

OPTIMALE KREISBAHN UND HÖHE ZUR BEOBACHTUNG EINES FIXPUNKTES BEI WIND

M. Hartmann*, N. Voget*, D. Moormann*

* RWTH Aachen University, Institut für Flugsystemdynamik, 52056 Aachen, Deutschland

Zusammenfassung

Um mit einem Tilt-Wing UAV bei einer stationären Beobachtung weiterhin im energieoptimalen Flugzustand zu fliegen, wird ein Kreis um den Beobachtungspunkt geflogen. Hierbei ist besonders die Wahl der Flughöhe wichtig, da zwar jederzeit das Beobachtungsobjekt vollständig sichtbar sein muss aber auch so niedrig geflogen wird, um eine hohe Auflösung zu ermöglichen. Zusätzlich muss der Radius für den Kreis festgelegt werden. Es zeigt sich, dass durch Verschiebung des Kreismittelpunktes gegenüber dem Beobachtungspunkt die Flughöhe verringert werden kann. Deshalb wird in diesem Paper ein Algorithmus zur Bestimmung der minimalen Flughöhe sowie des optimalen Kreismittelpunktes relativ zu einem Beobachtungspunkt vorgestellt. Hierbei wird der Radius der zu fliegenden Kreisbahn in einem ersten Schritt fest angenommen und die Flugeigenschaften und Flugbereichsgrenzen des genutzten Fluggerätes sowie die aktuellen Windbedingungen und die Charakteristik der Kamera und des Gimbals berücksichtigt. Der Algorithmus geht iterativ vor, wobei die Höhe des Fluggeräts so lange verringert wird, bis gerade noch eine dauerhafte Beobachtung des zu erfassenden Objekts möglich ist. Um diese Höhe weiter senken zu können, wird der Kreismittelpunkt relativ zum Beobachtungspunkt verschoben. Durch die Suche der Minimalhöhe wird eine maximale Auflösung ermöglicht.

Keywords

Energieeffizientes Fliegen; Kameraerfassung; UAV

1. EINLEITUNG UND MOTIVATION

Unbemannte Kippflügelflugzeuge (Tilt-Wing UAVs) kommen immer häufiger zum Einsatz, da sie die senkrechte Start- und Landefähigkeit von Multikoptern mit der Energieeffizienz und Reichweite von Flächenflugzeugen verbinden [1]. Sie eignen sich damit sowohl für großflächige Überwachungsmissionen, wie bei der Suche nach Vermissten [2], als auch für punktuelle Beobachtungsaufgaben, wie beispielsweise beim Verfolgen eines Autos [3–5]. Ein konkretes Anwendungsbeispiel findet sich im Forschungsprojekt autotech.agil [6], in dem unter anderem ein Digitaler Zwilling des Straßenverkehrs entwickelt wird. Dieser soll durch verschiedene Sensorquellen mit aktuellen Verkehrsdaten versorgt werden. Um ein möglichst vollständiges Bild des Straßenverkehrs erzeugen zu können, werden neben den Daten aus den Fahrzeugen auch Daten aus anderen Quellen, wie Verkehrskameras, verwendet. Allerdings ist eine lückenlose Bodeninfrastruktur mit Kameras in Städten schwer zu realisieren, sodass ergänzend das unbemannte Kippflügelfluggerät Neo, Info-Biene genannt, eingesetzt wird. Die Info-Biene kann vollautomatisch ausgesendet werden, um Lücken in der Abdeckung der Sensorinfrastruktur zu füllen oder auch einzelne Straßenzüge oder Kreuzungen zu beobachten, um beispielsweise bei Sperrungen oder Unfällen

die autonomen Fahrzeuge bei der Wegfindung zu unterstützen.

Bei stationären Beobachtungsaufgaben wie der Überwachung einer Kreuzung oder der Verfolgung eines langsam fahrenden Fahrzeugs ist es sinnvoll, dass die Info-Biene nicht stationär über dem Zielpunkt schwebt, sondern im Flächenflug den Zielpunkt umkreist. Denn so ist es der Info-Biene möglich, den Auftrieb durch die Tragfläche zu erzeugen und somit im Vergleich zum Schwebeflug deutlich energieeffizienter zu fliegen. Dadurch kann die Flugzeit und somit auch die Überwachungsdauer erhöht werden. Um auch im Flächenflug eine Erfassung des Zielpunkts zu ermöglichen, ist die Kamera in einem Gimbal montiert. Dieses Gimbal kann die Kamera so auslenken, dass diese stets auf den Zielpunkt gerichtet ist. Hierbei ist zu beachten, dass das Gimbal der Kamera nur eine begrenzte Schwenkung erlaubt, gleichzeitig beeinflussen Wind und Kreisradius den notwendigen Hängewinkel des Flugzeugs. Dadurch kann es zu Situationen kommen, in denen das Gimbal den Hängewinkel des Fliegers nicht ausgleichen kann und somit die Kamera nicht korrekt ausgerichtet werden kann. Deshalb liegt die Herausforderung für eine Beobachtung bei der optimalen Wahl von Flughöhe und Kreisbahn relativ zum Beobachtungspunkt unter Berücksichtigung aerodynamischer und sensorischer Randbedingungen.

Diese Arbeit stellt einen Algorithmus zur Bestimmung der minimal möglichen Flughöhe und der optimalen Positionierung des Kreismittelpunktes relativ zum Zielpunkt vor. Ziel ist es, für gegebene Windbedingungen, Fluggeräteparameter und Kameraeigenschaften eine Flugbahn zu ermitteln, die eine durchgehende Sicht auf das Beobachtungsobjekt gewährleistet, ohne die zulässigen Betriebsgrenzen des Flugzeugs zu überschreiten. Dafür wird in Abschnitt 2 anhand einiger geometrischen Betrachtung der Algorithmus hergeleitet. Basierend darauf wird in Abschnitt 3 eine Auswertung durchgeführt, bei der unterschiedliche Parameter variiert werden. Zum Abschluss werden in Abschnitt 4 die Ergebnisse zusammengefasst.

2. GEOMETRISCHE BETRACHTUNG

Ziel des Algorithmus ist die Bestimmung einer Kreisbahn, die es einem UAV ermöglicht, auch unter Windeinfluss eine permanente Beobachtung eines Beobachtungspunktes zu gewährleisten. Hierfür müssen der Radius R des Kreises, die Höhe H , in der das Fluggerät über dem Beobachtungspunkt fliegt, und die Position des Kreismittelpunkts berechnet werden. Eingangsparameter für die Berechnung sind die konstante aerodynamische Fluggeschwindigkeit V_A , die fluggerätspezifischen Werte für den maximalen Hängewinkel $\Phi_{\max}$ und den maximalen Gimbalwinkel $\rho_{\max}$ sowie der vorherrschende Wind. Um der geforderten Kreisbahn folgen zu können, benötigt das Fluggerät eine Querschleunigung. Diese wird bei Flächenflugzeugen durch das Kippen des Auftriebsvektors um den Hängewinkel Φ erzeugt. Der notwendige Winkel Φ für eine gegebene Kreisbahn ergibt sich aus der flugdynamischen Betrachtung wie sie in [7] beschrieben ist bei konstantem V_A aus der Gleichung

$$(1) \quad \tan(\Phi) = \frac{V_K^2}{g * R * \cos(\beta_W)}.$$

V_K beschreibt die aktuelle Geschwindigkeit gegenüber dem Boden und lässt sich mit der gewählten Fluggeschwindigkeit V_A und der Windgeschwindigkeit V_W errechnen. β_W beschreibt den Winkel zwischen der aktuellen Ausrichtung des Fluggeräts und der aktuellen Flugrichtung, daher ist er auch von V_A und V_W abhängig.

Für die folgenden Betrachtungen wird zunächst angenommen, dass Windstille herrscht. Mit dem berechneten Hängewinkel lässt sich die geometrische Darstellung in Abbildung 1 aufstellen. Das Fluggerät fliegt hier mit dem Hängewinkel Φ und dem Radius R um den Mittelpunkt M . Nun wird mithilfe des maximalen Gimbalwinkels $\rho_{\max}$ derjenige Bereich gesucht, den die Kamera erfassen kann. Im dargestellten Fall ist das Gimbal nicht in der Lage den Hängewinkel vollständig auszugleichen, sodass die Kamera nicht auf den Mittelpunkt ausgerichtet werden kann. Daher wird hier die Strecke s gesucht, die zwischen dem äußersten Punkt des Erfassungsbereichs E und dem Mit-

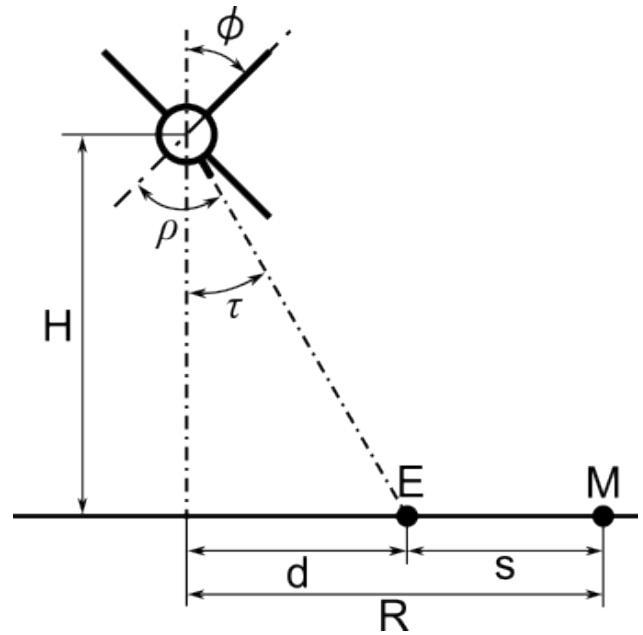


BILD 1. Grenze des Erfassungsbereichs bei hohem Hängewinkel

telpunkt M liegt. Für die Berechnung wird zuerst der Hilfswinkel

$$(2) \quad \tau = \rho_{\max} - \Phi$$

aufgestellt. Mit diesem Winkel und unter der Voraussetzung, dass die Höhe als bekannt angenommen wird, lässt sich nun die Strecke

$$(3) \quad d = H * \tan(\tau)$$

berechnen. Unter Verwendung von

$$(4) \quad s = d - R$$

lässt sich zum Schluss die Strecke zwischen dem Mittelpunkt und dem äußersten Erfassungspunkt ermitteln.

Wenn es dem Gimbal hingegen möglich ist, den Hängewinkel derart auszugleichen, dass die Kamera auf den Mittelpunkt ausgerichtet werden kann, ist derjenige Punkt gesucht, den die Kamera maximal hinter dem Mittelpunkt sehen kann. Dadurch lässt sich für beide Fälle der komplette Erfassungsbereich der Kamera beschreiben. Der zweite Fall ist in Abbildung 2 zu sehen.

Zusätzlich zur seitlichen Auslenkung des Gimbals kann dieses auch in Längsrichtung verschwenkt werden. Dadurch kann der Sichtbereich der Kamera nach vorne oder hinten aus Sicht des Fluggeräts verschoben werden. Dies ergibt einen flächigen Erfassungsbereich, dessen Grenze parallel zur Flugzeuglängsachse verläuft. In 3 ist dies für die dargestellte Flugzeugposition der schraffierte Bereich, also der gesamte Bereich oberhalb der Geraden mit dem Abstand s zum Mittelpunkt. Durch die Bewegung des Flugzeugs auf dem Kreis verändert sich der vom Fluggerät beobachtbare Bereich des Bodens ständig.

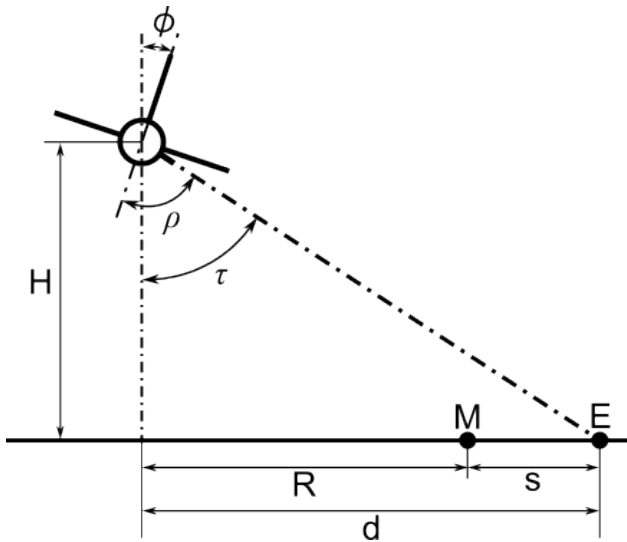


BILD 2. Grenze des Erfassungsbereichs bei niedrigem Hängewinkel

Die Schnittmenge der einzelnen Erfassungsbereiche für alle Punkte auf dem Kreis ergibt den dauerhaft beobachtbaren Bereich, der in Abbildung 3 kariert dargestellt ist. Im hier betrachteten Fall ohne Wind ergibt sich dieser Erfassungsbereich zu einem Kreis um den Mittelpunkt der Flugbahn.

Bei vorherrschendem Wind variieren bei konstanter aerodynamischer Geschwindigkeit sowohl die inertielle Fluggeschwindigkeit als auch der Vorhaltewinkel β_W über den Kreis. Gemäß (2) führt dies zu wechselnden Hängewinkeln, sodass auch die Erfassungsbereiche je nach Position auf dem Kreis unterschiedlich groß sind. Zusätzlich führt der Vorhaltewinkel dazu, dass das Fluggerät nicht mehr orthogonal zum Mittelpunkt ausgerichtet ist. Dadurch verformt sich der ständige Erfassungsbereich, sodass dieser nicht mehr durch einen Kreis beschreibbar ist. Um die nachfolgenden Berechnungen zu vereinfachen, werden im Folgenden Erfassungsbereiche nicht mehr als Gesamtfläche betrachtet. Stattdessen wird ausgenutzt, dass auch bei Wind der ständige Erfassungsbereich stets symmetrisch um diejenige Gerade ist, die orthogonal zur Windrichtung durch den Kreismittelpunkt verläuft. Dadurch kann die Betrachtung auf die Schnittmenge aus dieser Bezugsachse und dem jeweiligen Erfassungsbereich reduziert werden.

Um nun den Schnittpunkt zwischen dem Rand des Erfassungsbereichs und dieser gewählten Bezugsachse zu ermitteln, wird die in Abbildung 4 dargestellte Skizze betrachtet. Gesucht wird die Strecke s_{bezug} . Dafür müssen in einem ersten Schritt die Strecken x und z bestimmt werden, wobei sich x aus

$$(5) \quad x = d - l$$

ergibt. Die Strecken l und z bilden zusammen mit R ein Dreieck. Der Winkel zwischen R und l ist der gleiche wie der zwischen V_K und V_A und wird deshalb mit $-\beta_W$ beschrieben. Der Winkel zwischen z und

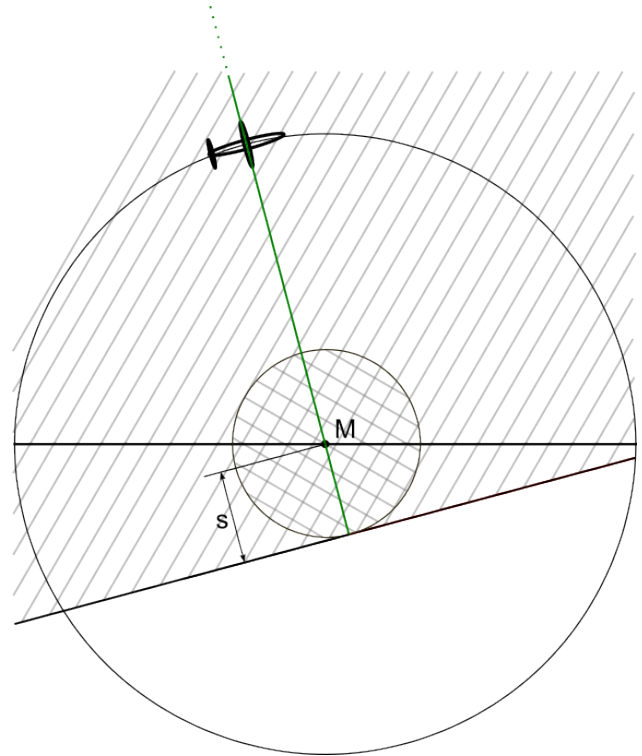


BILD 3. Durchgängig beobachtbarer Bereich bei Windstille

R beschreibt den Kurswinkel relativ zur Windrichtung $\chi' = \chi - \Psi_W$ und ist somit ebenfalls bekannt. Der letzte Winkel ζ im Dreieck ergibt sich dann aus

$$(6) \quad \zeta = \pi + \beta_W - \chi'.$$

Damit ergibt sich mit dem Sinussatz

$$(7) \quad l = \frac{R * \sin(\chi')}{\sin(\zeta)}$$

und

$$(8) \quad z = \frac{R * \sin(-\beta_W)}{\sin(\zeta)}.$$

Zuletzt wird noch der Winkel ξ benötigt. Dieser beschreibt den Winkel zwischen der Längsachse des Fluggeräts und der Orthogonalen zur Windrichtung und ergibt sich somit zu

$$(9) \quad \xi = \frac{\pi}{2} - \chi' + \beta_W.$$

Mit diesen geometrischen Größen lässt sich nun die neue Verschiebung entlang der Bezugsachse berechnen zu

$$(10) \quad s_{\text{bezug}} = \frac{x}{\sin(\xi)} - z.$$

In dem Fall, dass d kürzer als l ist, liegt der äußerste Erfassungspunkt E oberhalb der Bezugsachse, womit sich Abbildung 5 ergibt. Daraus folgt gemäß (5) ein negativer Wert für x und damit auch eine negati-

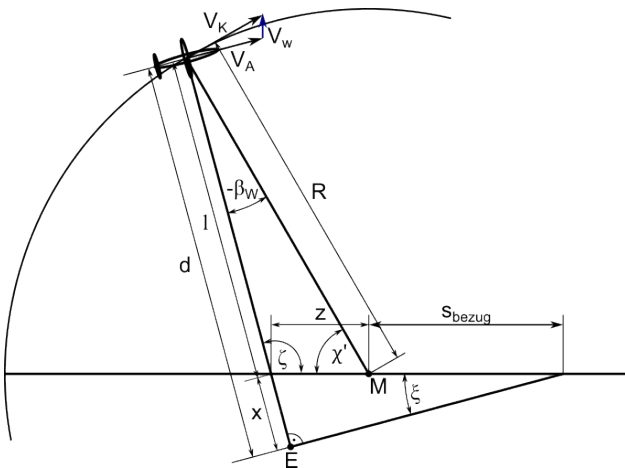


BILD 4. Bestimmung des Schnittpunkts der Grenze des Erfassungsbereichs mit der Bezugsachse

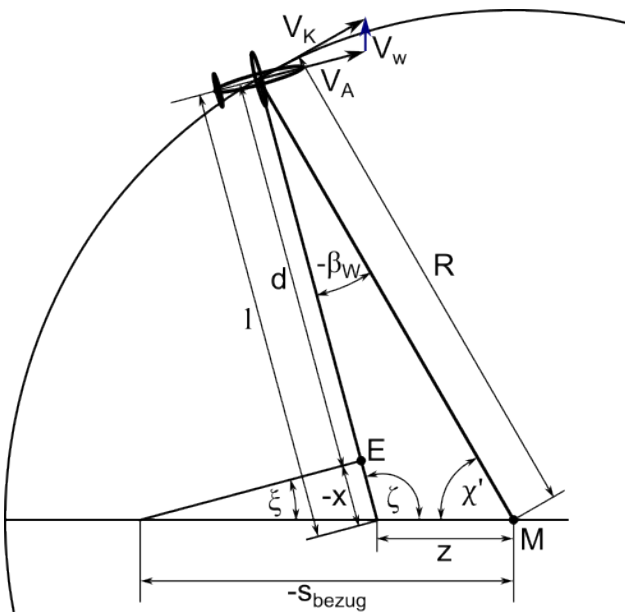


BILD 5. Bestimmung des Schnittpunkts der Grenze des Erfassungsbereichs mit der Bezugsachse bei kleinerem Erfassungsbereich

ve Verschiebung s_{bezug} , da die positive Richtung vom Kreismittelpunkt nach rechts laufend definiert ist. Hierbei ist zu beachten, dass s_{bezug} nur den Schnittpunkt der Erfassungsbereichsgrenze mit der Bezugsachse darstellt. Je nach Ausrichtung des Fluggeräts ist also der gesamte Teil der Bezugsachse links oder rechts von s_{bezug} im Erfassungsbereich der Kamera. Wie Abbildung 5 entnommen werden kann, ist es genau dann der linksseitige Teil, wenn $\zeta > \pi/2$. Wird für jede Position auf dem Kreis der entsprechende Wert für s_{bezug} berechnet, kann anschließend dasjenige Segment der Bezugsachse bestimmt werden, das während des gesamten Flugs im Beobachtungsbereich liegt.

Die Flughöhe H taucht nur in (3) explizit auf, sodass diese nur jeweils linearen Einfluss auf d , x und s_{bezug} hat. Durch diesen linearen Einfluss nimmt die Größe des globalen Erfassungsbereichs streng monoton mit der Höhe zu. Die niedrigste Flughöhe, bei der ein

Zielobjekt durchgängig beobachtet werden kann, ergibt sich also zu der Höhe, bei welcher der globale Erfassungsbereich zu einem Punkt degeneriert. Dieser Punkt liegt bei vorhandenem Wind allerdings nicht im Mittelpunkt des Kreises, sodass die Flugbahn entsprechend gegenüber dem zu beobachtenden Objekt verschoben werden muss.

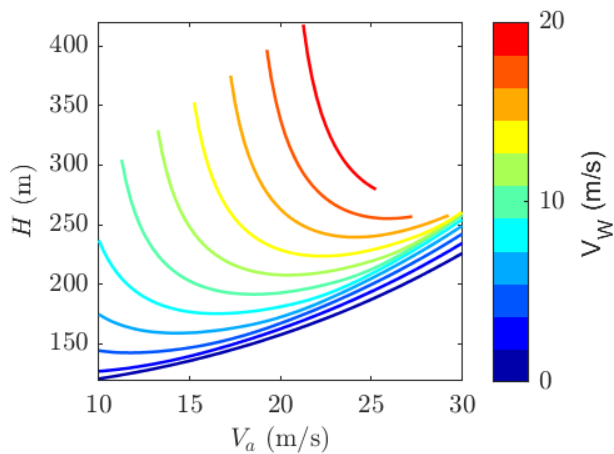
Bei vorgegebener aerodynamischer Fluggeschwindigkeit V_A und gegebenem Wind gibt es außer der Höhe nur noch den Kreisradius, der einen Einfluss auf die Größe des Erfassungsbereichs hat. Entsprechend hängt die minimal fliegbare Höhe ebenfalls vom gewählten Kreisradius ab.

3. AUSWERTUNG

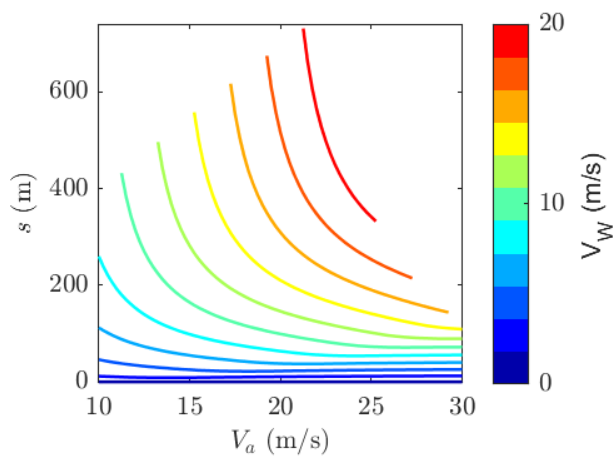
Im Folgenden wird untersucht, welchen Einfluss die Eingangsparameter Fluggeschwindigkeit, Windgeschwindigkeit und Kurvenradius auf die minimale Flughöhe und den notwendigen seitlichen Versatz haben. Für alle folgenden Berechnungen wird ein maximal erlaubter Hängewinkel $\Phi_{\text{max}} = 35^\circ$ und ein maximaler seitlicher Gimbalwinkel $\rho_{\text{max}} = 70^\circ$ angenommen. Für die erste Auswertung wurde die Fluggeschwindigkeit V_A variiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt. Die Berechnung findet für verschiedene Windgeschwindigkeiten statt, die in einer farbigen Skala aufgetragen sind. Der Radius wurde zu $R = 300$ m festgelegt.

In Abbildung 6a zeigt sich, dass bei einer gegebenen Windstärke die niedrigste Höhe immer dann erreicht wird, wenn die Fluggeschwindigkeit etwa 5–10 m/s über der Windgeschwindigkeit liegt. Unterhalb dieser Geschwindigkeit steigt der notwendige Vorhaltewinkel β_W , sodass gemäß (2) auch der Hängewinkel stark ansteigt. Dies resultiert in einer Verkleinerung des Sichtbereichs, wie beispielhaft in Abbildung 7 dargestellt ist. Dort ist für $R = 300$ m, $V_W = 10$ m/s und $H = 300$ m der Sichtbereich des Fluggeräts bei zwei unterschiedlichen Fluggeschwindigkeiten V_A dargestellt. Das Position des in positive y-Richtung fliegenden Fluggeräts ist als schwarzer Punkt dargestellt. Bei einer Fluggeschwindigkeit von $V_A = 13$ m/s ergibt sich ein Sichtbereich oberhalb der blau gestrichelten Linie. Der Schnittpunkt mit der Bezugsachse ist als blauer Punkt markiert und die Ausrichtung des Fluggeräts von der Markierung des Fluggeräts ausgehend als blauer Pfeil dargestellt. In Rot ist die gleiche Darstellung bei einer Fluggeschwindigkeit von $V_A = 17$ m/s eingezeichnet. Für Fluggeschwindigkeiten oberhalb des Tiefpunkts steigt Φ ebenfalls an, diesmal aber, da die mit V_A zunehmende Inertialgeschwindigkeit zu einem quadratischen Anstieg der benötigten Zentripetalbeschleunigung führt. Entsprechend verkleinert sich auch hier der Erfassungsbereich der Kamera.

Die notwendige Verschiebung zwischen Mittelpunkt und Beobachtungspunkt verhält sich bei niedrigen Fluggeschwindigkeiten ähnlich zur Höhe, wie in Abbildung 6b zu sehen ist. Sie steigt an, je näher V_A an V_W liegt. Im Gegensatz zur Höhe gibt es allerdings keinen starken Anstieg bei zunehmender Fluggeschwindigkeit.



(a) Minimale Flughöhe



(b) Mittelpunktverschiebung

BILD 6. Auswertung bei festem Radius von 300 m

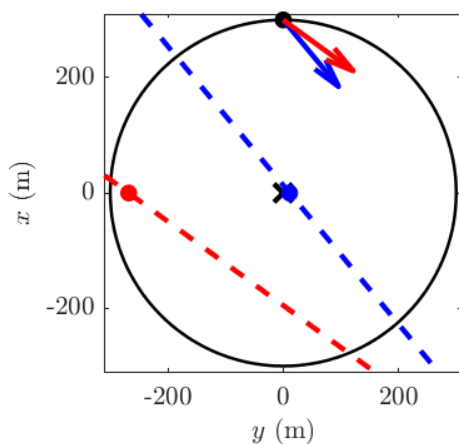
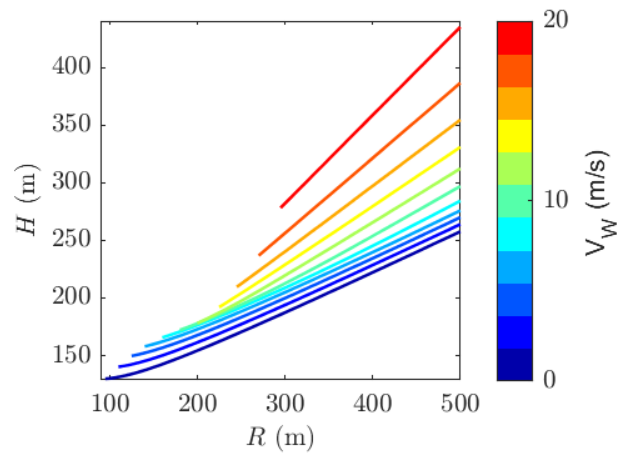
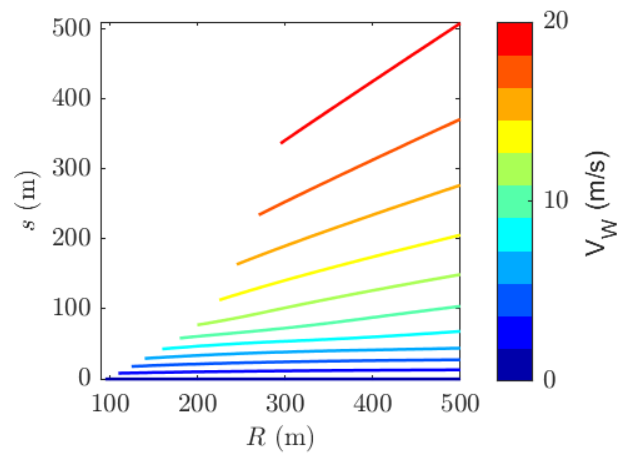


BILD 7. Erfassbarer Bereich für unterschiedliche Fluggeschwindigkeiten bei ansonsten gleichen Parametern



(a) Minimale Flughöhe



(b) Mittelpunktverschiebung

BILD 8. Auswertung bei fester Fluggeschwindigkeit $V_A = 25 \text{ m/s}$

keit, stattdessen sinkt die Verschiebung zunächst stark ab und bleibt danach nahezu konstant. Dies liegt daran, dass mit steigender aerodynamischer Fluggeschwindigkeit der Vorhaltewinkel gegen null geht und zusätzlich die inertialen Fluggeschwindigkeiten bei Rücken- und Gegenwind ähnlicher werden. Dadurch werden die Erfassungsbereiche entlang des Kreises symmetrischer, sodass der Schnittpunkt der Erfassungsbereichen in Richtung Kreismittelpunkt rückt.

Für eine weitere Auswertung wird der Radius variiert, auch hier wieder für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten. Die Fluggeschwindigkeit gegenüber Luft wird diesmal auf $V_A = 25 \text{ m/s}$ festgelegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 zu sehen. Wie besonders in Abbildung 8a zu sehen ist, ergibt sich bei kleinen Radien und hohen Winden keine Lösung. In diesen Fällen überschreitet der erforderliche Hängewinkel in mindestens einem Punkt des Kreises den maximal erlaubten Hängewinkel des Fluggeräts. Dadurch ist es dem Fluggerät nicht möglich, bei diesen Parametern einen Kreis zu fliegen. In der Abbildung ist auch zu erkennen, dass sich die minimale Höhe immer beim kleinstmöglichen Radius ergibt, unabhängig

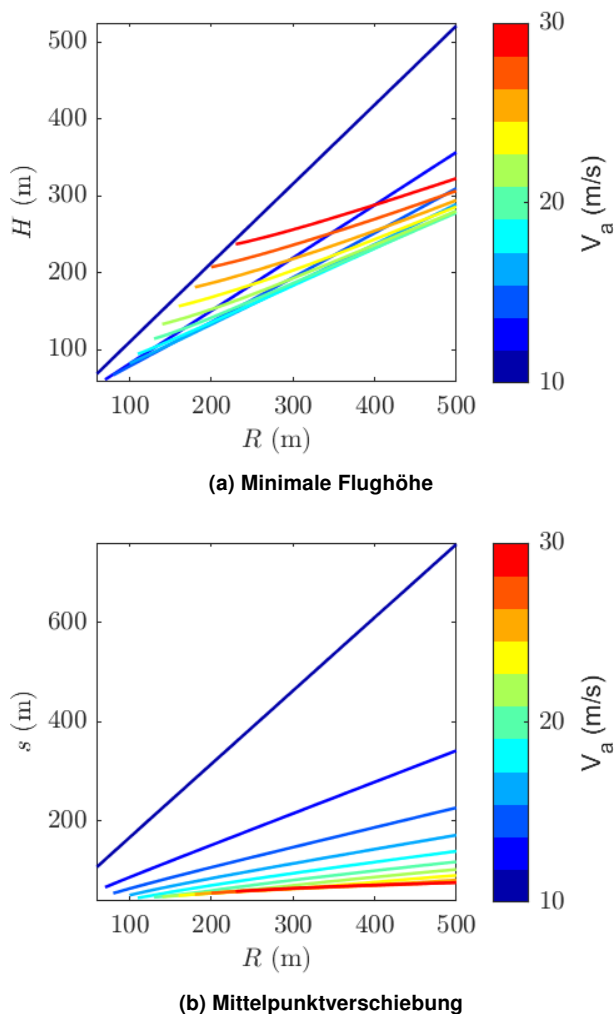


BILD 9. Auswertung bei fester Windgeschwindigkeit
 $V_W = 9 \text{ m/s}$

von der Windgeschwindigkeit. Eine höhere Windgeschwindigkeit resultiert immer auch in einem monotonen Anstieg der minimalen Flughöhe. Auch bei der Verschiebung gibt es den Zusammenhang, dass die niedrigste Verschiebung immer beim niedrigst möglichen Radius erreicht wird.

Zuletzt wird eine weitere Auswertung bei konstantem Wind durchgeführt. Der Wind wird dafür fest auf $V_W = 9 \text{ m/s}$ gesetzt. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildungen 9 dargestellt. Der abgebildete Verlauf entspricht den Erkenntnissen aus den bisherigen Abbildungen: Sowohl die Höhe als auch die Verschiebung steigen mit zunehmendem Radius. Die Überschneidung der Linien in Abbildung 9a entspricht dem zuvor diskutierten Verhalten, dass die Flughöhe sowohl bei Fluggeschwindigkeiten nahe der Windgeschwindigkeit als auch bei hohen Fluggeschwindigkeiten deutlich über der minimalen Flughöhe liegt. Auffällig ist, dass mit zunehmender Fluggeschwindigkeit der Einfluss des Radius auf Flughöhe und Verschiebung abnimmt. Dies lässt sich wie bei der Betrachtung von Abbildung 6b damit erklären, dass sich mit zunehmender Fluggeschwindigkeit die Zustände auf den verschiedenen Punkten

des Kreises annähern, sodass die Betrachtung sich dem windstillen Fall annähert.

4. FAZIT

In diesem Paper wurde vorgestellt, wie durch Verschiebung des Kreismittelpunktes auch bei Wind ein stationärer Punkt dauerhaft im Flächenflug beobachtet werden kann. Hierzu wurden Formeln aufgestellt, um den beobachtbaren Bereich in Abhängigkeit von Flug- und Windgeschwindigkeit, Kreisradius und Höhe zu berechnen. Wird die Höhe soweit verringert, bis der Beobachtungsbereich auf einen Punkt zusammen schrumpft, erhält man die Flugbahn, mit der die größte Bildauflösung erreicht werden kann. Die resultierende Verschiebung des Kreismittelpunktes gegenüber dem Beobachtungspunkt erfolgt dabei stets orthogonal zur Windrichtung. Bei der Auswertung der Flugbahnparameter für verschiedene Randbedingungen hat sich heraus gestellt, dass sich die beste Flugbahn immer dann ergibt, wenn der Radius so klein wie möglich gewählt wird. Zudem ergibt der Zusammenhang zwischen Fluggeschwindigkeit und minimaler Flughöhe eine konvexe Kurve, es gibt also einen eindeutigen Tiefpunkt, der merklich oberhalb der Windgeschwindigkeit liegt. Für Fluggeschwindigkeiten nahe der Windgeschwindigkeit steigt die benötigte Höhe stark an.

Kontaktadresse:

max.hartmann@fsd.rwth-aachen.de

Literatur

- [1] I. Colomina and P. Molina. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92:79–97, June 2014. ISSN: 0924-2716. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013).
- [2] Mingyang Lyu, Yibo Zhao, Chao Huang, and Hailong Huang. Unmanned aerial vehicles for search and rescue: A survey. *Remote Sens*, 15(13), 2023. DOI: [.org/10.3390/rs15133266](https://doi.org/10.3390/rs15133266).
- [3] Huiming Yin Liang Wang, Fangliang Chen. Detecting and tracking vehicles in traffic by unmanned aerial vehicles. *Automation in Construction*, 72, 2016. DOI: [.org/10.1016/j.autcon.2016.05.008](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.008).
- [4] Herath M. P. C. Jayaweera and Samer Hanoun. Path planning of unmanned aerial vehicles (uavs) in windy environments. *Drones*, 6(5), 2022. DOI: [.org/10.3390/drones6050101](https://doi.org/10.3390/drones6050101).
- [5] Winahyu Utomo, Putu Wisnu, Bhaskara, Arief Kurniawan, Susi Juniastuti, and Eko Mulyanto Yuniarno. Traffic congestion detection using fixed-wing unmanned aerial vehicle (uav) video streaming based on deep learning. In *2020 International Conference on Computer Engineering, Net-*

work and Intelligent Multimedia (CENIM 2020). IE-EE, 2020.

- [6] autotech.agil. <https://www.autotechagil.de/>. Accessed: 2025-02-25.
- [7] Rudolf Brockhaus, Wolfgang Alles, and Robert Luckner. *Flugregelung*. Springer-Verlag, 2011.