

VERFOLGUNG UND ORTUNG VON UNBEMANNTEN LUFTFAHRZEUGEN MIT ZIELVERFOLGENDEM TACHYMETER

F. Andert*, J. Dittrich

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

M. Becker, P. Hecker

Technische Universität Braunschweig
Institut für Flugführung
Hermann-Blenk-Str. 27, 38108 Braunschweig

Zusammenfassung

Unbemannte Luftfahrzeuge (UAVs) sind unter anderem für den Einsatz in Katastrophenszenarien interessant. Für zukünftige bodennahe Einsätze auch in unbekannten Gebieten untersucht und entwickelt das DLR gemeinsam mit der TU Braunschweig Technologien zur verbesserten Navigation unbemannter Luftfahrzeuge. Zur Bewertung der aktuellen und der in Entwicklung befindlichen Navigationsverfahren wird ein Referenzortungssystem eingesetzt, welches vom UAV und bei Flügen mit GNSS-Abschattung auch von Satellitennavigation unabhängig sein muss. Hierzu wird ein zielverfolgendes Tachymeter verwendet, welches die Position eines am UAV angebrachten Zielreflektors misst. Neuere Geräte wie das hier verwendete Leica Viva TS15 ermöglichen neben der automatischen Verfolgung von bewegten Zielen eine 3D-Positionsbestimmung im Zentimeterbereich, bei einer Abtastrate von nominell 6 Hz und bei Entfernungen zwischen Ziel und Tachymeter bis ca. 300 m. Die Positionsbestimmung ist auch dann möglich, wenn das UAV in einen Bereich mit eingeschränktem GNSS-Empfang fliegt. Bei den hier gezeigten Versuchen werden die Hubschrauber- und Quadroptor-UAV des DLR-Instituts für Flugsystemtechnik mit dem Tachymeter verfolgt und dabei verortet. Diese Daten werden mit gleichzeitig aufgenommenen GPS-Positionsdaten verglichen. Zusätzlich erfolgt beim Hubschrauber ein Vergleich zwischen zwei GPS-Empfängern.

1. EINLEITUNG

Die Führung unbemannter Luftfahrzeuge in geringen Flughöhen erfordert Technologien zur Ortung und Navigation, beispielsweise zur automatischen Kollisionsvermeidung oder zur Bestimmung von Zielpositionen aus dem Luftfahrzeug heraus. Eine bewährte Technik sind globale Satellitennavigationssysteme (GNSS), deren Einsatz in Bodennähe jedoch problematisch ist. In unmittelbarer Nähe von Gebäuden oder in engen Tälern und Schluchten ist die Gefahr von Abschattung und Reflexion der Satellitensignale sehr hoch, was im Idealfall und bei Detektion dieser Fehler nur die Präzision durch eine schlechte Geometrie der beobachteten Satelliten verschlechtert, jedoch oft zu einem Aussetzen der Positionsbestimmung oder zu falschen, vom System als gültig klassifizierten Messergebnissen führen kann. Hinzu kommen die im freien Gelände zu berücksichtigenden Fehler für Pseudorangemessungen. Üblicherweise werden einige dieser Nachteile durch hochpräzise Inertialplattformen (Navigation Grade IMUs) kompensiert. Diese Möglichkeit scheidet jedoch nach derzeitigem Stand der Technik aufgrund von Größe und Gewicht bei der

betrachteten Klasse von kleinen unbemannten Luftfahrzeugen aus.

Im Gelände und in der Nähe von Gebäuden ist eine präzise Ortung und damit sichere Führung von unbemannten Luftfahrzeugen erschwert. Zur Forschung an verbesserten Ortungsverfahren befasst sich diese Arbeit zunächst mit der Bewertung von GPS-Sensoren, die auch bei Mikrofliegern Anwendung finden. Dazu werden verschiedene GPS-Sensoren mit UAV-Versuchsträgern bewegt und die aufgezeichneten Bahnen miteinander verglichen. Weiterer Fokus der Arbeit ist die Bewertung der gemessenen Flugbahnen über ein externes und vom UAV unabhängiges Referenzsystem. Dabei kommt ein zielverfolgendes Tachymeter zum Einsatz, welches in Abschnitt 3 vorgestellt wird.

2. FLUGVERSUCHSTRÄGER

Für die Versuche werden die unbemannten *ARTIS*¹-Hubschrauber des DLR-Instituts für Flugsystemtechnik (Bild 1) sowie *Pelican*-Quadroptor der Firma Ascending Technologies GmbH (Bild 2) eingesetzt. In der Standardkonfiguration sind die Versuchsträger mit einem GPS-Empfänger zur Positionierung ausgestattet, wobei am *ARTIS*-Hubschrauber ein weiterer Empfänger für einen Vergleich montiert wird, siehe Abschnitt 4. Die

*Kontakt: Franz Andert, e-mail: franz.andert@dlr.de, Tel.: +49 (0)531 295 2678. Präsentiert auf dem 60. Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2011, Bremen, Deutschland.

¹Autonomous Rotorcraft Testbed for Intelligent Systems.

Bestimmung der Referenzposition von bewegten Objekten mit einem Tachymeter erfordert einen speziellen Retroreflektor, der an den Vehikeln möglichst aus vielen Perspektiven sichtbar befestigt wird. Weitere Informationen zum ARTIS-Versuchsträger und zu anderen Forschungsaktivitäten siehe [1].



BILD 1: ARTIS-Hubschrauber mit Leica-Reflektor. Rotordurchmesser 1,9 m, Abflugmasse bis 15 kg, Nutzlast 6 kg.

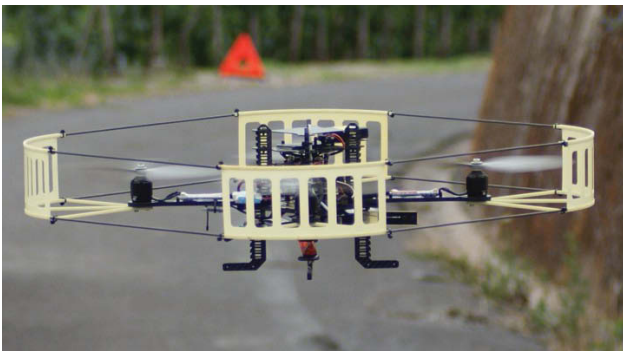


BILD 2: AscTec Pelican Quadrocopter. Größe 50 cm, Abflugmasse bis 2 kg, Nutzlast ca. 700 g.

3. DAS REFERENZORTUNGSSYSTEM

3.1. Übersicht

Zur Referenzortung sind am UAV befestigte oder externe Systeme geeignet, die unabhängig von den an Bord des Flugversuchsträgers verwendeten Geräten die Flugbahn vermessen. Zudem muss die Positionsbestimmung auch in Bereichen möglich sein, in denen das Luftfahrzeug selbst die Eigenposition nicht oder nur schlecht mit Hilfe von GNSS (GPS, Galileo etc.) bestimmen kann. Allgemein sind für solche Aufgaben bodengebundene Messsysteme wie Multikamerasysteme, Local Positioning Radar, Laser Tracker oder Theodoliten geeignet. Insbesondere zur Erfassung und Messung bewegter Objekte sind folgende Geräteklassen bereits im Einsatz zur Bahnvermessung von unbemannten Luftfahrzeugen:

1. *Stationäre Kinotheodoliten (KTH)*: Diese Winkelmeßgeräte (Azimut, Elevation) mit bildbasierter Objektverfolgung werden insbesondere zur Bahnvermessung bei größeren und hochfliegenden Luftfahrzeugen eingesetzt [2]. In diese Kategorie fallen stationäre Anlagen auf Versuchsflugplätzen (u. a. KTH-Messanlage der

WTD 61 in Manching) sowie bedingt transportable Geräte mit einigen 100 kg Masse. Bei einer rein winkelbasierten Positionsbestimmung durch eine Messanlage mit mehreren KTH sind keine zusätzlichen Anbauten am Luftfahrzeug erforderlich. Die Messgenauigkeit liegt bei diesen Anlagen im Dezimeterbereich, bei Reichweiten von einigen Kilometern. In Kombination mit Laser-Entfernungsmessern ist die Genauigkeit weiter erhöht, und es genügt eine Messstation. Vorteil sind Messungen auch bei großen Entfernungen, jedoch sind diese nur mit einem sehr hohen Aufwand durchzuführen.

2. *Mobile Koordinatenmessgeräte (KMG) und zielverfolgende Tachymeter*: Bei diesen von Hand tragbaren Geräten handelt es sich um eine Kombination von Theodolit zur Winkelbestimmung und Laser-Entfernungsmesser. Das Messprinzip ist mit den stationären Kinotheodoliten vergleichbar. Üblicherweise werden damit die 3D-Positionen von stationären oder bewegten Reflektoren vermessen, wobei die Hauptverwendungszwecke im Bereich von Geodäsie und Bauwesen liegen. Die Verwendung zur Vermessung von Flugbahnen insbesondere von schwebefähigen und bodennahen Luftfahrzeugen mit nicht allzu hohen Geschwindigkeiten ist bei Reichweiten zwischen ca. 300 m und 1000 m jedoch naheliegend (vgl. [3]), da die zur Messung verwendeten Reflektoren leicht am Luftfahrzeug zu montieren sind. Durch die Kombination der Messung von zwei Winkeln und der Schrägdistanz genügt ein einziges Gerät zur Verfolgung der Flugbahn, was den Versuchsaufbau vereinfacht. Die Verfolgung des Reflektors erfolgt bei den modernen Geräten automatisch, wobei Messungen der Reflektorposition im Millimeter- bis Zentimeterbereich mehrmals pro Sekunde durchgeführt werden. Weitere Analysen von zielverfolgenden Tachymetern und deren Genauigkeit siehe [5].

3. *Kamera-Tracking*: Zur Erfassung von schnellen Bewegungsabläufen existieren heute kommerzielle Multikamerasysteme (bspw. Vicon), wobei die gleichzeitige Vermessung vieler Zielmarken möglich ist. Die Kameras sind unbeweglich installiert und sehr genau kalibriert, womit der Hauptverwendungszweck im Innenbereich zu finden ist (z. B. Motion Capturing in Filmstudios). Eine Reihe von Forschern verwendet diese Technik auch zur Positionsbestimmung von Mikrofliegern (u. a. [6]), wobei die wesentlichen Vorteile eine sehr hohe Aktualisierungsrate von mehreren 100 Hz und eine Messgenauigkeit im Millimeterbereich oder besser sind. Darüber hinaus ermöglicht die Verfolgung mehrerer am Träger befestigter Zielmarken die gleichzeitige Messung der Lagewinkel, was bei den anderen beiden Systemen nicht ohne weiteres möglich ist. Aufgrund der geringen Reichweite und des hohen Kalibrieraufwandes sind Kamerasysteme jedoch nur unter hohem Aufwand für UAV-Außenversuche verwendbar.

3.2. Zielverfolgung mit Tachymeter

Zur Referenzortung der in Abschnitt 2 vorgestellten Flugversuchsträger wird das zielverfolgende Tachymeter Leica Viva TS15 (Bild 3) eingesetzt. Für die Laser-Entfernungsmessungen wird an den Versuchsträgern ein auf das Tachymeter abgestimmtes Reflektorprisma (360°-Miniprisma GRZ101) montiert, das bei entsprechender Sichtbarkeit eine Retroreflexion des Lasers aus allen Richtungen ermöglicht. Wesentliche Kennzahlen (Herstellerangaben nach [7]) für die automatische Zielverfolgung (ATR-Modus) mit dieser Kombination von Gerät und Prisma sind in Tabelle 1 gelistet. Daraus ergibt sich eine theoretische Genauigkeit für die 3D-Positionsbestimmung von ca. 7 mm mit einer Abtastfrequenz von bis zu 6 Hz. Durch den Versuchsaufbau kommen noch weitere systematische Unsicherheiten hinzu, die Gerätepositionierung ist auf etwa 1 cm (Handmessung) und 2" (0,6 mgon, mit Laserlot) genau.



BILD 3: Leica Viva TS15 während eines Flugversuchs.

Reichweite (Schrägdistanz)	300 m
Suchdauer (Anpeilung Reflektor)	1,5 s
Drehgeschwindigkeit (Verfolgung)	45°/s
Messzeit (Dauer-Modus)	0,15 s
Messgenauigkeit Winkel	5" (1,5 mgon)
Messgenauigkeit Schrägdistanz	3 mm

TAB. 1: Kennzahlen für Messungen mit Leica Viva TS15.

3.3. Absolute und relative Referenzlokalisierung

Die Messungen der Punkte für die 3D-Trajektorien erfolgen zunächst in einem lokalen kartesischen Koordinatensystem. Zur Transformation dieser Flugbahnen in ein globales Koordinatensystem (u. a. in WGS84) muss der globale Standort des Tachymeters bestimmt werden. Unabhängig von der Art der Bestimmung des Tachymeterstandortes muss die Ausrichtung des lokalen Koordinatensystems bestimmt werden, was am einfachsten durch die Vermessung eines Zielpunktes mit bekanntem

globalen Standort oder bekannter Richtung zum Tachymeter durchgeführt wird.

Im Normalfall wird der Tachymeterstandort mit einem GPS-Gerät vermessen. Alternativ kann ein anderer Punkt mit bekannten lokalen Koordinaten mit GPS vermessen werden. Die Genauigkeit (Standardabweichung) kann dabei durch Langzeitmessungen von idealerweise mehr als 30 Minuten verbessert werden.

Um weitere systematische (u. a. zeit- und wetterabhängige) Abweichungen von GPS-Positionslösungen zu bestimmen und die Standardabweichung der Lösung weiter zu verringern, ist eine genauere Kenntnis der absoluten Standorte von Tachymeter und Referenzpunkt erforderlich. Genauere Bestimmungen von mit entsprechenden Messnägeln markierten Punkten, z. B. mittels DGPS und dem Positionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) sind im Geodätischen Postprocessing Positionierungs-Service (GPPS) bis zu einigen Millimetern genau [4]. Diese Positionsbestimmungen sind für ein Versuchsgelände nur einmalig durchzuführen. Eine derartige Vermessung von Standorten an einem Flugversuchsgelände wurde durchgeführt, wobei Standardabweichungen zwischen 4 mm und 7 mm erzielt wurden. Koordinaten von Langzeit-Positionsbestimmungen mit Handgeräten weichen von diesen um 1,5 m bis 3 m ab, wobei die Handgeräte selbst eine Genauigkeit von etwa 2 m angegeben haben. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgen jedoch keine weiteren Untersuchungen von mit SAPOS eingemessenen Referenzpunkten.

Zur Identifizierung von Ausfällen GPS-basierter Positionslösungen genügt eine relative Referenzlokalisierung. Dazu kann z. B. der Standort des durch das Tachymeter vermessenen Luftfahrzeugs vor oder nach dem Flug mit den bordgebundenen Empfängern vermessen werden. Damit ist zwar keine Bewertung der GPS-Lösung und der absoluten Positionsangaben an diesem Punkt möglich, jedoch eine relative Bewertung während des Fluges, da die Messungen der bewegten Flugversuchsträger weiterhin unabhängig erfolgen.

4. TESTDATENGENERIERUNG

In den Versuchen in bergigem Gelände werden die Versuchsträger einen 35 m hohen Hang entlang sowie auf und ab geführt, mit Geschwindigkeiten bis etwa 5 m/s. Es werden die GPS-Empfänger *NovAtel OEM4* und der sehr kleine und auch für Mikroflieger einsetzbare GPS-Empfänger *uBlox-4* am ARTIS-Hubschrauber gleichzeitig eingesetzt. Das NovAtel-Gerät erhält eine zusätzliche DGPS-Stützung zur Verbesserung der relativen Positionierung, jedoch ohne Korrektur der absoluten geodätischen Position. Die Aktualisierungsraten der Positionsdaten sind: *NovAtel OEM4*: 20 Hz, *uBlox-4*: 4 Hz. Die Lagewinkel des Tachymeters werden über das eingebaute Lot bestimmt. Dessen Nordausrichtung wird durch Ver-

messung eines zweiten Punktes mit bekannter Richtung relativ zum Tachymeter bestimmt. Der Standort des Tachymeters wird zum einen über eine Langzeitmessung mit GPS-Handgeräten bestimmt, die auf das Tachymeter gesetzt werden (Flugbahnen siehe Bild 4), zum anderen für die relative Bewertung durch Verwendung der mit dem NovAtel-Gerät an Bord des Hubschraubers gemessenen Position vor dem Abflug. Der Offset zwischen Hubschrauber- und Tachymeterstandort wurde dann mit dem Tachymeter selbst vermessen, woraus sich ein Standort in geodätischen Koordinaten ergibt (resultierende Flugbahnen siehe Bild 5). Dieser zweite Tachymeterstandort dient auch zur weiteren Auswertung der Bahnen in drei Achsen (siehe Bilder 6–8) und der Differenzen zwischen GPS- und Tachymetertrajektorien (siehe Bilder 9–11). Die Entfernung zwischen Tachymeter und Luftfahrzeug lag etwa zwischen 90 m und 130 m.

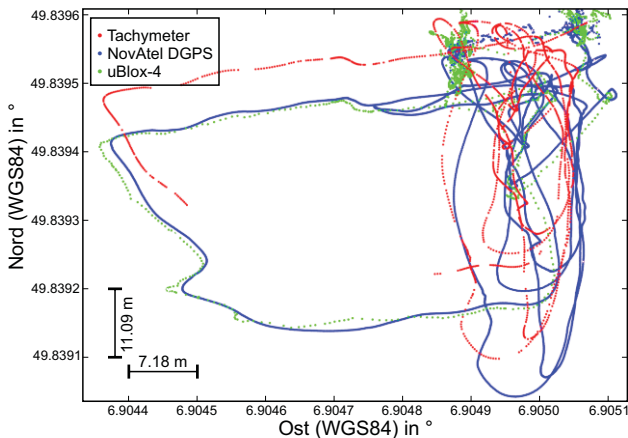


BILD 4: Flugbahn des ARTIS-Hubschraubers mit verschiedenen GPS-Empfängern und Tachymeter gemessen. Der Tachymeterstandort wurde separat mit GPS bestimmt.

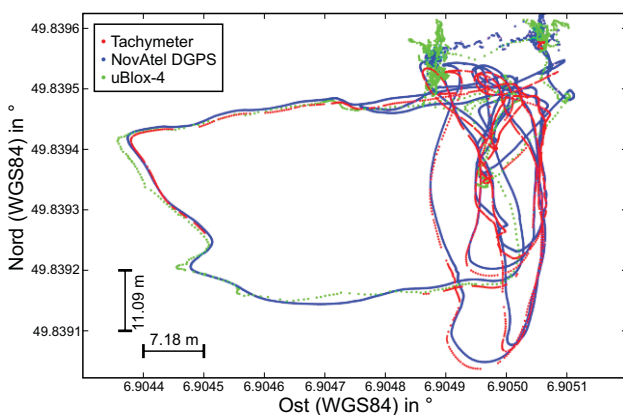


BILD 5: Flugbahn des ARTIS-Hubschraubers mit verschiedenen GPS-Empfängern und Tachymeter gemessen. Der Tachymeterstandort wurde aus dem mit Bord-GPS bestimmten Standort des Hubschraubers und einer lokalen 3D-Positionsbestimmung des Hubschraubers berechnet.

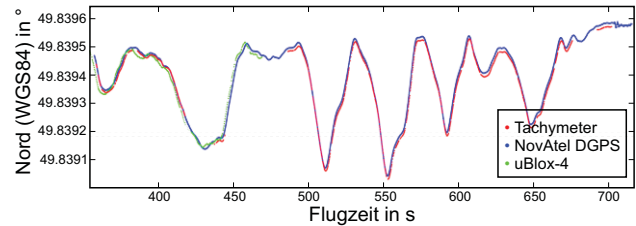


BILD 6: Zeitlicher Verlauf der geographischen Breite der Bahnen des Fluges aus Bild 5.

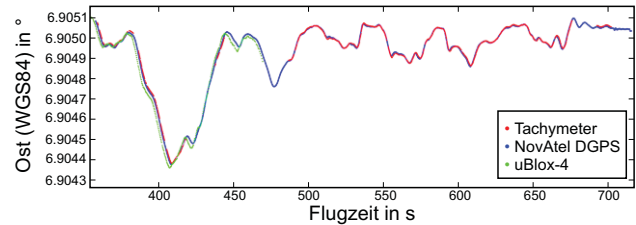


BILD 7: Zeitlicher Verlauf der geographischen Länge der Bahnen des Fluges aus Bild 5.

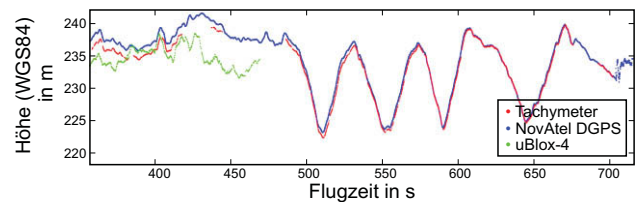


BILD 8: Zeitlicher Verlauf der geographischen Höhe der Bahnen des Fluges aus Bild 5.

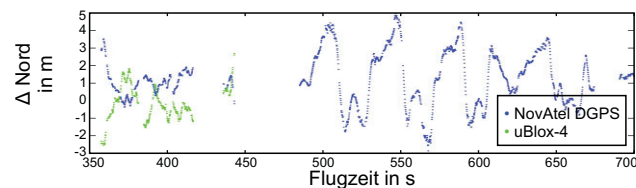


BILD 9: Abweichung der in Bild 6 gezeigten geographischen Länge von Tachymeter-Referenztrajektorie.

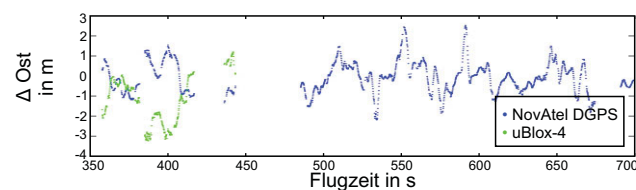


BILD 10: Abweichung der in Bild 7 gezeigten geographischen Breite von Tachymeter-Referenztrajektorie.

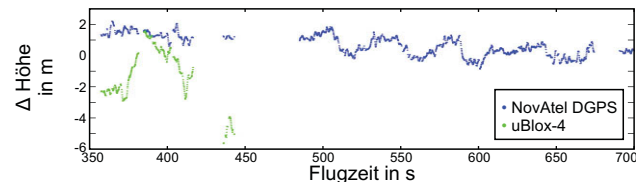


BILD 11: Abweichung der in Bild 8 gezeigten geographischen Höhe von Tachymeter-Referenztrajektorie.

Auf die gleiche Weise wurde ein zweiter Flugversuch mit dem ARTIS-Hubschrauber durchgeführt (Bild 12), wobei hier nur der handvermessene Tachymeterstand-

ort ohne Bezug zum Vehikel zur Bestimmung der Referenzbahn verwendet wurde. Gleiches gilt für den Flug mit dem Pelican-Quadrokopter (Flugbahn siehe Bild 13), bei dem nur das *uBlox-4*-Gerät an Bord montiert ist.

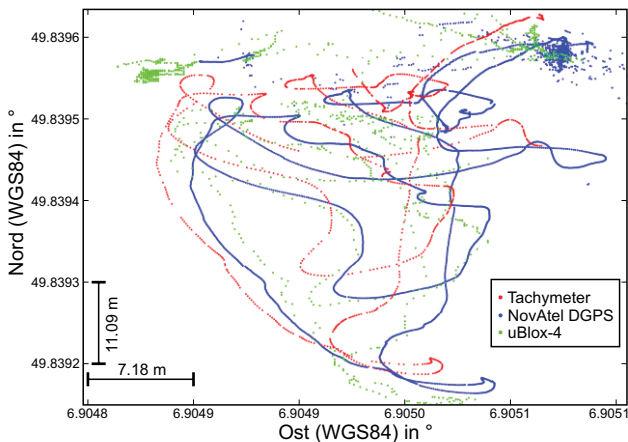


BILD 12: Flugbahn eines weiteren Fluges des ARTIS-Hubschraubers mit verschiedenen GPS-Empfängern und Tachymeter gemessen. Der Tachymeterstandort wurde separat mit GPS bestimmt.

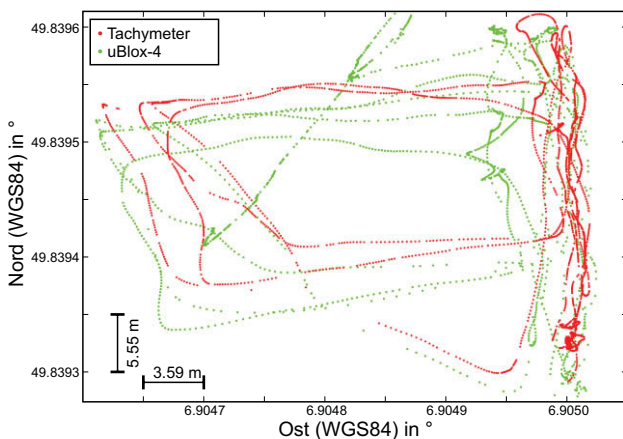


BILD 13: Flugbahn eines Fluges des Pelican-Quadrokopters mit GPS und Tachymeter gemessen. Der Tachymeterstandort wurde separat mit GPS bestimmt.

5. BEWERTUNG

Die Daten aus den in den Bildern 4, 12 und 13 gezeigten Flugbahnen bestätigen zunächst einige bekannte Eigenschaften von GPS-Positionsschätzungen. Die vom NovAtel-Gerät mit DGPS-Stützung ermittelte Bahn ist im Vergleich zu den Messungen des *uBlox-4*-Empfängers weniger stark verrauscht, jedoch sind mit beiden Geräten brauchbare Messungen entstanden. Die gerätespezifischen Abtastraten sind in den Abbildungen ebenfalls gut erkennbar, wobei es vorkommen kann, dass das Tachymeter das Tracking verliert. Eine Wiederaufnahme des Trackings während des Fluges ist jedoch gelungen.

Es existieren zeitabhängige systematische Fehler bei GPS-Positionsbestimmungen (Ionosphärenfehler usw.).

Damit lassen sich die offensichtlichen Ablagen von etwa 6 m bis 10 m zwischen den Bahnen der GPS- und Tachymetermessungen erklären, da die Position des Tachymeters etwa eine Stunde vor dem ersten Hubschrauberflug vermessen wurde. Diese Ablage ist bei Bestimmung des Tachymeterstandortes mit dem NovAtel-Gerät an Bord des Hubschraubers und kurz (d. h. wenige Minuten) vor dem eigentlichen Versuch wesentlich reduziert, siehe Bild 5, welches den gleichen Flug wie Bild 4 beschreibt. Die mit dem Tachymeter vermessene Bahn ist dabei lediglich verschoben, da es sich um die gleichen lokalen Messungen mit unterschiedlichen geodätischen Bezugspunkten handelt. Die große Übereinstimmung mit der NovAtel-DGPS-Trajektorie zeigt, bezogen auf die Tachymeter-Referenz, die hohe Genauigkeit der DGPS-Messungen am bewegten Träger. Im Vergleich zu der in Bild 4 gezeigten Referenztrajektorie besitzen jedoch alle Messungen, auch die Referenzbahn des Tachymeters, einen nahezu gleichen Absolutfehler aufgrund des gemeinsamen Bezugspunktes vor dem Start.

Neben den einzelnen Achsen der verschiedenen Bahnen in den Bildern 6, 7 und 8 sind die Abweichungen zwischen den verschiedenen GPS-Geräten und der Tachymetermessung in den Bildern 9, 10 und 11 zu sehen. Längen- und Breitengrad sind von NovAtel und *uBlox-4* um maximal fünf Meter verschieden. Es zeigt sich, dass die Abweichungen gerade bei den Umkehrungen zwischen Auf- und Abflug am Hang (ab Zeitpunkt 500) besonders groß sind. Ursache könnte eine zeitliche Verschiebung zwischen NovAtel- und Tachymetermessung sein, aufgrund von mangelnder Zeitsynchronisation zwischen den Geräten. Die Höhenmessung ist zu Beginn des Fluges schlechter, insbesondere beim *uBlox*-Gerät zwischen den Zeitpunkten 400 s und 450 s mit Abweichungen von bis zu sechs Metern zwischen den Messungen der verschiedenen Geräte.

Neben den Aussagen über die GPS-Empfänger können aus den Versuchsdaten Erkenntnisse zur Eignung des Tachymeters als Referenzmessgerät gewonnen werden. Erkennbar sind zunächst Positionsmessungen der Flugversuchsträger mit Abtastraten zwischen 2 Hz und 6 Hz bei gelungener Verfolgung. Die nominelle Abtastrate ist damit nicht erreicht, jedoch werden auch diese Messungen zur Referenzierung als geeignet bewertet. Es kommt allerdings zu Aussetzern verschiedener Dauer. Bei sehr kurzen Aussetzern von einer bis ca. drei Sekunden (u. a. um die Zeitstempel 400, 570 und 625), die in den Bodentrajektorien (z. B. Bild 4) als Lücken von 1 m bis 3 m erkennbar sind, entsteht nur ein kurzer Abriss des Trackings, welches vom verwendeten Tachymeter vollautomatisch wieder aufgenommen werden kann. Es existieren jedoch auch längere Aussetzer von mehreren Sekunden (u. a. Zeitintervalle 420 s – 435 s, 445 s – 480 s und 670 s – 685 s, siehe Bild 8),

bei denen das automatische Wiederfinden des Reflektorprismas misslingt. Allerdings führt ein erneutes manuelles Zielen zu einer Wiederaufnahme des Trackings auch ohne Anhalten des Luftfahrzeugs. Ein vergleichbares Verhalten wurde in den anderen Flugversuchen beobachtet.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Neben dem Vergleich verschiedener GPS-Empfänger an Bord kleiner unbemannter, schwebefähiger Luftfahrzeuge beschäftigt sich diese Arbeit mit der Eignung eines zielverfolgenden Tachymeters als Referenzmesssystem zur Bewertung von Ortungsverfahren. Die Arbeit zeigt Versuche mit Hubschrauber und Quadroptopter zur Aufzeichnung von GPS-Trajektorien und vergleicht diese mit Bahnvermessungen vom Tachymeter. Ergebnisse sind neben dem Vergleich verschiedener GPS-Empfänger mit und ohne DGPS-Referenz eine Feststellung der Eignung des zielverfolgenden Tachymeters Leica Viva TS15.

Die Referenzmessungen von Flügen mit bis zu 5 m/s aus Abständen zwischen 90 m und 130 m waren prinzipiell erfolgreich. Das Tracking gelingt weitestgehend mit Aktualisierungsraten zwischen 2 Hz und 6 Hz, wobei zeitlich kurze Aussetzer vom Tachymeter selbst toleriert werden und eine automatische Wiederaufnahme der Verfolgung gelingt. In anderen Fällen erfolgte bei längeren Aussetzern eine manuelle Wiederaufnahme der Verfolgung auch bei bewegtem Luftfahrzeug.

Offen ist eine weiterführende Evaluierung des Referenzmesssystems unter Berücksichtigung der Eigenschaften von GPS-Positionslösungen und der Tachymertechnik. Fehler ergeben sich aus der Abhängigkeit des Fehlers der Referenzmessung von der Lage des Hubschraubers. Bei diesen Versuchen ist der Reflektor am Heckrohr etwa 10 cm von den GPS-Antennen entfernt montiert. Es ergeben sich Abweichungen zwischen GPS- und Referenzlösung in dieser Größenordnung, da die dazu benötigten Lagewinkel des Hubschraubers zur Korrektur dieses Abstandes in den Versuchen nicht berücksichtigt wurden. Bei GNSS/INS-Lösungen kann die Abweichung zur Referenzlösung kompensiert werden, z. B. wenn die GNSS/INS-Ortung die Position des Retroreflektors als Bezugspunkt verwendet. Offen sind auch

zeitliche Fehler zwischen Navigations- und Referenzlösung, die nach [3] nicht mit einem einmaligen Setzen der GPS-Zeit auf dem Tachymeter, sondern aufgrund der Uhrendrift nur mit einer Synchronisation der Uhren beider Systeme während der gesamten Versuchszeit behoben werden können. Ein weiterer offener Punkt betrifft Misserfolge des Trackings bei Abschattungen, z. B. wenn die Hubschrauberzelle die Sicht auf das Reflektorprisma verdeckt. Hier könnten andere Montageorte Abhilfe schaffen.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit ist Teil des vom DLR Braunschweig und der TU Braunschweig gemeinsam durchgeführten Forschungsprojektes NEXt UAV (Navigation zur Exploration tieffliegender UAV in Katastrophenszenarien). Das Verbundvorhaben wird gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) durch das Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter den Förderkennzeichen 50 NA 1002/3.

LITERATUR

- [1] F. Adolf, F. Andert, S. Lorenz, L. Goormann und J. Dittrich, "An unmanned helicopter for autonomous flights in urban terrain," in *Advances in Robotics Research*, T. Kröger und F. M. Wahl, Hrsg. Berlin: Springer, 2009, S. 275–285.
- [2] M. Attar, E. Wahnou und D. Chaimovitz, "Advanced flight control technologies for UAVs," in *2nd AIAA Unmanned Unlimited Conference*, 2003.
- [3] H. Eisenbeiss, W. Stempfhuber und M. Kolb, "Genauigkeitsanalyse der 3D-Trajektorie von Mini-UAVs," in *Tagungsband der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation*, 2009, S. 407–417.
- [4] Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung. Website: www.sapos.de. Weitere Informationen: www.lgn.niedersachsen.de/live/live.php?navigation_id=11083&article_id=51457&psmand=35
- [5] W. Stempfhuber und H. Kirschner, "Kinematische Leistungsfähigkeit von zielverfolgenden Tachymetern – Ein Beitrag zum Stand der Technik am Beispiel des Leica TPS1200+," *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, Ausg. 6, S. 216–224, 2008.
- [6] N. Michael, D. Mellinger, Q. Lindsey und V. Kumar, "The grasp multiple micro-uav testbed," *IEEE Robotics Automation Magazine*, Ausg. 17, Nr. 3, S. 56–65, 2010.
- [7] Leica Geosystems, "Viva TS15 Datasheet," Website: www.leica-geosystems.com/de/Leica-Viva-TS15_86198.htm.