert. Dieser kann entsprechend dem Gefahrenpotential für das Flugzeug skaliert werden. Die so gebildeten Sicherheitsmargen werden anschließend über bool'sche Operationen vereint. Diese Bearbeitungsschritte werden auf alle Prognosen angewendet. Dazwischen wird, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, zeitlich interpoliert.

In BILD 9 und BILD 11 sind Beispiele für die Anwendung dieser Sicherheitsmargen abgebildet. In Blau sind die Rad-TRAM Prognosen für t_0+45 Minuten (blau), vom 07.07.2016 um 19:44 und 22:05h abgebildet. Die entsprechenden Sicherheitsmargen sind hellblau. Die Messungen von Rad-TRAM für die prognostizierte Zeit werden auch dargestellt. Starkregenzellen mit der gleichen Identifikationsnummer (Kapitel 2.2.1) wie in der Prognose sind rot. Zellen mit abweichender Identifikationsnummer werden orange dargestellt und sind entweder neu entstanden oder mit anderen Zellen fusioniert.

Durch Bildung von Clustern (BILD 10, BILD 12) werden enge Passagen zwischen den Sichermargen (BILD 9, BILD 11) geschlossen. Die so entstehenden NGAs entsprechen mehr der Intuition und verbessern teilweise die Abdeckung des tatsächlichen Wetters. Es gilt zu beachten, dass Gewittervorhersagen die Entstehung neuer Gewitterzellen nicht beinhalten. Lediglich für erkannte Gewitter ist eine Prognose möglich. [8]

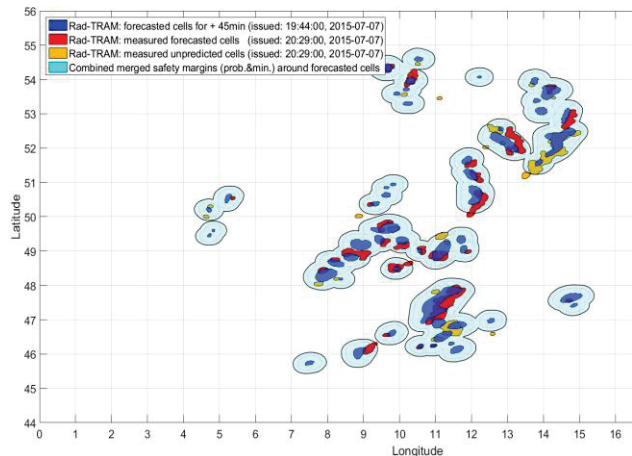


BILD 9. Sicherheitsmargen um die Gewitterprognosen von Rad-TRAM. Positiver Nebeneffekt der Methode ist, dass häufig nicht prognostizierte Zellen abdeckt werden.

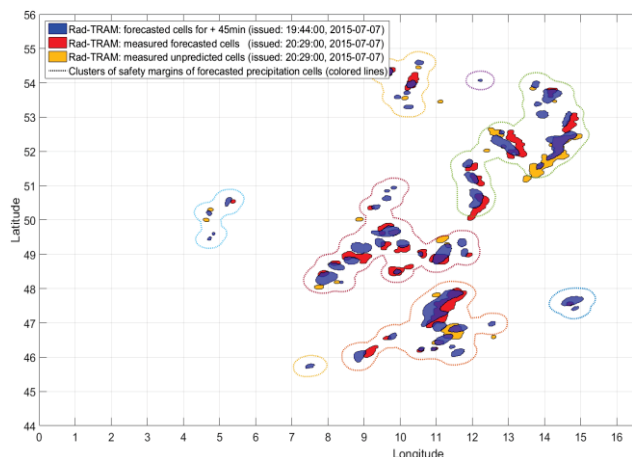


BILD 10. Die gepunkteten, farbigen Linien kennzeichnen erkannte Ansammlungen von vorhergesagten Zellen.

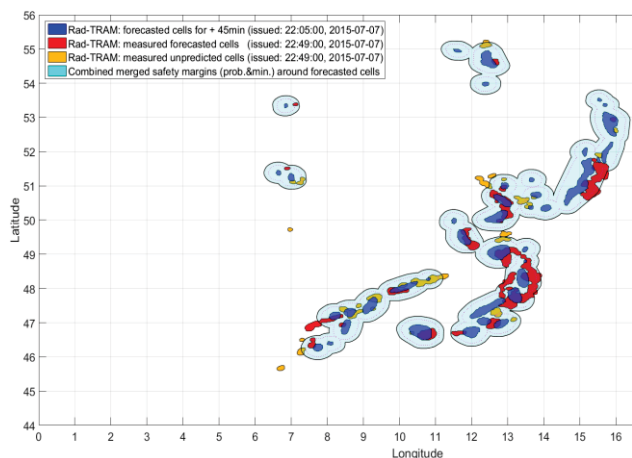


BILD 11. Sicherheitsmargen um den Rad-TRAM Nowcast von 22:05h und gemessenes Wetter von 22:49h.

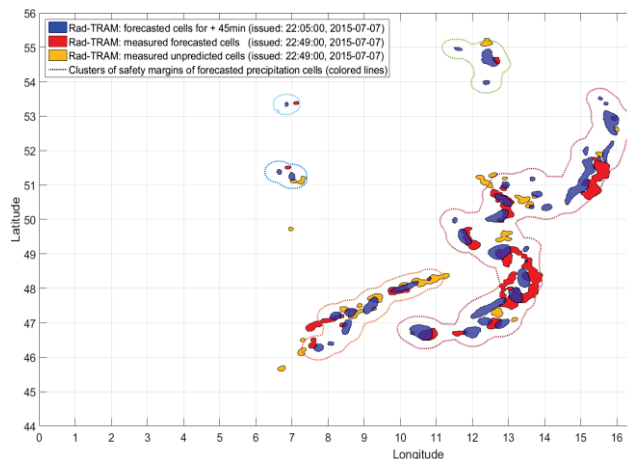


BILD 12. Zu Clustern zusammengefasste Bereiche eignen sich aufgrund ihrer geschlossenen Form bestens für die Flugplanung.

Man beachte, dass es sich bei BILD 9 bis BILD 12 um Beispiele handelt. Tatsächlich würde man beim Betrieb eines HAPS, in der Troposphäre den minimalen Sicherheitsabstand (Kapitel 3.3) deutlich größer wählen. Geringe Fluggeschwindigkeit, geringe Flächenbelastung und die großen Streckung machen diesen anfällig gegenüber Turbulenz. Untersuchungen von [24] zeigen, dass das Risiko für mittlere bis starke Turbulenz noch in einer Entfernung von 38NM zu Zellen mit Starkniederschlag (mit Vertical Integrated Liquid $> 3.5 \text{ kg/m}^2$ bzw. 41dbZ und $h > 4.6\text{km}$) etwa verdoppelt ist. Laut [25] muss noch in einem Abstand von 15-20NM zu starken Gewittern (in Windrichtung) mit starker Turbulenz gerechnet werden. Abhängig von der Flughöhe werden minimale laterale Abstände zwischen 10-20NM empfohlen. Diese Empfehlungen reichen für HAPS nicht aus.

3.4. Konkave vs. konvexe No-Go-Areas

Aus den verbundenen Sicherheitsmargen (Kapitel 3.3) entstehen meist konkave Polygone. Werden NGAs für eine Vermeidung als konvexe Polygone dargestellt (z.B. Ellipsen [7]), so kann das negative Folgen bezüglich der Abdeckung nach sich ziehen. Werden alle konkaven Polygone zu konvex gerechnet, so kommt es gelegentlich zu Überschneidungen. Konkave Polygone bilden zusammen erneut konkave Gebilde. Werden diese wiederum transformiert, so führt dies potentiell zu einer Kettenreaktion, bei der große Bereiche für den Durchflug gesperrt werden. In BILD 13 sind die Sicherheitsmargen hellblau abgebildet. Wird jede Sicherheitsmarge konvex gerechnet, so ist die Fläche der NGAs (Summe aller mittel- und hellblauen Flächen) bereits um den Faktor 1.25 vergrößert. Werden sich schneidende NGAs als konvexe Polygone dargestellt (Summe aller farbigen Flächen) so ist die bedeckte Fläche sogar 1.63x größer, als die der Sicherheitsmargen. Dies verdeutlicht wieviel freie Fläche bei der Verwendung konvexer Polygone verloren gehen kann. Tatsächlich sind konkave Bereiche von Gewittern gefährlich. Jedoch werden diese Zonen bereits bei der Erzeugung der Sicherheitsmargen (vgl. Kapitel 3.3) abgedeckt. Die durch die Verbindung der Sicherheitsmargen entstehenden konkaven Gebiete

werden als ungefährlich klassifiziert.

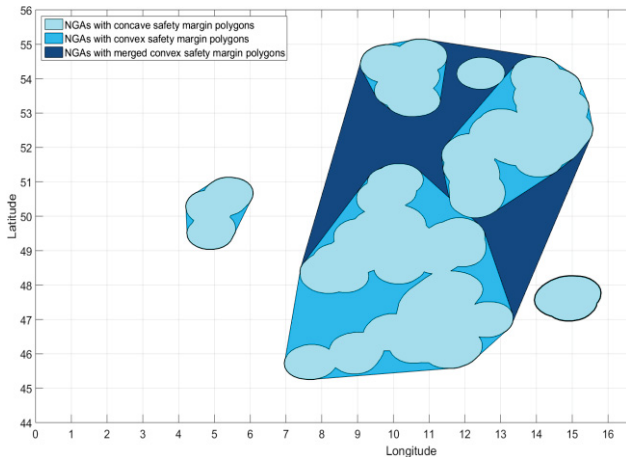


BILD 13. Durch konvexe Polygone werden zusätzlich zu den hellblauen Sicherheitsmargen auch die mittel- und dunkelblauen Flächen für den Durchflug gesperrt.

Für die Berechnung von Trajektorien werden deshalb alle geometrischen Wetterinformationen in Form von konkaven Polygonen weitergegeben.

3.5. Import und Interpolation des Windfelds

Die Daten werden aus dem GRIB-Format eingelesen. Die Windgeschwindigkeiten müssen anschließend von dem rotierten sphärischen Gitter des COSMO-Modells in das geografische Koordinatensystem transformiert werden. Dazu werden die Formeln aus [26] angewendet. Der Versatz der geografischen Polarkoordinaten beträgt für den Längengrad $\lambda_N = 190^\circ E$ und den Breitengrad $\varphi_N = 40^\circ N$. Diese Werte werden in die Formel zur Ermittlung des Winkels δ , zwischen den Längengraden der beiden Koordinatensysteme, eingesetzt:

$$\delta = \arctan \left\{ \frac{\cos \varphi_N \cdot \sin(\lambda_N - \lambda_g)}{\cos \varphi_g \cdot \sin \varphi_N - \sin \varphi_g \cdot \cos \varphi_N \cdot \cos(\lambda_N - \lambda_g)} \right\}$$

Die Windgeschwindigkeiten im geografischen System erhält man mit der Formel:

$$\begin{pmatrix} u_g \\ v_g \\ w_g \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta & 0 \\ -\sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$$

Die eingelesenen Daten werden für die Simulation der Flugleistung räumlich und zeitlich linear interpoliert

4. WETTERVERMEIDUNG

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick zu den Fähigkeiten der Wettervermeidung gegeben und Beispiele für berechnete Ausweichtrajektorien gezeigt. Eine detaillierte Beschreibung des Algorithmus wird in einer gesonderten Veröffentlichung vorgestellt. Der Algorithmus arbeitet bei der Vermeidung mit konkaven Polygonen (bunte Linien in BILD 10 und BILD 12). Der Aufbau der Wettervermeidung ist parametrisch und nicht auf die Anwendung von HAPS beschränkt. Im Folgenden werden einige Funktionen aufgezählt.

4.1. Funktionen der Wettervermeidung

- Eine laterale Vermeidung kann mit variabler oder konstanter Geschwindigkeit für eine gewählte Flughöhe berechnet werden. Allgemein ist eine laterale Vermeidung der vertikalen vorzuziehen. [23] Bei der geringen Steigleistung von HAPS ist vertikales Ausweichen häufig nur durch Kreisen möglich. Die Trajektorien sind energetisch günstig und frei von Hundekurven.
- Der Einfluss von Wind kann berücksichtigt werden.
- Auswahl verschiedener zeitvarianter Wetterdaten für die Vermeidung.
- Es ist möglich das Missionsgebiet einzuschränken und statische Hindernisse zu definieren.
- Wird kein direkter Flugpfad gefunden, können Holding Pattern an freien Punkten im Raum geflogen werden.
- Befindet sich das Flugzeug innerhalb einer NGA (z.B. in einer nicht prognostizierten Gewitterzelle) verlässt es diese auf dem kürzesten Weg (BILD 14).

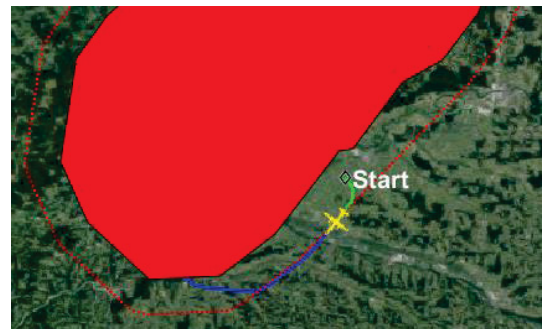


BILD 14. Zu Beginn der Berechnung befindet sich das Flugzeug innerhalb einer Sicherheitsmarge. Die Berechnung wird nicht abgebrochen, das Flugzeug verlässt die NGA auf dem kürzesten Weg und setzt den Flug fort.

4.2. Zeitliche Einschränkungen

Da die Prognosen von Rad-TRAM und Cb-TRAM nur für den Zeitraum von t_0+1 Stunde verfügbar sind, ist die Wettervermeidung prinzipiell nur in der Lage für diesen Zeitraum eine Planung durchzuführen. Der Algorithmus kann ermitteln, ob der Zielpunkt innerhalb dieser Zeitspanne erreicht werden kann. Ist dies nicht der Fall so kann darüber hinaus die Prognose von Cb-LIKE herangezogen werden. Trotz einer verhältnismäßig geringen zeitlichen Auflösung (statische NGAs für 1 Stunde) ist diese sehr nützlich für eine grobe Planung bis zu t_0+6h . Da im Laufe des Flugs regelmäßig Wetterupdates stattfinden kann schließlich mit den Nowcasts bis zum Zielpunkt geplant werden.

4.3. Beispiel für berechnete Wettervermeidung

In BILD 15 wird ein Beispiel für eine Vermeidung von

prognostizierten Gewittern (Cb-TRAM), mit der KML-Toolbox für Matlab, in Google Earth visualisiert. Die Fahnen 1 und 2 markieren den Start- und Zielpunkt. Der direkte Weg (orangefarbene Linie) ist nicht möglich. Die Wettervermeidung leitet das Flugzeug (schwarzer Punkt) nach Südwesten, da das Flugzeug in der Zukunft die nord-östliche Flugroute nur durch Verlassen des Missionsgebiets (rote Linie) fliegen könnte. Die Sicherheitsabstände (hellblaue Körper), um die Gewitterzellen (rote Körper), werden dabei konsequent eingehalten.

nach Südwesten, da das Flugzeug in der Zukunft die nord-östliche Flugroute nur durch Verlassen des Missionsgebiets (rote Linie) fliegen könnte. Die Sicherheitsabstände (hellblaue Körper), um die Gewitterzellen (rote Körper), werden dabei konsequent eingehalten.

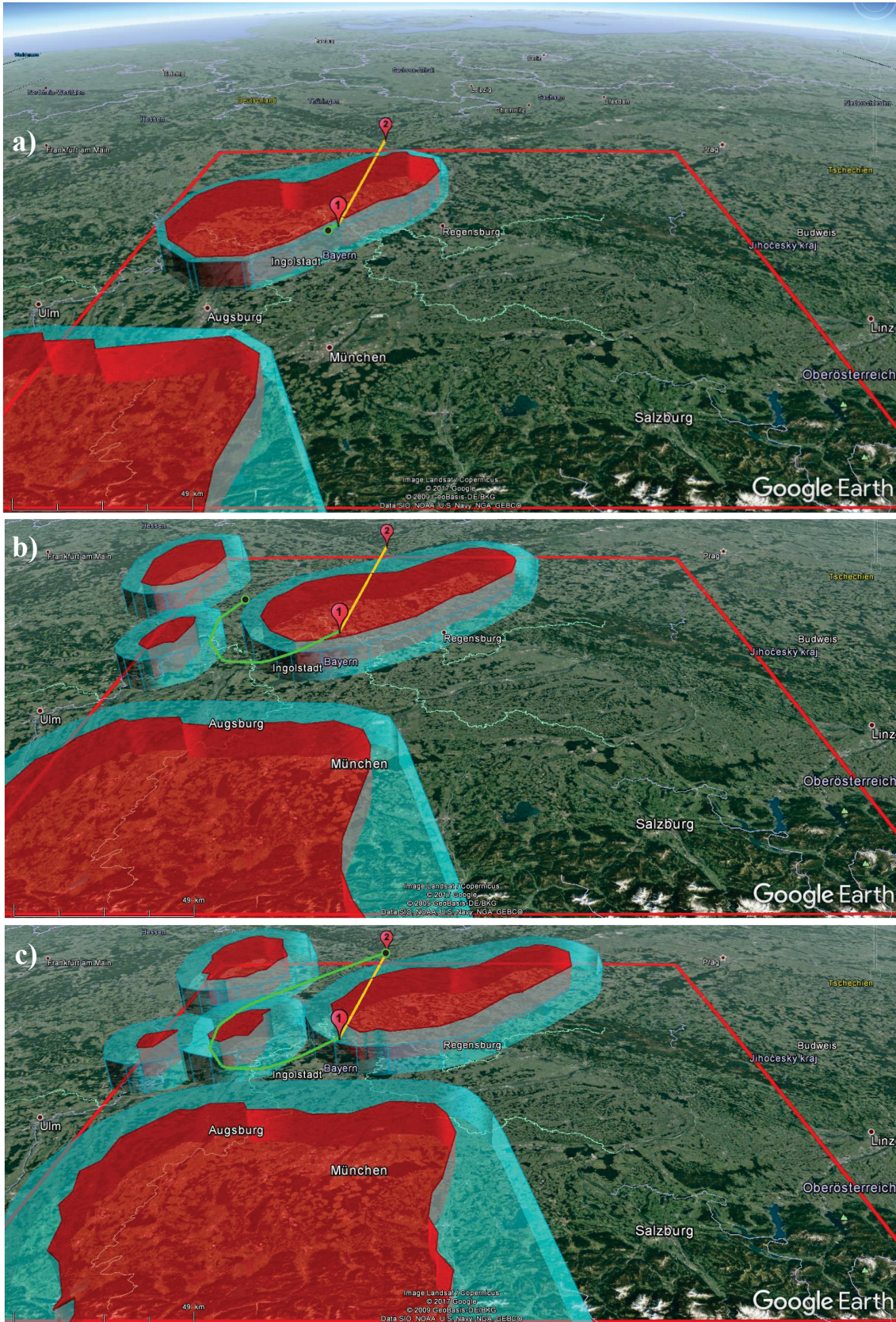


BILD 15. HAPS fliegt in a) aus einer NGA heraus, fliegt in b) hinter dem Gewitter vorbei und erreicht in c) das Ziel.

5. DARSTELLUNG DER FLUGLEISTUNG

Um die Flugleistung eines HAPS abzubilden, wurde ein generisches Modell entworfen und in Simulink modelliert. Versuche mit einem Modell des Instituts für Systemdynamik und Regelungstechnik (SR) des DLR belegen, dass die berechneten Vermeidungstrajektorien mit Wind geflogen werden können (BILD 15).

5.1. Technische Daten eines generischen HAPS

Für die Abbildung der Flugleistung eines HAPS wurde exemplarisch ein Nachentwurf eines Zephyrs von Airbus erstellt (BILD 16). Folgende Werte wurden zu Grunde gelegt:

- Motorleistung: $2 \times 900W$
- Durchmesser Propeller: $1,6m$
- Leergewicht: $53kg$
- Gesamtgewicht: $55,5kg$
- Profil Tragfläche: *Eppler E395*
- Spannweite: $22,5m$
- Flügelfläche: $31m^2$
- Profil Leitwerk: *NACA 63010a*
- Maße Höhenleitwerk: $4,2m \times 0,85m$
- Maße Seitenleitwerk: $1,5m \times 1m$
- Länge Rumpf: $8,2m$

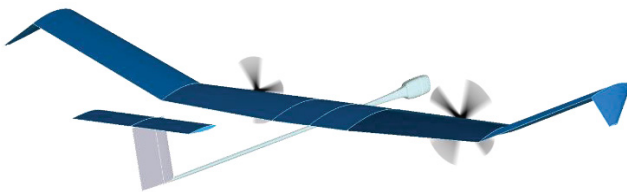


BILD 16. Entwurf eines Pseudosatelliten.

5.2. Mathematisches Modell

Die Kenntnis der Flugzeugleistung ist Voraussetzung für die zeitvariante Vermeidung von Wetter. Obwohl ein HAPS aufgrund der leichten Bauweise einen starken Einfluss der Flexibilität auf die Struktur erfährt, wird an dieser Stelle mit einem Punktmassenmodell mit 3 Freiheitsgraden gerechnet. Dieses erlaubt eine ausreichende Genauigkeit für die Flugleistungsberechnung bei verringertem Berechnungsaufwand. Die Steuergrößen sind der Anstellwinkel α , Hängewinkel μ und Schub T . Der Auftriebs- und Widerstandsbeiwert werden folgendermaßen berechnet:

$$C_A = C_{A_0} + \frac{\partial C_A}{\partial \alpha} \cdot \alpha$$

$$C_W = C_{W_0} + k \cdot C_A^2$$

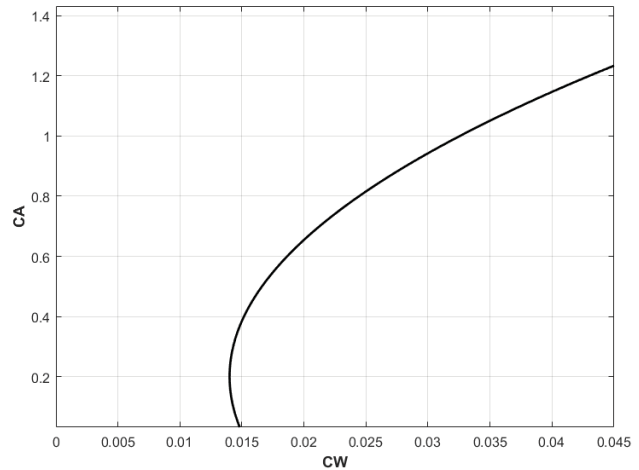


BILD 17. Quadratische Polare des HAPS mit $(C_A/C_W)_{max} = 32$.

Aus dem Verhältnis zwischen der Differenz von Schub T und Widerstand W zu der Gewichtskraft kann das Lastvielfache in x-Richtung berechnet werden. Das Verhältnis von Auftrieb zu Gewichtskraft ergibt das Lastvielfache in z-Richtung. Durch Integration können die Geschwindigkeit V , Kurs χ und Bahnwinkel γ mit folgenden Formeln berechnet werden:

$$n_x = \frac{T-W}{m \cdot g} \rightarrow \dot{V} = g \cdot (n_x - \sin\gamma) \rightarrow V = \int \dot{V} dt$$

$$n_z = \frac{A}{m \cdot g} \rightarrow \dot{\chi} = g \cdot \frac{n_z \cdot \sin\mu}{V \cdot \cos\gamma} \rightarrow \chi = \int \dot{\chi} dt$$

$$\dot{\gamma} = g \cdot \frac{n_z \cdot \cos\mu - \cos\gamma}{V} \rightarrow \gamma = \int \dot{\gamma} dt$$

Die Ermittlung der aktuellen Position unter Berücksichtigung des Winds erfolgt durch zeitliche Integration der Vektorsumme aus Flugzeug- und Windgeschwindigkeiten:

$$\dot{x} = V \cdot \cos\chi \cdot \cos\gamma \rightarrow V_x = \dot{x} + V_{xw} \rightarrow x = \int V_x dt$$

$$\dot{y} = V \cdot \sin\chi \cdot \cos\gamma \rightarrow V_y = \dot{y} + V_{yw} \rightarrow y = \int V_y dt$$

$$\dot{z} = V \cdot \sin\gamma \rightarrow V_z = \dot{z} + V_{zw} \rightarrow z = \int V_z dt$$

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Für die Anwendung auf HAPS wurden Teile einer automatischen Wettervermeidung vorgestellt. Diese kann bei Kommunikationsausfall zum Einsatz kommen. Besonderheiten sind die mittelfristige Vermeidung statischer und dynamischer Hindernisse. Sicherheitsabstände können individuell auf unterschiedliche Flugzeuge angepasst werden. Die Flugleistung kann den Umständen entsprechend abgebildet werden (z.B. Geschwindigkeit über Grund mit Wind). Dies gewährleistet, dass die berechneten Wegpunkte fliegbar sind. Insgesamt werden zeitlich und energetisch günstige Flugrouten berechnet. Eine absolut optimale Planung ist nicht möglich, da mit Wetterprognosen gearbeitet wird, die nie genau so eintreten. Ein robustes Verhalten ermöglicht den Umgang mit Sprüngen im Wetterlagebild. Alle Ansätze können auf andere Flugzeuge angewendet werden. Zukünftig werden solche Anwendungen

auch in der bemannten Luftfahrt, z.B. als Assistenzsysteme, an Bedeutung gewinnen.

7. DANKSAGUNG

Hiermit bedanke ich mich für die Förderung durch den Ludwig Bölkow Campus und das Bayerische 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. Das Projekt StraVARIA ermöglicht dem Autor die Promotion im Bereich der automatischen Flugführung an der Technischen Universität München. Ich bedanke mich bei meinen Kollegen Reiko Müller und Ferdinand Settele sowie meinen Betreuern Dr. Alexander Knoll und Dr. Florian Holzapfel für die Unterstützung.

8. LITERATUR

- [1] Kumar Jenamani, R., & Kumar, A. (2013). Bad weather and aircraft accidents—global vis-à-vis Indian scenario. *Current Science (00113891)*, 104(3).
- [2] Federal Aviation Administration. (2016). Clear Air Turbulence Avoidance (Advisory Circular 00-30C). Washington, D.C: AFS-400.
- [3] Mothes, F., Klöckner, A., Kiam, J. J., Köhler, M., Pollok, A., Knoll, A., & Schulte, A. (2016). Autonomes Missionsmanagement für unbemannte solarbetriebene Flugzeuge mit extrem langer Flugdauer.
- [4] Mirza, A. K., Pagé, C., & Geindre, S. (2008, January). FLYSAFE—an approach to safety—using GML/XML objects to define hazardous volumes of aviation space. In *13th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*.
- [5] Krozel, J., Penny, S., Prete, J., & Mitchell, J. S. (2004, August). Comparison of algorithms for synthesizing weather avoidance routes in transition airspace. In *AIAA Guidance, Navigation and Control Conf.*
- [6] Cauchi, N., Theuma, K., Zammit, C., Gauci, J., & Zammit-Mangion, D. (2015, September). A decision support tool for weather and terrain avoidance during departure. In *Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2015 IEEE/AIAA 34th* (pp. 2G1-1). IEEE.
- [7] Kamgarpour, M., Dadok, V., & Tomlin, C. (2010, December). Trajectory generation for aircraft subject to dynamic weather uncertainty. In *Decision and Control (CDC), 2010 49th IEEE Conference on* (pp. 2063-2068). IEEE.
- [8] Hauf, T., Sakiew, L., & Sauer, M. (2013). Adverse weather diversion model DIVMET. *Journal of Aerospace Operations*, 2(3-4), 115-133.
- [9] Sauer, M., Hauf, T., & Forster, C. (2014). Uncertainty Analysis of Thunderstorm Nowcasts for Utilization in Aircraft Routing.
- [10] Ahlstrom, U., Ohneiser, O., & Caddigan, E. (2016). Portable weather applications for general aviation pilots. *Human factors*, 58(6), 864-885.
- [11] Graphical Airman's Meteorological Advisory (GAIRMET), Product Description Document. (2010, March 16). Retrieved from http://products.weather.gov/PDD/GAIRMETPDD_2010.pdf.
- [12] Map Layers. (2017, July 19). Retrieved from <https://www.foreflight.com/products/foreflight-mobile/maps/>.
- [13] RAD-TRAM.21 RX (Munich Airport). (2017, July 25). Retrieved from <http://www.pa.op.dlr.de/MUCSOMMER/2013/20130729.html>
- [14] Weber, M. E. (1986). *Assessment of ASR-9 Weather Channel Performance: Analysis and Simulation*. Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Koehler, M., Tafferner A., & Gerz, T. (2016). Cb-LIKE - Cumulonimbus Likelihood: Thunderstorm forecasting with fuzzy logic. Submitted to *Meteorologische Zeitschrift*.
- [18] Stull, R. B. (2012). *An introduction to boundary layer meteorology* (Vol. 13). Springer Science & Business Media.
- [19] Endlich, R. M. (1964). The mesoscale structure of some regions of clear-air turbulence. *Journal of Applied Meteorology*, 3, 261-276.
- [20] 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.
- [21] Sharman, R., Tebaldi, C., Wiener, G., & Wolff, J. (2006). An integrated approach to mid-and upper-level turbulence forecasting. *Weather and forecasting*, 21(3), 268-287.
- [22] Masters, J. (2017, July 25). Hurricane Forecast Computer Models. Retrieved from www.wunderground.com/hurricane/models.asp.
- [23] Marconnet, D., Norden, C., Vidal, L., (2016, July). Optimum use of weather radar. *Safety first, issue(22)*, 22-43..
- [24] 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), 499-515
- [25] NATS (UK). (2010). *UK AIC P 056/2010: The Effect of Thunderstorms and Associated Turbulence on Aircraft Operations*. Hounslow, Middlesex: UK Aeronautical Information Service.
- [26] Schulz, J. P. & Schättler, U. (2010). Kurze Beschreibung des Lokal-Modells Europa COSMO-EU (LME) und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD. Postfach 100465, D-63004 Offenbach: Deutscher Wetterdienst, Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung.