

KODIERUNG GLOBALER MISSIONSKRITERIEN IN EINEM SAMPLING-BASIERTEM PFADPLANER FÜR EIN AUTONO- MES HUBSCHRAUBER-UAV

M. Mieth, Helmut-Schmidt-Universität, 22043 Hamburg, Deutschland
F.-M. Adolf, DLR-Institut für Flugsystemtechnik, 38108 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Im Vordergrund dieser Arbeit steht ein neuartiges Kostenfunktionskonzept zur automatisierten Missionsplanung eines Hubschrauber-UAV. Hierbei wird sich auf eine rein geometrische Pfadplanung, d. h. ohne Flugdynamik des Luftfahrzeugs konzentriert werden. Der implementierte Ansatz basiert auf einem globalen, Sampling-basierten 3D-Pfadplaner wie sie zunehmend Anwendung finden und dabei häufig auf genau eine Kostenfunktion (z. B. kürzeste Distanz) beschränkt sind. Deshalb werden in dieser Arbeit im Rahmen eines algorithmischen Gesamtkonzepts erste neue Kostenfunktionen erarbeitet. Aus der Menge der als machbar identifizierten Kostenkodierungen wird der Tiefflug als illustratives Beispiel dargestellt, um Vor- und Nachteile komplexer Interaktionen verschiedener Ansätze mit gleicher, subjektiver Pfadverlaufsvorgabe gegenüberzustellen. Die erzielten Ergebnisse zusammen mit den im Ausblick aufgezeigten Möglichkeiten stellen neue Planungskriterien zur Verfügung, die komplexeren Missionszielen gerecht werden können. So ist es nun beispielsweise möglich, automatisiert einen Tiefflugabschnitt zu generieren und dabei bestimmte Hindernistypen nicht zu überfliegen.

1. EINLEITUNG

Werden gewichtete Summen lediglich an einer Stelle des Pfadplanungssystems (meistens der heuristischen Suche) verwendet, so kann dies problematisch bzgl. der Ausdrucksstärke sein, da sie eine konvexe Schnittmenge an Begrenzungen und Präferenzen annehmen. Grund hierfür ist, dass die meisten Pfadplanungssysteme allein für „kürzeste“ Pfade entwickelt wurden. Man versucht nun die Navigationsfunktion durch eine Aneinanderreihung gewichteter Kostenelemente (z. B. Minimierung von Höhenänderungen, Distanz zum Boden, Entfernung zum Ziel) auszudrücken. Mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz verteilen wir die Berücksichtigung von Kosten auf verschiedene Teile des Pfadplanungssystems (Graphenkanten, Position der Freiraumstichproben, Suchheuristik) und können so am Bsp. des Tieffluges sowie den weiteren, ab Kapitel 4 vorgestellten Methoden, komplexe Kostenfunktionen darstellen, während die Pfadsuche „klassisch“ weiterhin nur nach kürzesten Pfaden sucht. Der verwendete Sampling-basierte 3D Pfadplaner basiert im Wesentlichen auf [1], [2] und [3].

2. ROUTENPLANUNG

Die Routenplanung stellt die Grundlage für die autonome Bewegung von UAVs dar und ermöglicht die Planung von Flugrouten entlang von Wegpunkten. Ausgehend von einem Start- und Zielpunkt wird mit Hilfe eines Suchalgorithmus eine Route geplant. Voraussetzung dafür ist die Existenz eines Wegegraphen. Das sogenannte Weltmodell enthält als dreidimensionaler Raum alle mittels eines Samplings (z. B. PRM ([4]), QRM ([5])) erzeugten Wegpunkte, den mittels eines Suchalgorithmus (z. B. A* ([6]), D* ([7])) geplanten Pfad sowie Informationen über bekannte Hindernisse. Jeder Punkt innerhalb des Weltmodells kann durch einen dreidimensionalen Vektor beschrieben werden. Dazu ist die Existenz eines Koordinatensystems notwendig. Dieses ist im BILD 1 dargestellt

und folgt dem Luftfahrt-genormten Koordinatensystem *North-East-Down*.

Die Höhen h_g und h_L beschreiben die Ausmaße des begrenzten Weltmodells entlang der z -Achse mit Bezug zu $z = 0$. Dabei ist h_g die obere und h_L die untere Grenze der Welt. Die Teilstrecke $\overline{P_n P_{n+1}}$ zwischen zwei Wegpunkten P_n und P_{n+1} , auch Graphenkante genannt, entspricht deren euklidischem Abstand. Die sogenannte Kostenfunktion teilt den Kanten gemäß den gestellten Anforderungen Kosten zu, welche den Aufwand beschreiben, um von einem Wegpunkt zum nächsten zu gelangen. Die Gesamtkosten einer Route, welche sich aus den Kosten jeder Teilstrecke zusammensetzen, werden von dem Suchalgorithmus je nach Anforderung minimiert oder maximiert, um eine optimale Flugroute zu finden.

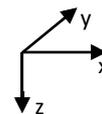


BILD 1: Verwendetes Koordinatensystem.

3. KONZEPT AM BEISPIEL TIEFFLUG

Wird an die zu planende Route die Anforderung des Tieffluges gestellt, so soll sich ein Pfad ergeben, welcher die Flughöhe minimiert. Die konzeptionelle Idee bei der Realisierung des Tieffluges besteht in der Einführung und Definition eines sogenannten Tiefflugbandes (siehe BILD 2). Die Höhe h_{TFmax} gibt dabei die maximale Höhe über dem Boden an, in der sich das UAV bewegen darf. Die Höhe h_{TFmin} gibt die minimale Höhe über dem Boden an, in der sich das UAV bewegen darf. Sie ist damit gleichbedeutend mit der Bodenfreiheit bzw. dem Sicherheitsabstand, welcher zum Boden eingehalten werden muss. Außerhalb des durch die beiden Schranken definierten Tiefflugbandes ist der Aufenthalt verboten. Die entstehenden Kosten sind unendlich hoch. Da das Tiefflugband lediglich die

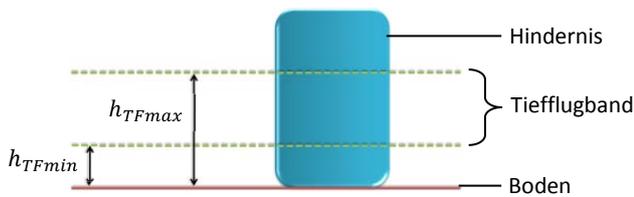


BILD 2: Tiefflugband.

Höhe einschränkt, in welcher geflogen werden darf, ist es notwendig, die resultierende Kostenfunktion mit einer anderen zu kombinieren, welche das Flugverhalten innerhalb der definierten Schranken vorgibt. Dazu ist die Kostenfunktion des kürzesten Weges gut geeignet. Der resultierende Pfad besteht damit aus dem kürzesten Weg innerhalb des Tiefflugbandes. Das Problem bei der Verwendung von Suchgraphen (z. B. PRM, QRM) ist die mangelhafte Abdeckung des Bereiches entlang des Bodens, welcher aber gerade für den Tiefflug von essentieller Bedeutung ist. So existieren aufgrund der (quasi)zufälligen Verteilung nur vereinzelte Wegpunkte in Bodennähe. Dies hat zur Folge, dass ein Pfad innerhalb des Tiefflugbandes, dessen Ausmaße gerade in urbanem Gelände nicht zu groß sein sollten, entweder gar nicht geplant werden kann oder eine große Anzahl an Höhenänderungen enthält, welche wiederum für ein Tiefflugszenario unerwünscht sind und vermieden werden sollten. Weiterhin existiert vor allem oberhalb der maximalen Tiefflughöhe h_{TFmax} eine Vielzahl an Wegpunkten, welche aufgrund ihrer Position außerhalb des Tiefflugbandes nicht angefliegen werden dürfen. Erhöht man die Dichte eines Suchgraphens, so ist es möglich, eine bessere Abdeckung mit Wegpunkten in Bodennähe zu erzielen. Damit diese Abdeckung jedoch ausreichend ist, muss die Anzahl der Wegpunkte im gesamten Arbeitsraum erhöht werden. Dadurch steigt der notwendige Speicherplatz und die benötigte Rechenzeit, da aufgrund der erhöhten Samplingdichte jeder Knoten eine erhöhte Anzahl an Nachbarknoten besitzt, deren Kanten allesamt auf Kollisionsfreiheit geprüft und dem Wegegraphen hinzugefügt werden müssen. Die Verwendung eines herkömmlichen Suchgraphen hat sich somit für die Realisierung des Tieffluges als nicht geeignet herausgestellt. Um die erwähnten Probleme zu vermeiden, ist es sinnvoll und zweckmäßig, nach der Erzeugung des Suchgraphen ein zusätzliches Sampling durchzuführen, welches gezielt in Bodennähe stattfindet. Diese neue Samplingmethode soll im Folgenden als sogenanntes Tiefflugsampling bezeichnet werden.

4. SAMPLING-VERFAHREN FÜR DEN TIEFFLUG

Um das Tiefflugsampling in einem bestimmten Bereich oberhalb des Bodens, welcher ein reales Höhenprofil nachbildet, durchführen zu können, ist ein a priori Wissen über die Position des Bodens im Weltmodell notwendig. Das Tiefflugband muss dementsprechend einen konstanten Abstand relativ zum Höhenprofil des Bodens besitzen. Weiterhin soll das Tiefflugsampling gezielt oberhalb des Bodens stattfinden. Demnach muss das Sampling ebenfalls in einer Höhe relativ zum Höhenprofil des Bodens durchgeführt werden. Das verwendete Weltmodell enthält jedoch keinerlei Informationen über Höhe des Bodens entlang der xy -Ebene, sodass die Verwendung einer sogenannten Distanzmethode sinnvoll ist. Diese Methode gibt entlang der z -Achse die Entfernung r_{dtg} eines beliebigen Punktes im Weltmodell zum nächsten Hindernis zu-

rück. Aufgrund der Tatsache, dass der Boden ebenfalls als Hindernis zu verstehen ist, kann nicht zwischen dem Boden als solchem und anderen Hindernissen, im Sinne von Gebäuden, Bäumen o.ä., unterschieden werden. Das Tiefflugsampling stellt an sich eine Modifikation des bestehenden Suchgraphen dar, welche die Distanzmethode ausnutzt. Bei dem Tiefflugsampling werden die Wegpunkte wie beim QRM-Algorithmus quasizufällig im dreidimensionalen Arbeitsraum erzeugt. Ausgehend von jedem einzelnen Wegpunkt n wird der Vektor \vec{p}_n , welcher die Koordinaten des Wegpunktes im dreidimensionalen Weltmodell enthält, mit

$$(1) \vec{p}_n = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ h_g \end{pmatrix}$$

an die Distanzmethode übergeben. Die z -Komponente wird auf die Höhe der oberen Grenze der Welt h_g gesetzt, damit auch Wegpunkte berücksichtigt werden können, welche nicht innerhalb des freien Konfigurationsraumes erzeugt wurden. Somit ist weiterhin kein Test jedes einzelnen Wegpunktes auf Kollisionsfreiheit notwendig. Der Rückgabewert $r_{dtg,n}$ der mit dem Vektor \vec{p}_n aufgerufenen Distanzmethode stellt dann die Distanz jedes auf die Höhe der oberen Grenze der Welt projizierten Wegpunktes zum nächsten Hindernis entlang der z -Achse dar. Mit Hilfe der Distanz $r_{dtg,n}$ wird dann jeder Wegpunkt auf eine definierte Höhe h_{sample} über das detektierte Hindernis projiziert (siehe BILD 3). Die z -Komponente jedes Vektors \vec{p}_n wird entsprechend angepasst, sodass folgt:

$$(2) \vec{p}_n = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ h_g + r_{dtg,n} - h_{sample} \end{pmatrix}$$

Aufgrund der Projektion der quasizufällig erzeugten Wegpunkte auf eine Höhe, welche lediglich vom Verlauf des Hindernisprofils abhängig ist, stellt das Tiefflugsampling als Modifikation eines 3D-Suchgraphen ein 2,5D-Sampling dar.

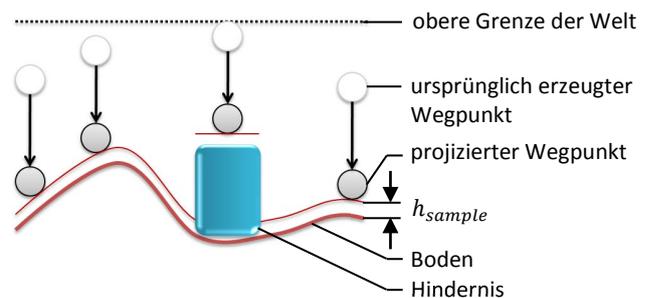


BILD 3: Darstellung der projizierten Wegpunkte.

In Folge der bereits erwähnten Tatsache, dass der Boden nicht von anderen Hindernissen unterschieden wird, kommt es zu einer Projektion der Wegpunkte auf eine relative Höhe h_{sample} sowohl über den Boden als auch über den Hindernissen, sodass man anschaulich von einem Tuch von Wegpunkten sprechen kann, welches sich dem Hindernisprofil anpasst. Im BILD 4 ist der resultierende Wegegraph nach dem Tiefflugsampling dargestellt. Mit Hilfe des Tiefflugsamplings ist es somit möglich, die geforderte Abdeckung mit Wegpunkten in Bodennähe sicherzustellen. Dabei kann dieses zusätzlich zu einem

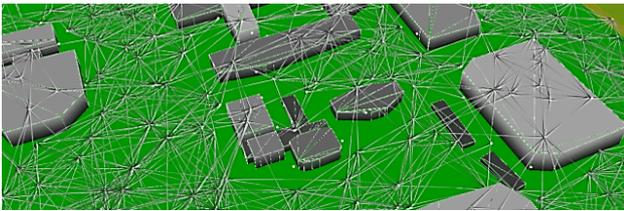


BILD 4: Wegegraph nach Tiefflugsampling.

3D-Sampling oder als eigenständiges Sampling angewandt werden. Für den alleinigen Fall des Tiefflugs ist das Tiefflugsampling ausreichend, da die Anforderung gerade darin besteht, so tief wie möglich entlang der Hinderniskulisse zu fliegen. Kombiniert man das Tiefflugsampling mit einem 3D-Sampling, so ergibt sich aufgrund der wesentlich höheren Sampleanzahl ein größerer Speicherbedarf sowie eine erhöhte Rechenzeit. Der Vorteil ist allerdings, dass der gesamte Arbeitsraum mit Wegpunkten abgedeckt ist, sodass sich die möglichen Missionsanforderungen nicht nur auf den Tiefflug reduzieren. Dies ist gerade hinsichtlich der Kombinierbarkeit von Missionsanforderungen von Interesse (siehe Abschnitt 9.). Besteht das Sampling allein aus dem Tiefflugsampling, so wird sich der geplante Pfad immer auf der Höhe h_{sample} befinden. Wird das Tiefflugsampling zusätzlich durchgeführt, so wird die Flughöhe wesentlich durch die Samplinghöhe bestimmt.

5. KOSTENFUNKTION FÜR DEN TIEFFLUG

Um die Anforderungen des Tieffluges zu realisieren, bedarf es einer kombinierten Kostenfunktion, welche die Kostenfunktion des kürzesten Weges als Grundlage besitzt. Die weiteren wichtigen Bestandteile folgen aus der Konzeption des Tiefflugbandes. Dieses muss jedoch einen konstanten Abstand relativ zum Höhenprofil des Bodens besitzen. Das BILD 5 zeigt das angepasste Tiefflugband als weitere Grundlage für die Kostenfunktion des Tieffluges.

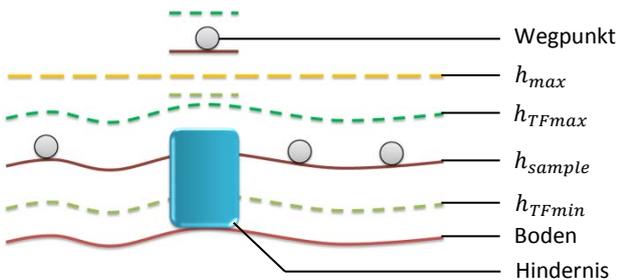


BILD 5: Angepasstes Tiefflugband.

Die minimale Tiefflughöhe h_{TFmin} , welche nicht überschritten, sowie die maximale Tiefflughöhe h_{TFmax} , welche nicht überschritten werden darf, müssen so angepasst sein, dass diese einen konstanten Abstand zum Boden einhalten. Dies wird wiederum mit Hilfe der Distanzmethode erreicht. Somit ergibt sich die untere Schranke des Tiefflugbandes z_u in Abhängigkeit von den Koordinaten x und y zu

$$(3) \quad z_u(x, y) = \begin{pmatrix} x \\ y \\ h_g + r_{dtg}(x, y) - h_{TFmin} \end{pmatrix}$$

und die obere Schranke z_o zu

$$(4) \quad z_o(x, y) = \begin{pmatrix} x \\ y \\ h_g + r_{dtg}(x, y) - h_{TFmax} \end{pmatrix}$$

Dabei ist $r_{dtg}(x, y)$ hier die Entfernung von der oberen Grenze der Welt mit den Koordinaten x, y und h_g zum nächsten Hindernis entlang der z-Achse. Die Höhe h_{sample} , auf die durch das Tiefflugsampling die Wegpunkte projiziert werden, ist ebenfalls dem Hindernisprofil angepasst. Eine Erweiterung des Tiefflugbandes stellt die Einführung einer Höhe h_{max} dar. Diese maximale Flughöhe h_{max} ist von der maximalen Tiefflughöhe h_{TFmax} zu unterscheiden. So besitzt die Höhe h_{max} einen festen Bezug zu $z = 0$, ist somit über die gesamte xy -Ebene konstant. Sie dient als Georeferenz einer weiteren oberen Schranke mit festem Bezug zu Normalnull. Da der eigentliche Boden nicht von anderen Hindernissen unterschieden wird, ergeben sich Sprünge im Tiefflugband. Dies ist genau dann der Fall, wenn das Tiefflugband auf Hindernisse abgebildet wird, welche gerade keinen Boden darstellen und muss bei der Formulierung der Kostenfunktion beachtet werden. Die Kostenfunktion des Tieffluges bewertet neben dem euklidischen Abstand zweier Wegpunkte auch deren Höhe gemäß dem Tiefflugband. Da ein Flug oberhalb der maximalen Tiefflughöhe h_{TFmax} bzw. unterhalb der minimalen Tiefflughöhe h_{TFmin} verboten ist, entstehen für Wegpunkte außerhalb dieser beiden Schranken unendlich hohe Kosten. Ein Flug oberhalb der maximalen Flughöhe h_{max} ist allerdings erlaubt, jedoch verbunden mit hohen Kosten, welche quadratisch mit der Entfernung zu h_{max} ansteigen. Die Höhe h_{max} soll somit als Anhaltspunkt für die maximale georeferente Flughöhe gelten, welche überschritten werden darf, falls kein anderer Pfad gefunden werden kann, der das Überschreiten der Höhe h_{max} vermeidet. Sie darf weiterhin überschritten werden, wenn durch den entstehenden Umweg zur Vermeidung einer Überschreitung höhere Kosten entstehen würden als bei einem Überschreiten der Höhe h_{max} . Da sich die Samplinghöhe h_{sample} inmitten des Tiefflugbandes befindet, ist ein Flug oberhalb derer bis zur Höhe h_{TFmax} erlaubt, jedoch ebenfalls verbunden mit quadratisch ansteigenden Kosten. Um die Anforderung des Tieffluges zu erfüllen, so tief wie möglich zu fliegen, muss die Kostenfunktion so formuliert werden, dass die Flughöhe gerade minimiert wird. Dazu ist es wiederum sinnvoll, die Entfernung zum Boden möglichst gering zu halten. Da jedoch der Boden nicht von anderen Hindernissen unterschieden wird, ergibt sich ein Kostenaspekt, welcher die Entfernung jedes Wegpunktes zum tiefsten Punkt der Welt h_L berücksichtigt. Je geringer also die Entfernung zur Höhe h_L ist, desto geringer sind die entstehenden Kosten. Zusammengefasst ergibt sich folgende Kostenfunktion für die Zuteilung von Kosten zwischen den zwei Wegpunkten P_n und P_{n+1} für die verschiedenen, erwähnten Fälle:

- $r_{dtg}(P_n) > h_{TFmax}$ oder $r_{dtg}(P_n) < h_{TFmin}$

$$(5) \quad cost_{TF}(P_n, P_{n+1}) = \infty$$

- $P_n.z - h_{max} < 0$

$$(6) \quad cost_{TF}(P_n, P_{n+1}) = \overline{P_n P_{n+1}} + |P_n.z - h_L|^2 + |P_n.z - h_{max}|^2$$

- $r_{dtg}(P_n) - h_{sample} > 0$
- (7) $cost_{TF}(P_n, P_{n+1}) = \overline{P_n P_{n+1}} + |P_n \cdot z - h_L|^2 + |r_{dtg} - h_{sample}|^2$
- sonst
- (8) $cost_{TF}(P_n, P_{n+1}) = \overline{P_n P_{n+1}} + |P_n \cdot z - h_L|^2$

Dabei stellt $P_n \cdot z$ die z-Koordinate des Punktes P_n dar. Das BILD 6 zeigt einen geplanten Pfad unter Anwendung der Kostenfunktion des kürzesten Weges. Das BILD 7 zeigt den geplanten Pfad unter Anwendung der Kostenfunktion des Tieffluges gemäß den Gleichungen (5) bis (8).

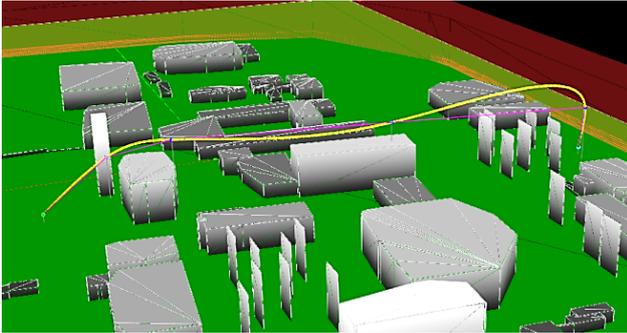


BILD 6: Kostenfunktion des kürzesten Weges.

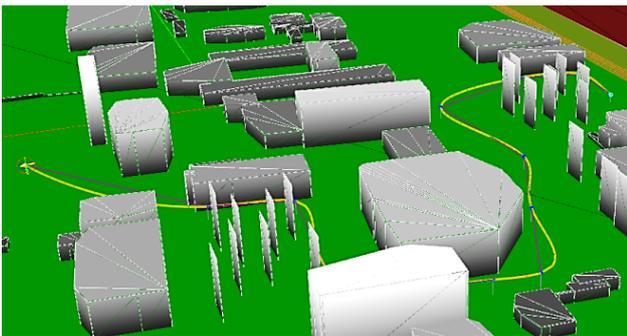


BILD 7: Kostenfunktion des Tieffluges.

6. LOKALE VERFEINERUNGSMETHODE

Bei näherer Betrachtung des Tieffluges stellt sich die Frage, ob es mit Hilfe des Tiefflugsamplings und der Kostenfunktion des Tieffluges möglich ist, unter Brücken oder freistehenden Dächern hindurch zu fliegen bzw. ob allgemein der Flug unterhalb von Hindernissen möglich ist. Mit der Realisierung des Tieffluges gemäß den Abschnitten 3. bis 5. können Pfade unterhalb von Hindernissen geplant werden, solange die Hindernisausmaße klein genug sind. Dazu ist es notwendig, dass der Abstand $\overline{P_1 P_2}$ zweier Wegpunkte P_1 und P_2 außerhalb des Hindernisses kleiner gleich dem Nachbarschaftsradius d_{max} ist, welcher die maximale Entfernung angibt, in der zwei Wegpunkte miteinander verbunden werden können. Ist dies der Fall, so existiert zwischen den beiden Punkten auch eine Kante, welche in die Pfadplanung mit einbezogen werden kann. Sind die Gebiete, welche unterflogen werden sollen, jedoch groß gegenüber d_{max} , kann keine Verbindung zwischen zwei Wegpunkten außerhalb des Hindernisses gefunden werden. Ein Unterfliegen wäre somit nicht möglich. Da jedoch die Missionsanforderung des Tieffluges

auch einen Flug unterhalb von Hindernissen, unabhängig von den Hindernisausmaßen, ermöglichen soll, muss das Tiefflugsampling um eine sogenannte Verfeinerungsmethode erweitert werden, welche genau diese Problemstrukturen erkennt und entsprechend berücksichtigt. Eine Verfeinerungsmethode stellt eine Samplingmethode dar, welche im Anschluss an ein vorausgegangenes initiales Sampling durchgeführt werden kann, um bestimmte Eigenschaften dieses Samplings zu verbessern. Ausgehend vom Tiefflugsampling als initialem Sampling ist bekannt, dass die erzeugten Wegpunkte lediglich über den Hindernissen abgelegt, bzw. auf eine bestimmte Höhe über die Hindernisse projiziert werden. Dies ist gleichzeitig der Ansatzpunkt für die Verfeinerung. Das Ziel dieser Verfeinerungsmethode ist die Detektion von eventuellen Freiräumen unter Hindernissen, um anschließend ein gezieltes Sampling innerhalb dieser Freiräume durchführen zu können. Als anschauliches Beispiel soll dazu ein Parkhaus dienen (siehe BILD 8 links). Die Verfeinerungsmethode würde dann die Freiräume jedes Parkdecks detektieren, und in diesen gezielt ein entsprechendes Sampling durchführen. Um die gesuchten Freiräume aufzuspüren, wird mit Hilfe der Kollisionstestmethode ein sogenannter Kollisionstest durchgeführt. Dieser Test prüft im Allgemeinen die Verbindung zwischen zwei Wegpunkten auf Kollisionen. Dabei entspricht hier, gemäß dem BILD 8 rechts, der Wegpunkt P_1 einem erzeugten Wegpunkt aus dem initialem Sampling. Der Wegpunkt $P_{1,p}$ stellt dabei die Projektion des Punktes P_1 auf die Höhe des tiefsten Punktes der Welt dar. In Vektorschreibweise gilt dann für $\vec{p}_{1,p}$

$$(9) \vec{p}_{1,p} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ h_L \end{pmatrix} .$$

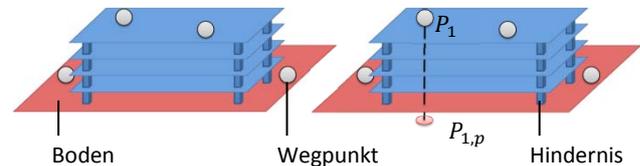


BILD 8: Anschauliches Beispiel für die Anwendung der Verfeinerungsmethode. Rechts: Projektion eines initialen Samples.

Im Anschluss an das initiale Sampling wird die Kollisionstestmethode ausgehend von jedem erzeugten initialen Wegpunkt n , mit dem Vektor \vec{p}_n und dessen Projektion $\vec{p}_{n,p}$ aufgerufen und ein Kollisionstest durchgeführt. Als Rückgabewert liefert die Methode jeweils einen Vektor, welcher alle von der Kante zwischen P_1 und $P_{1,p}$ geschnittenen Polygone enthält. Dieser zurückgegebene Polygonvektor wird von der Verfeinerungsmethode im Folgenden entsprechend ausgewertet. Es erfolgt ein Zugriff auf die sogenannte *Axis-Aligned Bounding Box* (AABB) jedes geschnittenen Polygons. Eine AABB entspricht einem, an den Koordinatenachsen ausgerichteten, quaderförmigen Volumen, welches der Erweiterung der Polygonausmaße um einen definierten Sicherheitsbereich dient. Sie stellt anschaulich einen dreidimensionalen Raum dar, welcher ein Unterraum des Hindernisraumes ist. Mit Hilfe der *Bounding Boxes* ist es nun möglich, die Räume unterhalb der Hindernisse aufzuspüren. Beträgt die Anzahl der geschnittenen Polygone gerade n , so existieren $n-1$ Hinder-

nisse über dem Boden. Mit der Kenntnis über die Anordnung der Hindernisse und die Lage der einzelnen *Bounding Boxes* ist es möglich, die Räume zwischen den einzelnen Hindernissen zu bestimmen. Die Verfeinerungsmethode nutzt diese Informationen und erzeugt innerhalb sowie zwischen benachbarten *Bounding Boxes* einen Suchgraphen. Die *Bounding Boxes* der Bodenpolygone werden dabei nicht mit Samples aufgefüllt. Dabei wird sichergestellt, dass innerhalb einer *Bounding Box* kein unnötiges mehrfaches Sampling stattfindet. Um die Auswirkungen der beschriebenen Verfeinerungsmethode anschaulich darzustellen, soll mit Hilfe eines Testszenarios „Parkhaus“, welches dem BILD 8 links nachempfunden ist, eine Missionsplanung durchgeführt werden. Das BILD 9 zeigt einen Überblick über das Szenario.

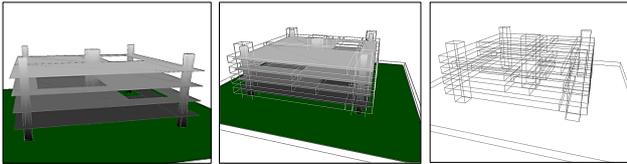


BILD 9: Links: Überblick, Mitte: Darstellung aller Polygone mit deren *Bounding Boxes*, rechts: isolierte Darstellung der *Bounding Boxes*.

Die Welt besteht aus einer ebenen Bodenplatte, sowie vier Parkdecks, welche über entsprechende Pfeiler miteinander verbunden sind. Weiterhin befindet sich auf jeder Ebene eine Öffnung, welche den Zugang zwischen zwei Parkdecks darstellen soll. Über diese Öffnungen sollte es bei erfolgreicher Anwendung des Tiefflugsamplings und der oben beschriebenen Verfeinerungsmethode gelingen, einen Pfad durch das Parkhaus auf dessen Dach planen zu können. Das BILD 10 zeigt das initiale Tiefflugsampling und macht nochmals die beschriebene Funktionsweise deutlich. Das BILD 11 zeigt das Ergebnis der Verfeinerungsmethode gemäß den Anforderungen. Das BILD 12 zeigt einen geplanten Pfad vom Boden auf das Dach des Parkhauses auf Grundlage der Verfeinerungsmethode.

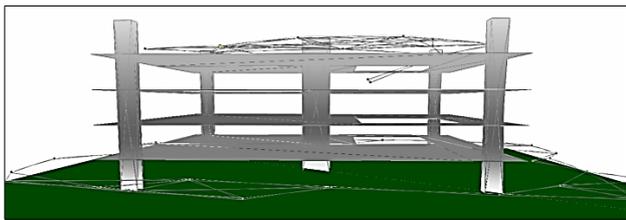


BILD 10: Wegegraph nach initialem Tiefflugsampling.

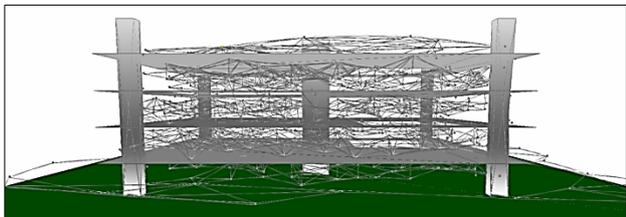


BILD 11: Wegegraph nach initialem Tiefflugsampling und Anwendung der beschriebenen Verfeinerungsmethode.

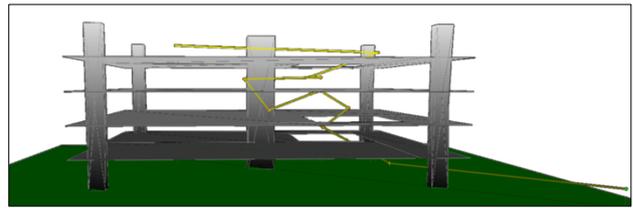


BILD 12: Ergebnis der Missionsplanung.

7. SAMPLING-VERFAHREN FÜR ÜBERHÄNGE IM TIEFFLUGGELÄNDE

Die Konstellation des erzeugten Wegegraphen ist bei der Verwendung des Tiefflugsamplings in besonderer Weise abhängig von der Anordnung der Hindernisse im Arbeitsraum. So kann es zum Beispiel bei hohen Hindernissen dazu kommen, dass keine Verbindungen zwischen den Wegpunkten am Boden und auf dem Hindernis existieren, da d_{max} überschritten werden würde (siehe BILD 13).

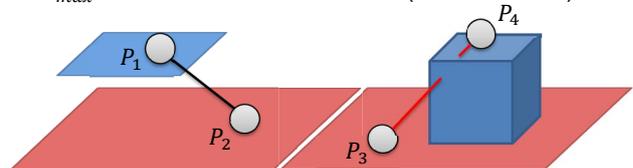


BILD 13: Ausgangsposition für die Verfeinerungsmethode.

Je nach Lage der Wegpunkte und des Höhenunterschieds zwischen Boden und Hindernisdach kann es auch zu den sogenannten verbotenen Kanten $\overline{P_3P_4}$ kommen, welche das Hindernis schneiden und somit für die Pfadplanung ausgeschlossen sind (siehe BILD 13 rechts). Im schlimmsten Fall führen die beiden Varianten dazu, dass kein Pfad auf das Hindernisdach existiert. Auf diesem besteht dann ein isolierter Teilgraph, welcher nicht erreicht werden kann. Das beschriebene Problem wirkt sich jedoch erst dann negativ auf die Pfadplanung aus, wenn durch die nicht bestehende Möglichkeit des Überfliegens von Hindernissen im Tiefflug die gesamte Mission gefährdet oder stark beeinträchtigt ist. So kann es zum Beispiel möglich sein, dass kein Pfad zwischen Start- und Zielpunkt gefunden werden kann. Auch könnte ein sich ergebender Umweg unnötig lang sein. Da jedoch eine Anforderung an den Tiefflug darin besteht, hohe Umwege durch Überfliegen von Hindernissen vermeiden zu können und durch die Missionsplanung immer ein Pfad geplant werden sollte, ist die Einführung einer weiteren Verfeinerungsmethode für das Tiefflugsampling sinnvoll. Das Ziel dieser Verfeinerungsmethode ist es, das Erklimmen von Hindernissen bei der Verwendung des Tiefflugsamplings zu ermöglichen. Sie ist so entworfen, dass die beiden Varianten gemäß BILD 13 berücksichtigt werden. Das Funktionsprinzip der Verfeinerungsmethode ist im BILD 14 schematisch dargestellt. Im ersten Fall (BILD 14 links) detektiert die Verfeinerungsmethode diejenigen Wegpunkte, welche bei Vernachlässigung ihrer Höheninformation benachbart wären und fügt entsprechende Hilfswegpunkte ein. Ist der Abstand $\overline{P_1P_2}$ zweier Wegpunkte P_1 und P_2 größer als der Nachbarschaftsradius d_{max} und befinden sich diese beiden Punkte nicht auf der gleichen Höhe, so wird der höher gelegene Punkt auf die Höhe des niedrigeren projiziert gemäß

$$(10) \vec{p}_{1,p} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_2 \end{pmatrix}.$$

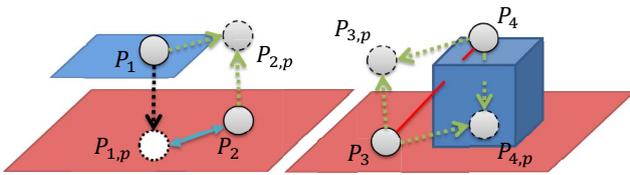


BILD 14: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der Verfeinerungsmethode.

Ist dann der Abstand $\overline{P_{1,p}P_2}$ kleiner gleich dem Nachbarschaftsradius d_{max} , so werden die Wegpunkte $P_{1,p}$ und $P_{2,p}$ gemäß Gleichung (10) und

$$(11) \vec{p}_{2,p} = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_1 \end{pmatrix}$$

als Hilfspunkte dem Wegegraphen hinzugefügt. Ist dabei der Abstand $\overline{P_2P_{2,p}}$ größer als der Nachbarschaftsradius d_{max} , werden wiederum zwischen den Wegpunkte P_2 und $P_{2,p}$ weitere Hilfspunkte so eingefügt, dass eine Verbindung zwischen diesen ermöglicht wird.

Im zweiten Fall (BILD 14 rechts) detektiert die Verfeinerungsmethode Kanten, welche Polygone schneiden. Dabei muss wiederum die Höhe der Wegpunkte P_3 und P_4 unterschiedlich sein. Daraufhin werden die Hilfspunkte $P_{3,p}$ und $P_{4,p}$ gemäß

$$(12) \vec{p}_{3,p} = \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_4 \end{pmatrix}$$

und

$$(13) \vec{p}_{4,p} = \begin{pmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_3 \end{pmatrix}$$

dem Wegegraphen hinzugefügt. Die Wegpunkte $P_{1,p}$ und $P_{4,p}$ und befinden sich unter bzw. in einem Hindernis und können als mögliche Anknüpfungspunkte zum Beispiel für die nachfolgende lokale Verfeinerungsmethode betrachtet werden. Nach erfolgreicher Durchführung der Verfeinerungsmethode müssen die erzeugten Wegpunkte noch mit dem ursprünglichen Wegegraphen verbunden werden. Das Ergebnis der Methode auf Grundlage des Tiefflugsamplings gemäß BILD 10 ist im BILD 15 dargestellt.

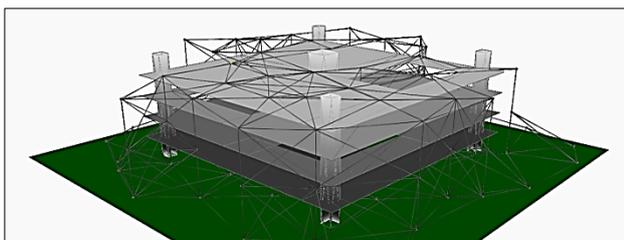


BILD 15: Wegegraph nach initialer Tiefflugsampling und Anwendung der beschriebenen Verfeinerungsmethode.

Deutlich zu erkennen ist eine Art Gerüst, welches durch die erzeugten Hilfspunkte entstanden ist und das Parkhaus bzw. die Hindernisstruktur umgibt. Somit wird eine Pfadplanung auf dessen Dach möglich, die bei der alleinigen Verwendung des Tiefflugsamplings aufgrund der Hindernishöhe ausgeschlossen ist.

8. WEITERE KOSTENKODIERUNGSASPEKTE

In diesem Abschnitt werden neue Missionsanforderungen und Kostenfunktionen zur Erweiterung des Missionsplaners definiert.

8.1. HOCHFLUG

Wird an die zu planende Route die Anforderung des Hochfluges gestellt, so soll sich ein Pfad ergeben, welcher entweder in einer zu definierenden Mindesthöhe h_{HFmin} über dem Hindernisprofil oder oberhalb einer georeferenten Höhe h_{min} liegt. Die Missionsanforderung des Hochfluges kann direkt aus dem entworfenen Tiefflug abgeleitet werden. Äquivalent zum Tiefflugband gemäß BILD 5 ergibt sich aus der konzeptionellen Idee ein Hochflugband, welches im BILD 16 dargestellt ist.

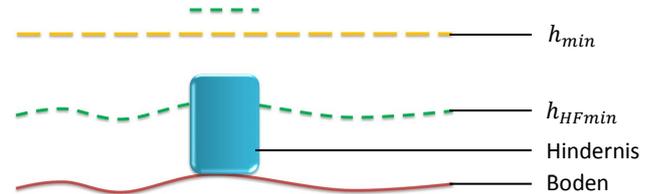


BILD 16: Hochflugband.

8.2. Pfad der kürzesten Flugdauer

Wird an die zu planende Route die Anforderung der kürzesten Flugdauer gestellt, so soll sich ein Pfad ergeben, welcher die schnellstmögliche Verbindung zwischen Start- und Zielpunkt darstellt. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass der schnellste nicht immer dem kürzesten Pfad entspricht. Dabei kommt es vor allem auf die Länge der einzelnen Teilstrecken an. Je länger einer Teilstrecke ist, desto länger kann das UAV diese mit maximaler Geschwindigkeit entlang fliegen. Je kürzer eine Teilstrecke ist, desto höher fallen die horizontalen Winkeländerungen $\Delta\theta$ zwischen den einzelnen Teilstrecken ins Gewicht (siehe BILD 17).

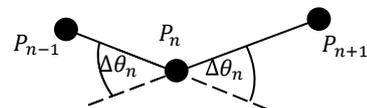


BILD 17: Teilstrecken mit Winkeländerung.

Einen weiteren Einfluss auf die benötigte Zeit für das Abfliegen einer Teilstrecke stellt deren Steigung, d.h. die Höhendifferenz zwischen Anfangs- und Endpunkt der Teilstrecke dar. Um die schnellste Route planen zu können, müssen den Kanten des Wegegraphen Kosten im Sinne der für den Flug entlang dieser Teilstrecke benötigten Zeit zugeteilt werden. Dabei sind die Winkeländerungen zwischen den einzelnen Teilstrecken nicht unerheblich. Zur Vereinfachung des beschreibenden Modells wird die nachträgliche Flugroutenglättung durch die Kosten-

funktion nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass das UAV die einzelnen Wegpunkte eines geplanten Pfades diskret anfliegt. Dabei ist die Geschwindigkeit bei Erreichen eines Wegpunktes bzw. bei Abflug von einem Wegpunkt gleich null. Das UAV beschleunigt danach auf der Verbindung zwischen zwei Wegpunkten wenn möglich bis zu seiner maximalen Geschwindigkeit und verzögert dann so, dass es bei Erreichen eines Wegpunktes wieder eine Geschwindigkeit gleich null besitzt. Am erreichten Wegpunkt dreht sich das UAV gemäß der Winkeländerung $\Delta\theta$ auf der Stelle und nimmt anschließend den Flug in Richtung des nächsten Wegpunktes im Pfad auf. Durch diese Annahmen, welche den schlimmsten zeitlichen Fall beschreiben, ist es möglich, die benötigten Flugzeiten ohne die Betrachtung der komplizierten geglätteten Flugbahn zu schätzen, welche bei der Pfadplanung ohnehin noch nicht existent ist. Die Kostenfunktion der kürzesten Flugdauer ergibt sich aus der Zeit $\tau_{ges,n}$, welche insgesamt für den Flug zwischen den Wegpunkten P_n und P_{n+1} benötigt wird. Diese setzt sich gemäß BILD 17 aus zwei Komponenten zusammen:

$$(14) \quad \tau_{ges,n} = \tau_{d,n} + \tau_{\Delta\theta,n}$$

Die Zeit $\tau_{d,n}$ entspricht dabei der für das Zurücklegen der Strecke $\overline{P_n P_{n+1}}$ benötigten Zeit. Die Zeit $\tau_{\Delta\theta,n}$ entspricht der Zeit, welche die an dem Wegpunkt P_n durchzuführende neue Ausrichtung des UAVs gemäß der Winkeländerung $\Delta\theta_n$ beschreibt. Die Winkeländerung $\Delta\theta_n$ ergibt sich mit der Schreibweise der Wegpunkte in Vektorform zu

$$(15) \quad \Delta\theta_n = \cos^{-1} \left(\frac{(\overline{p_n} - \overline{p_{n-1}}) \cdot (\overline{p_{n+1}} - \overline{p_n})}{|\overline{p_n} - \overline{p_{n-1}}| \cdot |\overline{p_{n+1}} - \overline{p_n}|} \right).$$

Um die Zeit $\tau_{ges,n}$ bestimmen zu können, müssen weiterhin folgende Parameter des UAVs bekannt sein: maximale Geschwindigkeit v_{max} , Beschleunigung a_1 , Verzögerung a_2 und die Zeit τ_{360} , welche das UAV auf der Stelle schwebend für eine Drehung um 360° um die eigene Achse benötigt. Mit $a_1 = a_2 = a$ gilt:

$$(16) \quad \tau_{d,n} = \frac{v_{max}}{a} + \frac{\overline{P_n P_{n+1}}}{v_{max}},$$

$$(17) \quad \tau_{\Delta\theta,n} = \frac{\Delta\theta_n}{2\pi} \tau_{360}.$$

Kann auf einer kurzen Teilstrecke v_{max} nicht erreicht werden, so gilt anstatt der Gleichung (16)

$$(18) \quad \tau_{d,n} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\overline{P_n P_{n+1}}}{a}}.$$

Dazu muss für jede Teilstrecke geprüft werden, ob diese lang genug ist, um auf v_{max} zu beschleunigen und entsprechend wieder zu verzögern.

8.3. Pfad des geringsten Energieverbrauchs

Wird an die zu planende Route die Anforderung des geringsten Energieverbrauchs gestellt, so soll sich ein Pfad ergeben, welcher die energiesparendste Verbindung zwischen Start- und Zielpunkt darstellt. Dazu kann man sich leicht überlegen, dass der Pfad des geringsten Energie-

verbrauchs wiederum ein relativ kurzer Pfad mit einer relativ geringen Flugdauer und weiterhin geringen Höhenänderungen sein wird. Die für den Flug entlang einer Teilstrecke $\overline{P_n P_{n+1}}$ benötigte Energie $E_{n,n+1}$ ergibt sich mit der zeitabhängigen Leistung $P(t)$ zu

$$(19) \quad E_{n,n+1} = \int_0^{\tau_{ges,n}} P(t) dt.$$

Die Zeit $\tau_{ges,n}$ entspricht mit den geltenden Vereinfachungen der für den Flug benötigten Gesamtzeit gemäß der Gleichung (14). Hieraus wird ersichtlich, dass die Kostenfunktion des geringsten Energieverbrauchs für die Ermittlung der benötigten Zeiten die Kostenfunktion der kürzesten Flugdauer benötigt. Dabei kann es notwendig sein, die maximale Geschwindigkeit des UAVs v_{max} auf eine energiesparende Maximalgeschwindigkeit v_{max}^E zu drosseln. Um den Energiebedarf für eine zu fliegende Teilstrecke abschätzen zu können, wird die vom UAV in jedem Zeitpunkt t aufgenommene Leistung $P(t)$ benötigt. Diese ist wiederum abhängig vom jeweiligen Flugmanöver und den dazu notwendigen Steuerbefehlen. Für die Bestimmung der Leistung $P(t)$ wird somit ein komplexes flugmechanisches Leistungsmodell benötigt, welches die aufgenommene Leistung anhand des zu erwartenden Flugverhaltens abschätzen kann. Um dies jedoch für eine näherungsweise Bestimmung zu vereinfachen, kann man davon ausgehen, dass die jeweils aufgenommene Leistung für die im Abschnitt 8.2 erwähnten Verhalten konstant ist. Es werden demnach folgende Parameter benötigt: Leistung P_{360} für eine vollständige Drehung um die eigene Achse, Leistung P_{a_1} für die Beschleunigung, Leistung P_{a_2} für die Verzögerung, Leistung $P_{v_{max}^E}$ für den konstanten Flug mit der Geschwindigkeit v_{max}^E . Die Energiebestimmung folgt dann aus der Multiplikation der Leistung mit der Zeit. Die benötigte Gesamtenergie ergibt sich aus der Summe der Einzelenergien für jedes Flugmanöver. Die für den Flug benötigte Energie hängt jedoch auch von äußeren Einflüssen ab. So hat zum Beispiel der Wind einen entscheidenden Einfluss auf das Flugverhalten. Somit wird die Leistung $P(t)$ zusätzlich abhängig von der Windrichtung und -stärke. Dies muss im erwähnten flugmechanischen Leistungsmodell entsprechend berücksichtigt werden. Um den Einfluss des Windes unter den stark vereinfachten Bedingungen berücksichtigen zu können, ist die Einführung eines sogenannten Windvektors \vec{w} sinnvoll, dessen Betrag und Richtung gerade der Windstärke und Windrichtung entsprechen. Zur weiteren Vereinfachung soll der Windvektor für das gesamte Weltmodell gleichermaßen gelten und zeitlich konstant bleiben. Dieser muss vor der Missionsplanung bekannt sein und kann der im Zeitraum der Missionsdurchführung zu erwartenden mittleren Windstärke und -richtung entsprechen. Je nach Bewegung des UAVs im Verhältnis zur Richtung des Windvektors entstehen zusätzliche Kosten. Diese betragen im günstigsten Fall, nämlich der Bewegung des UAVs in Richtung des Windvektors, gleich null. Im Fall der Bewegung entgegengesetzt zur Windrichtung sind die zusätzlichen Kosten in Abhängigkeit von der Windstärke gerade maximal. Der Winkel ψ soll hier den Winkel zwischen dem Vektor $\overline{P_n P_{n+1}}$ und dem Windvektor \vec{w} beschreiben. Im Fall $\psi = \pi$ ist die Windrichtung antiparallel zur Flugrichtung, im Fall $\psi = 0$ ist diese parallel. Mit diesen Überlegungen ergibt sich die Skalierung k_w^E der windabhängigen Zusatzkosten für den energiesparendsten Pfad zu

$$(20) \quad k_w^E = \begin{cases} \frac{\psi}{\pi} & \text{für } 0 \leq \psi \leq \pi \\ \frac{2\pi - \psi}{\pi} & \text{für } \pi < \psi \leq 2\pi \end{cases}$$

Eine Möglichkeit, die zusätzlichen Windkosten mit in die Kostenfunktion des geringsten Energieverbrauchs aufzunehmen, besteht darin, den Energieverbrauch $E_{ges,n}$ ohne Einfluss des Windes um einen entsprechend skalierten Energieverbrauch zu erhöhen:

$$(21) \quad cost_E(P_n, P_{n+1}) = E_{ges,n} \cdot (1 + k_w^E \cdot k_{|\vec{w}|})$$

Dabei stellt $k_{|\vec{w}|}$ einen weiteren Skalierungsfaktor in Abhängigkeit von der Windstärke $|\vec{w}|$ dar.

8.4. Pfad des geringsten Risikos

Wird an die zu planende Route die Anforderung des geringsten Risikos gestellt, so soll sich ein Pfad ergeben, welcher das Risiko auf der Verbindung zwischen Start- und Zielpunkt minimiert. Dazu ist zunächst eine Definition des abstrakten Risikobegriffes notwendig. Dieser folgt aus der Einführung von sogenannten Risikosektoren bzw. Gefahrenzonen (siehe BILD 18).

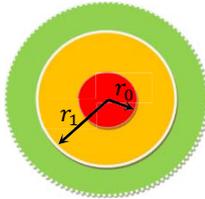


BILD 18: Definition einer Gefahrenzone; Draufsicht.

Eine solche Gefahrenzone besteht aus einem zentralen Bereich in dem die risikobehafteten Kosten gerade maximal sind ($0 \leq r \leq r_0$). Außerhalb dieses zentralen Bereichs ($r_0 < r \leq r_1$) nehmen die Kosten über den sogenannten Kostenradius r quadratisch bis auf null ab. Dieser Zusammenhang wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$(22) \quad cost_R = \begin{cases} cost_{R,max} & \text{für } 0 \leq r \leq r_0 \\ cost_{R,max} \cdot \left(\frac{r - r_1}{r_0 - r_1}\right)^2 & \text{für } r_0 < r \leq r_1 \\ 0 & \text{für } r > r_1 \end{cases}$$

Die Gefahrenzonen müssen im Vorfeld der Missionsplanung bekannt sein und dürfen sich im zeitlichen Verlauf der Missionsausführung nicht ändern. Bei sogenannten statischen Gefahrenzonen handelt es sich z. B. um Sektoren mit einem lokal begrenzten, hohen Aufkommen an dynamischen Hindernissen (z. B. Versammlung einer großen Menschenmenge auf dem Marktplatz). Weiterhin kann es sich um Sperrgebiete handeln, welche nicht überflogen werden dürfen (z. B. Krankenhäuser) bzw. in deren Luftraum nicht eingedrungen werden darf (z. B. Flughäfen). Ein Eindringen in den unerwünschten oder gar verbotenen Luftraum ist verbunden mit maximalen risikobehafteten Kosten. Im Notfall ist dies dennoch erlaubt, z. B. zum schnellstmöglichen Ausweichen. Neben den hier betrachteten statischen Gefahrenzonen lassen sich auch dynamische Gefahrenzonen definieren (z. B. andere Flugobjekte). Da die Kostenfunktion des geringsten Risikos lediglich

den Abstand des UAVs vom Mittelpunkt der definierten Gefahrenzonen bewertet, muss diese Kostenfunktion eine weitere als Grundlage besitzen, beispielsweise die Kostenfunktion des kürzesten Weges. Demnach würde der kürzeste Pfad unter Beachtung der definierten Risikosektoren geplant werden. Die Kostenfunktion des geringsten Risikos müsste lediglich die Entfernung des aktuell betrachteten Wegpunktes zu allen in einem Risikovektor gespeicherten Koordinaten unter Beachtung der entsprechenden Kostenradien bestimmen und entsprechend Kosten zuteilen. Die Kostenfunktion gewichtet demnach die als Grundlage gewählte Kostenfunktion ähnlich der Gleichung (21).

8.5. Pfad der größten Heimlichkeit

Wird an die zu planende Route die Anforderung der größten Heimlichkeit gestellt, so soll sich ein Pfad ergeben, welcher auf einer Verbindung zwischen Start- und Zielpunkt gegenüber zu definierenden Gefahrenbereichen innerhalb der Welt geringste Aufmerksamkeit erregt. So kann es aus Gründen der Missionsanforderungen notwendig sein, relativ nah am Gefahrenbereich vorbeizufiegen oder sich einem Bereich anzunähern und dabei nicht bzw. möglichst spät von diesem entdeckt zu werden. Um dies zu ermöglichen, soll unter anderem der Flug in offenem Terrain vermieden und die vorhandene Hinderniskulisse geschickt zur Deckung ausgenutzt werden (siehe BILD 19). Im besten Fall soll zu keiner Zeit eine direkte Sichtverbindung zwischen UAV und dem Gefahrenbereich bestehen. Dies kann in einfacher Weise mit Hilfe des bekannten Kollisionstests überprüft werden.

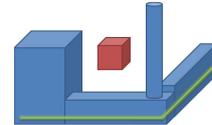


BILD 19: Darstellung eines Pfades der größten Heimlichkeit. Grün: geplanter Pfad, blau: für die Deckung zur Verfügung stehende Hindernisse, rot: Bereich gegenüber dem geringste Aufmerksamkeit erregt werden soll.

Sind in einem Bereichsvektor die Ausmaße aller Gefahrenbereiche gespeichert, gegenüber denen geringste Aufmerksamkeit erregt werden soll, so müsste die Kostenfunktion lediglich prüfen, ob sich ein aktuell betrachteter Wegpunkt auf einer direkten Sichtverbindung zu einem der Gefahrenbereiche befindet und entsprechend hohe Kosten zuteilen. Weiterhin ist es sinnvoll, den aus Abschnitt 8.3. eingeführten Windvektor \vec{w} zu nutzen. Die Ausnutzung des Windes für die Planung des Pfades der größten Heimlichkeit ermöglicht eine Minderung der wahrnehmbaren Fluggeräusche des UAV. Die Skalierung k_w^H der windabhängigen Zusatzkosten für den Pfad der größten Heimlichkeit ergibt sich zu

$$(23) \quad k_w^H = \begin{cases} \frac{\pi - \psi}{\pi} & \text{für } 0 \leq \psi \leq \pi \\ \frac{-\pi + \psi}{\pi} & \text{für } \pi < \psi \leq 2\pi \end{cases}$$

Die Gleichung (23) gilt in dieser Form allerdings nur, wenn sich das UAV auf das Zentrum eines Gefahrenbereiches zubewegt. Bei der Betrachtung der Bewegungsrichtung gegenüber der Windrichtung muss die relative Lage der

Gefahrenbereiche berücksichtigt werden. Der Skalierungsfaktor k_w^H ist zusätzlich abhängig von dem Winkel ξ zwischen der Bewegungsrichtung und der Lage der Gefahrenzone. Für $\xi = 0$ und $\xi = 2\pi$ gilt Gleichung (23). Für $\xi = \pi$ gilt gerade der Ausdruck $1 - k_w^H$. Weiterhin gelten maximale Kosten für $\xi = \psi$ und minimale Kosten für $\xi - \psi = \pm\pi$. Diese Abhängigkeiten lassen sich mit Hilfe eines verschobenen und skalierten Kosinus ausdrücken. Damit gilt für k_w^H in Abhängigkeit von den Winkeln ψ und ξ

$$(24) \quad k_w^H = \frac{1}{2}(\cos(\xi - \psi) + 1) .$$

Bei mehreren Gefahrenzonen erhöht sich entsprechend die Komplexität der Abhängigkeit, sodass auch die Entfernung zu den einzelnen Gefahrenbereichen eine Rolle spielt. Weiterhin ist die Einbeziehung des Sonnenstandes als weitere wetterabhängige Größe sinnvoll.

8.6. Pfad der direkten Sichtverbindung

Wird an die zu planende Route die Anforderung einer direkten Sichtverbindung gestellt, so soll sich ein Pfad ergeben, bei dem das UAV zu jedem Zeitpunkt eine direkte Sichtverbindung zu einem definierten Ort besitzt. Zum Beispiel kann es notwendig sein, eine direkte Sichtverbindung zur Bodenstation zu besitzen. Im BILD 20 ist der von einer Bodenstation ausgehende Sichtbarkeitsbereich mit der maximalen Sichtweite r_{max} dargestellt.

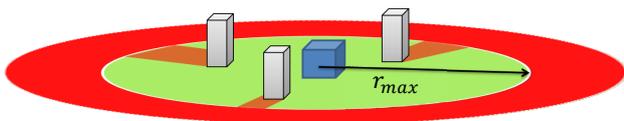


BILD 20: Schematische Darstellung des Sichtbarkeitsbereiches. Blau: Bodenstation, grün: Sichtbarkeitsbereich, rot: Bereich ohne direkte Sichtverbindung.

Alle Orte, welche weiter als r_{max} von der Bodenstation entfernt sind, liegen außerhalb des Sichtbarkeitsbereiches. Im Fall des dreidimensionalen Weltmodells handelt es sich um eine Sichtbarkeitssphäre. Aufgrund von Hindernissen innerhalb des Sichtbarkeitsbereiches entstehen sogenannte Abschattungen, in denen ebenfalls keine direkte Sichtverbindung zum UAV existiert. Die Kostenfunktion der direkten Sichtverbindung prüft in einem ersten Schritt, ob der Abstand zwischen dem aktuell betrachteten Wegpunkt und der Bodenstation kleiner gleich der maximalen Sichtweite r_{max} ist. In einem zweiten Schritt wird mit Hilfe des bekannten Kollisionstests auf eine kollisionsfreie Verbindung geprüft. Ist eine der beiden Bedingungen nicht erfüllt, so teilt die Kostenfunktion entsprechend hohe Kosten zu, da ein Flug entlang dieser verbotenen Bereiche nicht erlaubt ist. Die Kostenfunktion der direkten Sichtverbindung benötigt wiederum eine Kostenfunktion als Grundlage, da lediglich die Position relativ zur Bodenstation bewertet wird. Zwischen jedem Wegpunkt des geplanten Pfades und der Bodenstation besteht nach der Pfadplanung eine hindernisfreie Verbindung. In [8] wird ein ähnlicher Sichtbarkeitsbereich eingeführt, um, ausgehend von einem bestimmten Referenzpunkt, alle möglichen Orte beschreiben zu können, welche bestimmten Ansprüchen genügen. In [8] sind dies die Orte, von denen aus der Referenzpunkt mit einer ausreichenden Auflösung

fotografiert werden kann.

9. Kombination vom Kostenfunktionen

In den vorherigen Abschnitten ist bereits deutlich geworden, dass einige Kostenfunktionen eine Kombination mit einer geeigneten anderen Kostenfunktion als Grundlage benötigen. Aus dieser Überlegung folgt gleichzeitig die Forderung nach einer Kategorisierung (siehe Abschnitt 10.). Dabei müssen im Allgemeinen zwei Fälle unterschieden werden. Soll zum Beispiel eine Mission aus mehreren kombinierten Missionsanforderungen bestehen, so müssen die einzelnen Anforderungen, welche durch die jeweiligen Kostenfunktionen kodiert sind, miteinander kombiniert werden. Da in der Regel nicht alle Anforderungen gleichzeitig optimal erfüllt werden können, ist die Einführung eines sogenannten Toleranzbereiches sinnvoll. Dieser bewertet z. B. die Kombination auf Grundlage der gewichteten Summe einzelner Kostenfunktionen und entscheidet, ob und in welcher Weise diese den Anforderungen gerecht wird. Bei der Verwendung dieser gewichteten Summe ist allerdings darauf zu achten, dass die Kosten der einzelnen Kostenfunktionen entsprechend normiert sind. Neben der Verwendung von kombinierten Anforderungen für die gesamte Mission ist es denkbar, einzelne Teilmissionen mit unterschiedlichen Missionsanforderungen zu versehen. Einzelne Missionsanforderungen werden demnach lokal begrenzt anwendbar. So kann zum Beispiel der Anflug im Tiefflug stattfinden und der weitere Verlauf der Mission mit dem Pfad der kürzesten Flugdauer. Dabei ist es notwendig, dass die Pfadplanung lokal begrenzt mit der jeweiligen Kostenfunktion, welche zudem noch mit anderen kombinierbar ist, durchgeführt werden kann. Eine weitere elegante Möglichkeit besteht darin, ein ganzes Repertoire an parallel verfügbaren, mit unterschiedlichen Kostenfunktionen geplanten Pfaden vorzuhalten, welche, je nach (lokalem) Bedarf, abgerufen werden können und entsprechend Anwendung finden.

10. Kategorisierung

In diesem Abschnitt sollen Möglichkeiten zur Kategorisierung vorgestellt werden. Aus der Beschreibung der Kostenfunktionen ist bereits mehrfach deutlich geworden, dass gewisse Unterschiede bestehen. So existieren Kostenfunktionen, welche wiederum andere als Grundlage benötigen. Dazu werden zwei Begriffe eingeführt, welche genau diese Abhängigkeit ausdrücken sollen: Flugmodus und Missionsmodus. Gehört eine Kostenfunktion zum Flugmodus, so kann mit deren Hilfe ein Pfad geplant werden. Die Kostenfunktion beschreibt dann gemäß den Missionsanforderungen, auf welchem Wege (z. B. dem kürzesten, schnellsten oder energiesparendsten) das Ziel erreicht wird. Gehört eine Kostenfunktion zum Missionsmodus, so benötigt diese eine Kostenfunktion aus dem Flugmodus als Grundlage. Diese Kostenfunktion des Missionsmodus optimiert dann die gewählte Kostenfunktion aus dem Flugmodus hinsichtlich der Erfüllung eines globalen Missionsziels (z. B. schnellster Pfad unter Vermeidung von Risikosektoren). Weiterhin ist es sinnvoll, die Kostenfunktionen danach zu unterscheiden, wie oder durch was eine Kostenbeeinflussung zu Stande kommt. So gibt es klassische Kostenfunktionen, welche auf Grundlage der Kanten des Wegegraphen Kosten zuteilen. Die Kante enthält dann ortsfeste Informationen für die durch sie entstehenden Kosten. Weiterhin können Kosten durch den Aufenthalt in der Nähe von entsprechend gela-

belten Polygonen oder Volumen entstehen. Vergleichbare Kosten können auch in Bezug auf einen definierten Punkt im Weltmodell entstehen, welcher ortsfeste, kostenbeeinflussende Informationen kodiert. Mit der Einführung orts-unabhängiger Parameter, wie zum Beispiel dem Wind und dem Sonnenstand, resultiert eine globale Kostenbeeinflussung. Eine Kostenfunktion ist demnach nach den in TAB. 1 zusammengefassten Aspekten zu kategorisieren, wobei sich eine Unterscheidung zwischen Flug- bzw. Missionsmodus und der Kostenbeeinflussung ergibt.

Modus	
Flugmodus	kodiert die Eigenschaften des Fliegens
Missionsmodus	kodiert globales Missionsziel, benötigt Grundlage aus Flugmodus

Kostenbeeinflussung	
klassisch über Kanten des Wegegraphen	Graphenkante enthält ortsfeste Informationen für Kosten
lokal	
Labeling von Polygonen oder Volumen	ortsabhängige Informationen, Aufenthalt in der Nähe verursacht Kosten
„markierte“ Wegpunkte	
global	orts(un)abhängige Parameter bewirken Kosten

TAB. 1: Kategorisierungsaspekte.

11. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zeigt Ansätze für die Erweiterung der Fähigkeiten der Missionsplanung eines autonomen Helikopters, sowie die Formulierung UAV-typischer Missionsanforderungen. Weiterhin werden Ansatzpunkte zur Formalisierung und Kodierung von Missionszielen aufgearbeitet, sodass letztendlich eine Kategorisierung von Kostenfunktionen stattfinden kann und der Missionsplaner dazu befähigt wird, auch höhere bzw. komplexere Missionsziele berücksichtigen zu können. Die Missionsanforderung des Tieffluges dient dabei als illustratives Beispiel. Die Implementierung des Tieffluges hat gezeigt, dass die Missionsanforderungen nicht immer allein mit Hilfe einer Kostenfunktion umsetzbar sind. So kann in Abhängigkeit von den Anforderungen ein gezieltes Vorbereiten der Welt notwendig und zweckmäßig sein, z. B. durch Anpassung des Samplings. Weiterhin zeigt sich der Vorteil der sampling-basierten Suchgraph-Algorithmen, sodass sich deren Verwendung als sinnvoll bestätigt. Da jedem Wegpunkt und jeder Kante Informationen zugewiesen werden können, kann so ein a priori Wissen gezielt mit in die Missionsplanung einbezogen werden. Hinzu kommt die wesentliche Erkenntnis, dass die Formulierung von Missionszielen auf quasi-orthogonalen Achsen durchgeführt werden kann. Dabei ist eine Priorisierung zweckmäßig. So sollte nach Möglichkeit zunächst eine geschickte Anpassung des Samplings erfolgen, bevor über die Kanten des Wegegraphen oder gar die Heuristik kodiert wird. Weiterhin hat sich gezeigt, dass eine Möglichkeit, Kostenfunktionen miteinander kombinieren zu können, notwendig ist. Einige Kostenfunktionen benötigen wiederum geeignete Kostenfunktionen als Grundlage, wodurch sich ein spezieller Aspekt der Kategorisierung ergibt. Bei der Kombination von Kostenfunktionen muss zwischen Missionen, welche

aus mehreren kombinierten Anforderungen bestehen und Missionen, welche aus Teilmissionen mit jeweils anderen Anforderungen bestehen, unterschieden werden. Die entworfenen Kostenfunktionen haben einen direkten Einfluss auf den geplanten Pfad und damit auf die geplante Flugroute. Werden spezielle Anforderungen an eine Mission gestellt, so ist es notwendig, verschiedene Kostenfunktionen verwenden zu können, um gerade diesen Anforderungen gerecht zu werden. Je nach Art der gestellten Missionsanforderungen ergeben sich demnach verschiedene Kostenfunktionen bzw. Kombinationen derer mit denen ein Suchalgorithmus eine Route planen kann, welche die Missionsanforderungen erfüllt. Die entworfenen Kostenfunktionen stellen gerade die Fähigkeit dar, auf der Grundlage von verschiedensten möglichen Missionsanforderungen Pfade planen zu können, die gerade den gestellten Anforderungen gerecht werden. Der Missionsplaner wird somit mit der Berücksichtigung höherer Missionsziele zu mehr befähigt, wodurch die operationale Einsetzbarkeit des UAVs erheblich gesteigert wird. Ein großer Vorteil der gezeigten Ansätze besteht darin, dass diese, obwohl sie vor dem Hintergrund eines Hubschrauber-UAVs entworfen wurden, unabhängig von der Art des eingesetzten UAVs anwendbar sind. Hinzu kommt, dass die Ansätze ohne Einschränkungen auf alle Sampling-basierten Pfadplaner übertragbar sind.

Referenzen

- [1] S. M. LaValle, Planning Algorithms, Cambridge University Press, Cambridge, 2006
- [2] F. Adolf, A. Langer, L. de Melo Pontes e Silva, F. Thielecke, Probabilistic Roadmaps and Ant Colony Optimization for UAV Mission Planning, 6th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Toulouse, 2007
- [3] F.-M. Adolf, F. Andert, J. G. Furlan Rocha, Rapid Online Path Planning Onboard a VTOL UAV, AIAA InfoTech at Aerospace, Atlanta, GA, 2010
- [4] S. M. LaValle, M. S. Branicky, S. R. Lindemann, On the Relationship Between Classical Grid Search and Probabilistic Roadmaps, The International Journal of Robotics Research, Vol. 23, No. 7-8, 2004
- [5] M. S. Branicky, S. M. LaValle, K. Olson, L. Yang, Quasi-Randomized Path Planning, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001
- [6] P. E. Hart, N. J. Nilsson, B. Raphael, A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetic, Vol. 4, No. 2, 1968
- [7] A. Stentz, Optimal and Efficient Path Planning for Partially-known Environments, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 4, 1994
- [8] P. Oberlin, S. Darbha, Sampling-Based Roadmap Methods for a Visual Reconnaissance UAV, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Toronto, 2010