

IN-FLIGHT-MESSUNG DES DYNAMISCHEN SEGELFLUGES VON ALBATROSSEN

G. Sachs, J. Traugott und F. Holzapfel
Lehrstuhl für Flugsystemdynamik
Technische Universität München
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Übersicht

Ergebnisse aus In-Flight-Messungen des dynamischen Segelfluges von Albatrossen werden vorgelegt. Diese Messungen ermöglichen eine präzise Bestimmung der Flugbahn, die durch ein neues Verfahren zur Positionsberechnung unter Verwendung von L1-Trägerphasen-Messungen sowie mittels GPS-Loggern mit hinreichend hoher Daten-Aufzeichnungsrate erreicht wird. Die vorgelegten Ergebnisse zeigen den charakteristischen Höhenverlauf des dynamischen Segelfluges, der sich in zyklischer Weise wiederholt. Zeitversetzt dazu erfolgt der Geschwindigkeitsverlauf, der ein analoges zyklisches Verhalten aufweist.

1. EINLEITUNG

Albatrosse besitzen ein enormes Leistungsvermögen, das es ihnen erlaubt, große Flugstrecken zurückzulegen. So sind Flugstrecken von mehr als 25.000 km gemessen worden, die ein Albatros in 43 Tagen zurückgelegt hat [1, 2], vgl. auch Bild 1.

Basis dieser enormen Flugleistungen ist der dynamische Segelflug, ein Flugmanöver, das dem Vogel das Fliegen ohne Flügelschlag ermöglicht. Mit diesem Flugmanöver gewinnen die Vögel die zum Fliegen erforderliche Energie aus dem Scherwind unmittelbar über der Meeresoberfläche [3].

Eine Vielzahl von Messungen über die Flugwege von Albatrossen liegt vor [1, 2, 4-6]. Daher ist der Kenntnisstand über die großräumigen Bewegungen der Vögel sehr fundiert. Demgegenüber steht die Messung des dynamischen Segelfluges im Flug noch aus. Ursache hierfür ist das Fehlen von geeigneten Sensoren und mathematischen Methoden zur Bestimmung der Flugbahn mit der erforderlichen hohen Genauigkeit.

2. GRUNDSÄTZLICHES ÜBER DEN DYNAMISCHEN SEGELFLUG

Die grundsätzlichen Zusammenhänge des dynamischen Segelfluges lassen sich anhand der Darstellung in Bild 2 erläutern. Das Bild zeigt, dass der dynamische Segelflug aus einer Flugbahn mit sich wiederholenden Zyklen besteht. Ein Zyklus lässt sich in vier Phasen unterteilen, die sich folgendermaßen charakterisieren lassen:

- 1 Untere Kurve zur Änderung der Fluges in eine Richtung gegen den Wind
- 2 Steigflug (Flugrichtung gegen den Wind)

- 3 Obere Kurve zur Änderung der Fluges in eine Richtung mit dem Wind
- 4 Sinkflug (Flugrichtung mit dem Wind)

In Bild 3 ist das Windprofil in der Höhenschicht über dem Meer gezeigt, in der der Vogel den dynamischen Segelflug ausführt. Wie daraus hervorgeht, wächst die Windgeschwindigkeit von sehr kleinen Werten unmittelbar über der Meeresoberfläche mit Zunahme der Höhe schnell an. Die sich daraus ergebenden Unterschiede in der Windgeschwindigkeit nutzt der Vogel zur Energiegewinnung aus.

Die Energiegewinnung lässt sich als ein Zusammenspiel zwischen Flugbahnverlauf und Windprofil deuten. Die untere Kurve (Phase 1) und der Steigflug (Phase 2) dienen dazu, dass der Vogel am oberen Ende der gezeigten Höhenschicht einen Flugzustand erreicht, bei dem er gegen den Wind fliegt und gleichzeitig die Windgeschwindigkeit groß ist. Mittels der oberen Kurve (Phase 3) erfolgt eine Richtungsumkehr im Sinne einer Bewegung mit dem Wind. Dadurch wird der Vogel vom Wind beschleunigt. Dieser Effekt ist gleichbedeutend mit einem Energiegewinn. Der Sinkflug (Phase 4) dient dazu, dass die untere Kurve in einer niedrigen Höhe mit möglichst geringer Windgeschwindigkeit erfolgt. Aufgrund der hier bestehenden geringen Windgeschwindigkeit können die diesbezüglichen Verluste in der unteren Kurve (Phase 1) möglichst klein gehalten werden.

Eine ergänzende Betrachtung verdeutlicht anhand des Zusammenhanges der Geschwindigkeitsvektoren V_k (Geschwindigkeit relativ zur Erde als Inertialsystem), V_w (Windgeschwindigkeit) und V (Geschwindigkeit gegenüber der bewegten Luft) den Wirkungsmechanismus des Energiegewinns, Bild 4. Dieses Bild zeigt einen Flugzustand vor und nach der oberen Kurve (gekennzeichnet durch die Punkte 1 und 2), wobei die

gleiche Höhe und somit die gleiche potentielle Energie gewählt wurden. Der Energiegewinn äußert sich daher in der Änderung der Geschwindigkeit V_k . Diese Geschwindigkeit erfährt aufgrund der beschriebenen Beschleunigung durch den Wind in der oberen Kurve eine Vergrößerung, so dass die kinetische Energie zunimmt. Diese Zunahme der kinetischen Energie ist gleichbedeutend mit einem Gewinn an Gesamtenergie.

3. METHODE ZUR GENAUEN BESTIMMUNG DER FLUGBAHN

3.1 Überblick

Die am Lehrstuhl für Flugsystemdynamik der Technischen Universität München entwickelte Methode zur genauen Bestimmung der Flugbahn verwendet kinematischen L1-Trägerphasen-Messungen. Damit ist es möglich, die mittels Ein-Frequenz-Empfängern erzielbare relative Genauigkeit vom Meter- in den niedrigen Dezimeter-Bereich zu verbessern. Dies wird durch die Nachbearbeitung der GPS-Rohdaten in einem auf Zeitdifferenzen beruhenden Verfahren erreicht.

Im Unterschied zu den verrauschten C/A-Code-Daten weisen die deutlich glatteren Phasen-Daten stets eine Mehrdeutigkeit N' auf, die dem Nutzer nicht bekannt ist. Während RTK-Ansätze diesem Problem durch statistische Auswertung langer Doppel-Differenzen-Datenbögen begegnen, ermöglicht die Bildung von Einfach-Zeitdifferenzen die vollständige Kürzung von N' . Dadurch ist weder eine Initialisierung noch ein zweiter Empfänger als Referenzstation erforderlich. Stattdessen wird die relative Lage zwischen der aktuellen Empfänger-Position und dem Startpunkt des jeweiligen Manövers (Basis-Vektor) mit einer Präzision von wenigen Zenti- bis Dezimetern berechnet. Der Startpunkt selbst kann über C/A-Code-Daten mit Genauigkeiten im Meterbereich bestimmt werden.

Diesen erheblichen Vereinfachungen steht jedoch gegenüber, dass Signal-Laufzeitfehler, die sich nur zu Beginn vollständig kürzen, mit der Zeit zunehmen. Außer durch Verwendung präziser externer Korrekturdaten in Verbindung mit Laufzeit-Korrekturmodellen und durch Wahl einer entsprechend kurzen Zeitspanne können unzulässige Auswirkungen einer derartigen Fehlerdrift nicht verhindert werden. Jedoch ist es mittels einer internen Residuenanalyse möglich, die Qualität der Lösung abzuschätzen und gegebenenfalls ein Neu-Aufsetzen zu erzwingen. Außerdem können Satelliten ab dem Zeitpunkt, ab dem ihr Phasen-Signal verschwindet oder fehlerbehaftet ist, nicht mehr verwendet werden. In einem solchen Fall ist es erforderlich, die Signalqualität zu bestimmen. Dies ermöglicht ein ebenfalls Residuen-basiertes, iteratives Ausschlussverfahren.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Anzahl der Satelliten, die jeweils verfügbar sind. Reduziert sich die Anzahl auf weniger als vier zwischen Startpunkt und aktueller Epoche, so ist eine Neu-Aufsetzung der Lösung erforderlich. Ist zwischen Basis-Epoche und aktueller Epoche die Zahl der Satelliten zu gering, jedoch die Lösung

zur vorangehenden Epoche noch bestimmbar, so kommt es zu einem Übergabe-Prozess der Basis-Epoche. Falls dies nicht möglich ist, erfolgt der Import einer neuen Basis-Epoche aus der groben Einzelpunkt-betrachtung. Dies ist jedoch mit einem Sprung in der Lösung verbunden. Eine graphische Darstellung des Programmablaufs zeigt Bild 5.

3.2 Grundsätzliche Zusammenhänge

Ziel ist die Bestimmung der Position x zusammen mit dem Empfänger-Uhrenfehler δ^R mit hoher Präzision. Dies entspricht der Ermittlung des Basisvektors β^{bi} zu zwei Zeitpunkten t_b, t_i :

$$\beta^{bi} = \xi_i - \xi_b \quad (1)$$

Hierbei gilt mit der Lichtgeschwindigkeit c :

$$\xi_n^T = [x_n^T, c\delta_n^R]^T \quad (2)$$

Zu dieser Bestimmung werden Messungen der Trägerphasen Φ verwendet, die aus den L1-Phasen-Regelkreisen der einzelnen Empfängerkanäle mit hoher Präzision gewonnen werden. Für eine einzelne Messung gilt

$$\hat{\Phi}(t) = \hat{\rho}(t) + c\hat{\delta}(t) + \lambda_1 N' \quad (3)$$

Die Größe ρ stellt den Abstand zwischen der Satelliten-Position zur Sendezeit und der Empfänger-Position zur Empfangszeit dar, δ den kombinierten Satelliten- und Empfänger-Uhrenfehler, $\lambda_1 = 190.3$ mm die Wellenlänge des Trägersignals und N' die unbekannte Mehrdeutigkeit. Die Schreibweise $\hat{\Phi}$, $\hat{\rho}$ und $\hat{\delta}$ bedeutet, dass dies modellierte Größen sind.

Für Einfach-Zeitdifferenzen gilt

$${}^{bi}\nabla\hat{\Phi} = {}^{bi}\nabla\hat{\rho} + c{}^{bi}\nabla\hat{\delta}^R \quad (4)$$

Bei kontinuierlich verfolgter Phase ist N' zeitinvariant, so dass es sich vollständig kürzt.

Setzt man hinsichtlich der Zeitdifferenzen an, dass diese bezüglich Modell und Messung übereinstimmen, so erhält man die folgende Beziehung zur Bestimmung von ξ_i :

$${}^{bi}\nabla\tilde{\Phi} = {}^{bi}\nabla\hat{\Phi}(\xi_i, \xi_b) \quad (5)$$

Die Schreibweise $\tilde{\Phi}$ kennzeichnet die tatsächlichen Messwerte.

In Bild 6 wird eine graphische Darstellung der zentralen Aufgabe zur Positionsbestimmung gezeigt. Ziel ist die Bestimmung des Basisvektors \mathbf{b} (und des nicht dargestellten Empfänger-Uhrenfehlers $c\delta^R$) mittels zeitlichen Differenzen in den Messungen zu vier oder mehr Satelliten.

Bei Signalen von vier bzw. mehr Satelliten stellt die Beziehung nach Gl. (5) ein bestimmtes bzw. überbestimmtes Gleichungssystem dar, das im Hinblick auf die gesuchte Lösung über ein geeignetes Verfahren behandelt werden kann. Wie bei der Einzelpunktbetrachtung kann für die Abschätzung der Fehlerfortpflanzung aus dem Mess- in den Positionsbereich das Prinzip der Dilution of Precision (DOP) genutzt werden. Die Fehler im Messbereich werden aus den mittleren Residuen zwischen gemessenen und modellierten Größen nach der Beziehung

$$\sigma_{\tilde{\phi}} = \text{RMS}(\tilde{\phi} - \hat{\phi}) \underbrace{\sqrt{\frac{n-1}{n-4}}}_{\text{Skalierungsfaktor}} \quad (6)$$

ermittelt. Hierbei stellt die Größe n die Zahl der verwendeten Satelliten dar.

Detailliertere Darstellungen über die beschriebene Methode finden sich in [7] und [8].

4. EMPFÄNGER-HARDWARE

Der im Folgenden beschriebenen Empfänger ist vom Typ GiPsy der Firma TechnoSmArt, Rom, Italien, Bild 7. Modifikationen betreffen die Verwendung des Moduls LEA-4T statt des Standardmoduls LEA-4H zur Gewinnung von GPS-Rohdaten.

Der Empfänger besitzt eine Größe von $44 \times 21 \times 4 \text{ mm}^3$ bei einer Masse von 4.25 g. Die auf dem Empfänger angebrachte Patchantenne weist eine Größe von $25 \times 25 \times 4 \text{ mm}^3$ bei einer Masse von 14.15 g auf, die Fläche der Bodenplatte ist $35 \times 35 \text{ mm}^2$. Die Gesamtmasse beträgt 18.4 g ohne Batterie. Der Stromverbrauch des Empfänger-Moduls liegt bei 40 mA.

Die Rohdaten werden mit 10 Hz in einem Flash-Speicher, der eine Kapazität von 8 MB besitzt, aufgezeichnet. Die verfügbare Speicherkapazität kann durch die Verbindung zu einem externen Datenlogger erweitert werden. Im vorliegenden Fall wird eine Speicherkarte mit einer Kapazität von 2 GB verwendet, der Stromverbrauch liegt bei etwa 20 mA.

5. ERGEBNISSE

Die experimentellen Forschungsarbeiten zur In-Flight-Messung des dynamischen Segelfluges von Albatrossen fanden in der Zeit von Dezember 2008 bis März 2009 auf der Inselgruppe der Kerguelen im südlichen Indischen Ozean statt. Sie erfolgten in Zusammenarbeit mit dem französischen Forschungszentrum Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive CEFÉ bzw. Centre National de la Recherche Scientifique CNRS.

GPS-Logger wurden an 20 Vögeln appliziert. Davon lieferten 16 GPS-Logger nutzbare Ergebnisse. Ein Beispiel für eine Flugbahn ist in Bild 8 gezeigt. Sie weist eine Länge von ca. 530 km auf, die in einer Zeit von etwa 42 h zurückgelegt wurde.

Für den dynamischen Segelflug ist eine zyklische Abfolge von Höhenänderungen charakteristisch. Hierzu sind in Bild 9 Messergebnisse gezeigt. In Bild 10 ist der Verlauf der Geschwindigkeit gegenüber der Erde als Inertialsystem dargestellt. Die Zyklen der Geschwindigkeit sind in ihrem zeitlichen Verlauf denen der Höhenzugeordnet.

Aus dem Vergleich der beiden Bilder 9 und 10 folgt, dass die Geschwindigkeit in den einzelnen Zyklen bereits während der Steigflugphase zunimmt. Die Zunahme der Geschwindigkeit hält über die maximale Höhe hinaus an und endet erst in der Sinkflugphase. Dies ist Beleg dafür, dass der Vogel im oberen Höhenbereich einen Energiegewinn erzielt.

6. ZUSAMMENFASSUNG

In-Flight-Messungen des dynamischen Segelfluges von Albatrossen sind mit miniaturisierten GPS-Loggern durchgeführt worden, die eine für dieses Flugmanöver hinreichend hohe Daten-Aufzeichnungsrate besitzen. Die In-Flight-Messungen erfolgten während eines mehrmonatigen Forschungsaufenthaltes auf der Inselgruppe der Kerguelen im südlichen Indischen Ozean. Mit einem neuen Verfahren zur Positionsberechnung unter Verwendung von L1-Trägerphasen-Messungen ist es möglich, die Flugbahn präzise zu bestimmen. Aus den dargelegten Ergebnissen gehen die charakteristischen Merkmale des dynamischen Segelfluges hervor, der aus einer zyklischen Abfolge von Kurven- sowie Steig- und Sinkflugphasen besteht. Der Energiegewinn erfolgt im oberen Höhenbereich eines Zyklus. Dies zeigt sich in ausgeprägter Weise am Verlauf von Geschwindigkeit und Höhe.

7. DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Forschungszentrum Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive CEFÉ für die Ermöglichung der experimentellen Untersuchungen auf der Inselgruppe der Kerguelen.

8. LITERATUR

- [1] P. A. Prince, J. P. Croxall, P. N. Trathan, und A. G. Wood. 1997. The pelagic distribution of South Georgia albatrosses and their relationships with fisheries. In: Albatross biology and conservation, Surrey Beatty and Sons, Chipping Norton, Australia, Hrg.: G. Robertson and R. Gales, S. 137–167, 1997.
- [2] W.L.N. Tickell: Albatrosses. Yale University Press. New Haven und London, 2000.
- [3] G. Sachs: Minimum shear wind strength required for dynamic soaring of albatrosses. Ibis, Vol. 147, pp. 1-10, 2005.
- [4] F. Bonadonna, C. Bajzak, S. Benhamou, K. Igloi, P. Jouventin, H.P. Lipp and G. Dell'Omo: Orientation in the wandering albatross: interfering with magnetic perception does not affect orientation

- performance. Proc. R. Soc. B 2005 272, pp. 489-495, 2005.
- [5] J.P. Croxall, J.R.D. Silk, R.A. Phillips, V. Afanasyev, D.R. Briggs: Global Circumnavigations: Tracking Year-Round Ranges of Nonbreeding Albatrosses. Science Vol. 307, pp. 249-250, 2005.
- [6] H. Weimerskirch, T. Guionnet, J. Martin, S.A. Shaffer and D.P. Costa: Fast and fuel efficient? Optimal use of wind by flying albatrosses. Proc. R. Soc. Lond. B 267, 1869-1874, 2000.
- [7] J. Traugott, G. Dell'Omo, A.L. Vyssotski, D. Odijk und G. Sachs: A Time-Relative Approach for Precise Positioning with a Miniaturized L1 GPS Logger. Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GNSS 2008, Savannah, Georgia, USA, 16.-19. September 2008, S. 1883-1894, 2008.
- [8] J. Traugott, D. Odijk, O. Montenbruck, G. Sachs und Chr. Tiberius: Making a Difference with GPS – Time Differences for Kinematic Positioning with Low-Cost Receivers. GPS World, 19(5), S. 48-52/54/57, 2008.

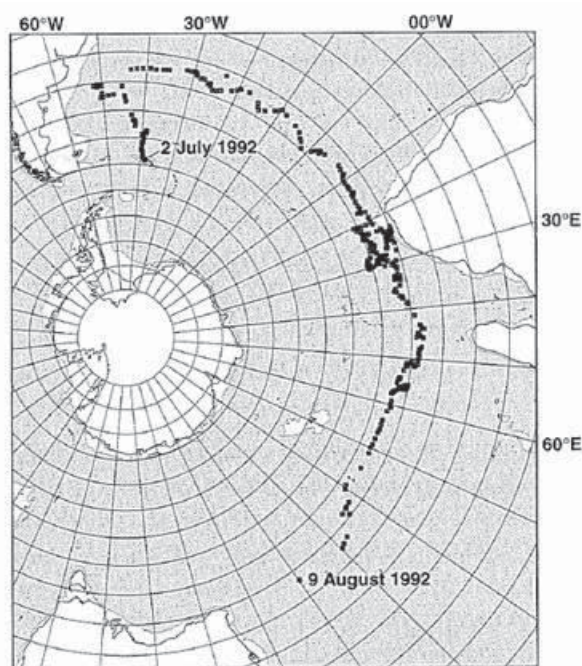


BILD 1. Flugbahn eines Albatros (nach [1, 2])

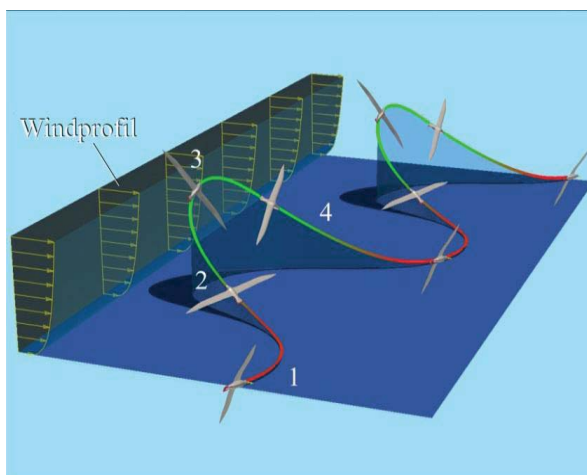


BILD 2. Dynamischer Segelflug des Albatros über dem Meer

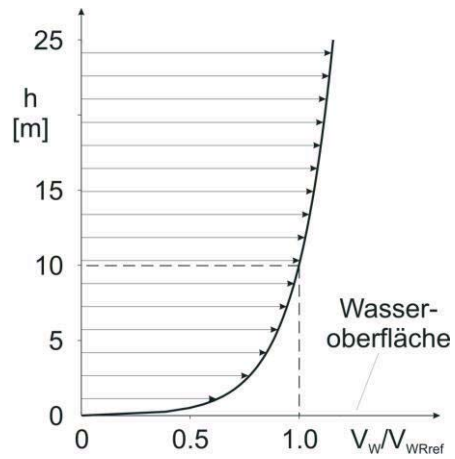


BILD 3. Schervindprofil über der Meeresoberfläche (V_{WRef} : Windgeschwindigkeit in der Referenzhöhe von $h = 10$ m, logarithmisches Windmodell)

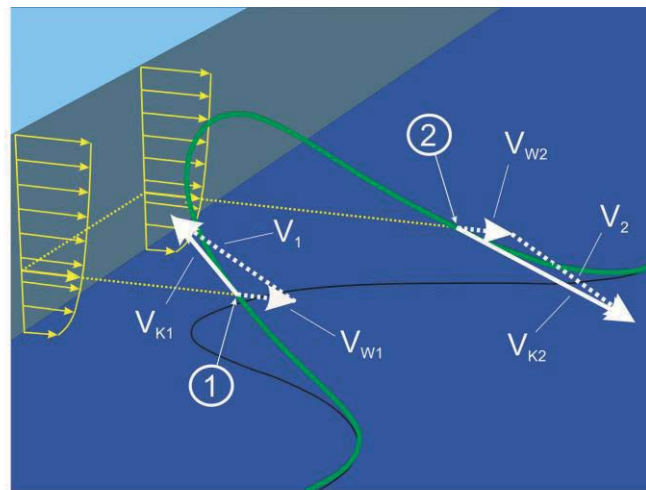


BILD 3. Energiegewinn durch obere Kurve

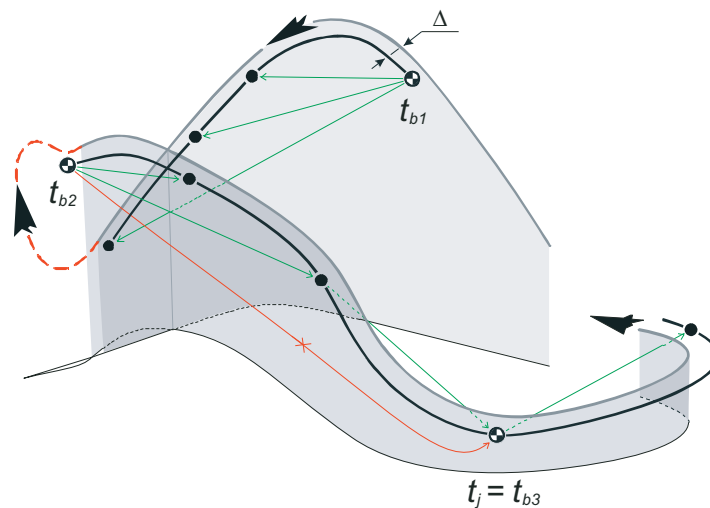


BILD 5. Programmablauf

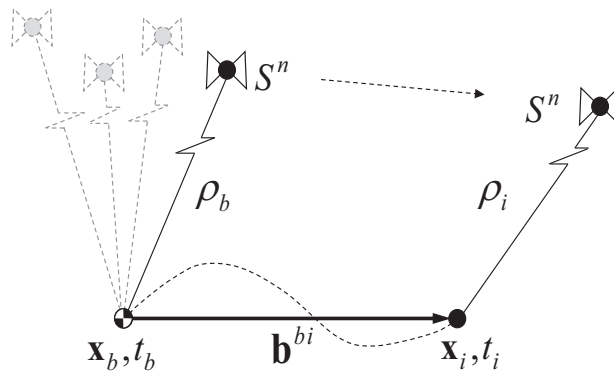


BILD. 6

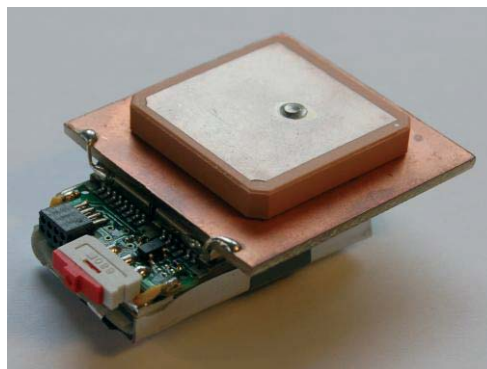


BILD 7. Miniaturisierter Empfänger (Typ GiPSy, www.technosmart.eu)

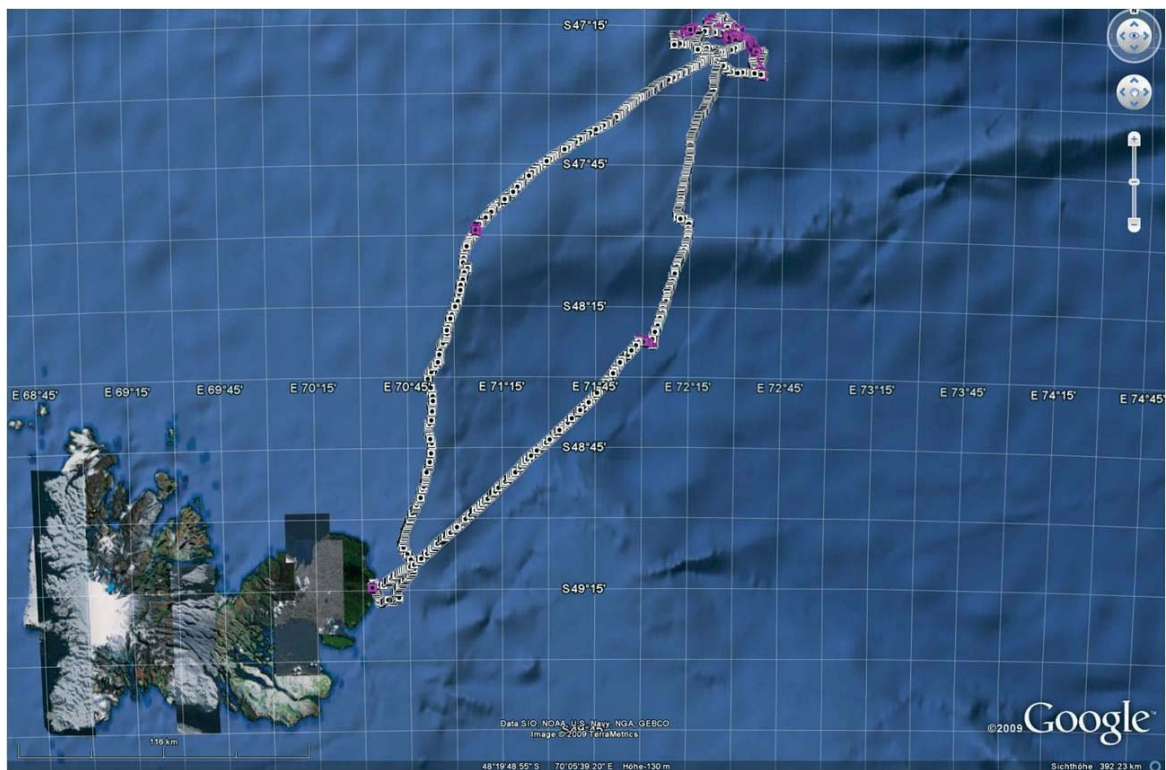


BILD 8. Vermessene Flugbahn eines Albatros

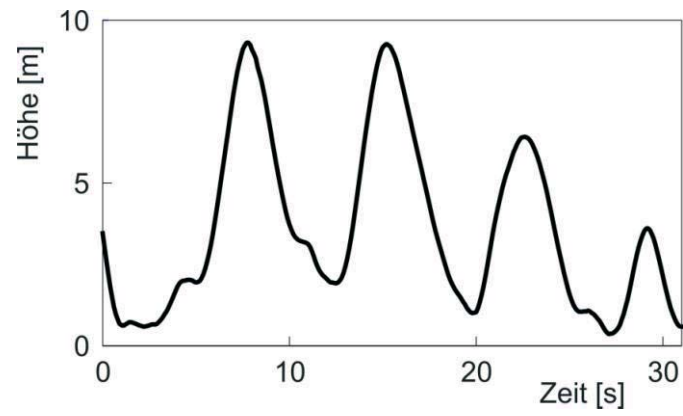


BILD 9. Höhenzyklen einer In-Flight-Messung des dynamischen Segelfluges

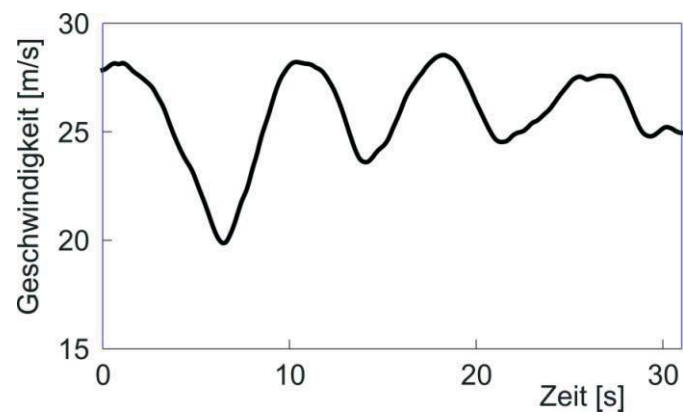


BILD 10. Geschwindigkeitszyklen einer In-Flight-Messung des dynamischen Segelfluges