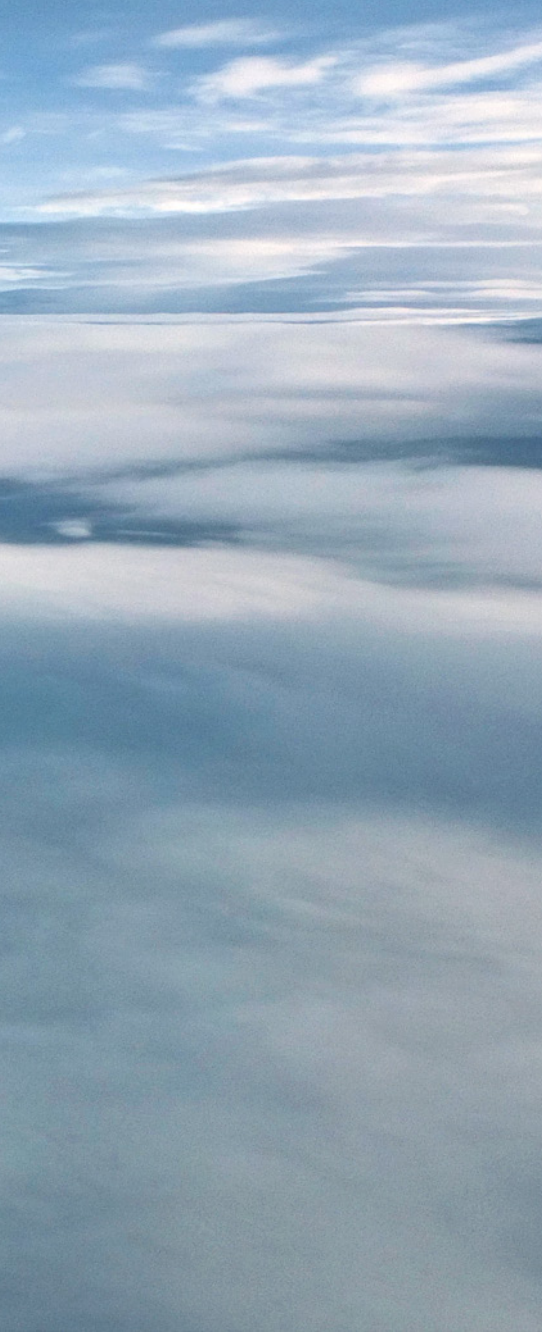
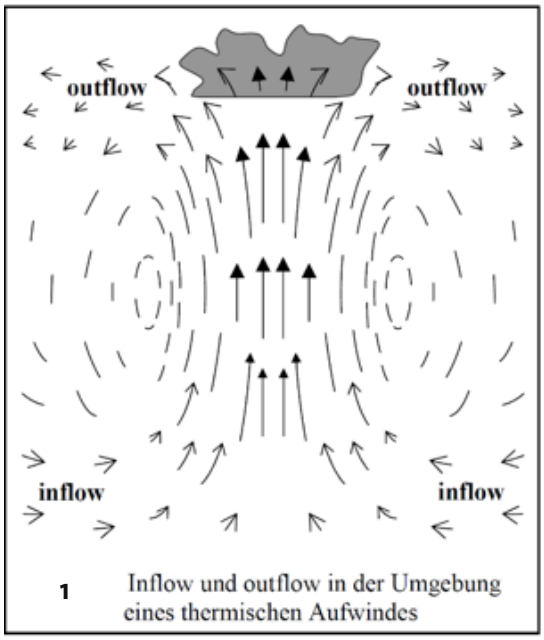
Wissen, woher der Wind weht

Vario und momentane Windmessung mittels Sensor Fusion und digitaler Signalverarbeitung

Autoren: Prof. Heinrich Meyr (RWTH Aachen, Barkhausen GmbH), Peng Huang (Vodafone Chair, TU Dresden), Roland Bieri,
Bild: Roland Bieri, Grafiken: Heinrich Meyr, Martin Dinges



Für den Segelflieger ist es essenziell zu wissen, wie sich die Luftmasse in seiner Umgebung bewegt. Wie kommen wir zu einer Windinformation im Flugzeug und warum haben wir nicht schon lange eine genaue Echtzeitanzeige des Windes?



1 Inflow und outflow in der Umgebung eines thermischen Aufwindes

Die heutigen TEK-Varios funktionieren sehr gut zur Messung der vertikalen Luftmassenbewegung, solange die Geschwindigkeit des Flugzeuges ungefähr konstant ist, z. B. beim Kreisen. Damit Energieumwandlungen beim Ziehen oder Drücken am Knüppel nicht fälschlicherweise als Steig- oder Sinkwerte angezeigt werden, muss das Vario gut kompensiert sein. Horizontale Änderungen der Luftmassenbewegung, d. h. Horizontalböen, werden aber vom TEK-Vario als falsche Steig- oder Sinkwerte interpretiert. Auf diese prinzipielle Beschränkung aus physikalischen Gründen werden wir später näher eingehen.

Genauso wichtig wie die vertikale Bewegung der Luftmasse ist die horizontale Komponente, die wir landläufig als Wind bezeichnen. Insbesondere im Gebirgsflug, beim Hang- und Wellenfliegen, wissen die Piloten die sekundengenaue Windinformation zu schätzen. Aber auch für die Flachlandpiloten ist Windinformation sehr wichtig, um die Thermik zielgerichtet zu finden und zu zentrieren: In Bodennähe weht der Wind zum Aufwind hin, in Wolkennähe vom Aufwind weg. Martin Dinges hat dies in einem OSTIV-Beitrag gezeigt (**Bild 1**).

Die Windberechnung

Wie kommen wir zu einer Windinformation im Flugzeug und warum haben wir nicht schon lange eine genaue Echtzeitanzeige des Windes? Der Grund ist, dass die heute benutzten Algorithmen zur Windschätzung eine sehr lange Mitteilungszeit benötigen. Sie können nur den Durchschnitt eines konstanten Windes schätzen und sind deshalb nur von sehr beschränktem Nutzen.

Die heute zur Verfügung stehende Elek-

tronik ermöglicht eine Windbestimmung auf der Basis des Winddreiecks, das jeder Flugschüler aus seiner Ausbildung kennt (**Bild 2**).

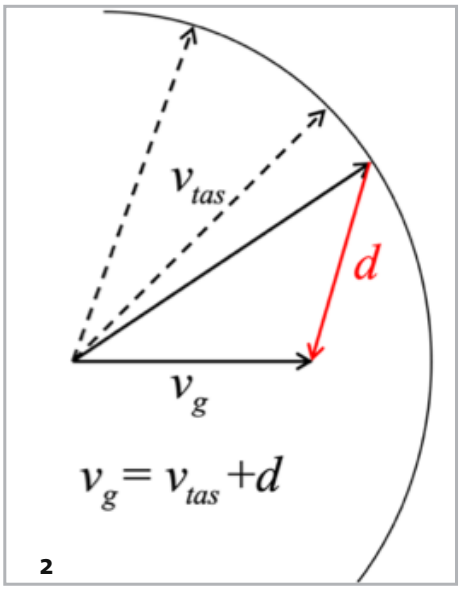
Der Groundspeed-Vektor vg lässt sich mit Hilfe des GPS bestimmen. Mit einem Magnetsensor lässt sich die Richtung des True-Airspeed Vektors vtas bestimmen, die Länge des vtas-Vektors bekommen wir aus dem Staudruck. Den Windvektor d erhält man durch Subtraktion von vg-vtas. Der Schwachpunkt dieser Art Windbestimmung ist der Magnetsensor: Dieser ist sehr störanfällig aufgrund von nicht kompensierbaren elektronischen Störfeldern. Zudem ist das Modell des Erdmagnetfeldes (IGRF) ungenau. Die Fehler des Magnetsensors führen deshalb schnell zu großen Abweichungen in der Windschätzung.

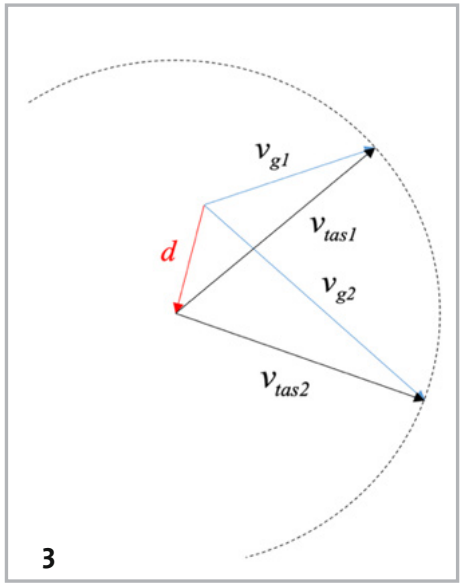
Die Aufgabenstellung lautet deshalb: Kann man den Wind ohne einen Magnetsensor bestimmen? Mathematisch heißt das, dass man vom Vektor vtas nur die Länge kennt. Man sieht unmittelbar, dass damit die Bestimmung des Windvektors d aus dem Winddreieck unmöglich ist. Alle Vektoren vtas gleicher Länge liegen auf einem Kreis. Folglich gibt es beliebig viele Möglichkeiten, die Dreiecksgleichung zu erfüllen.

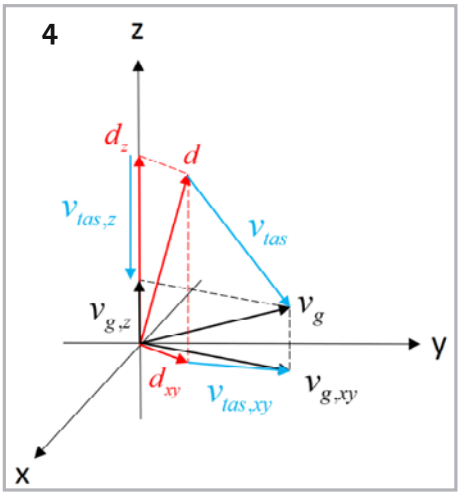
Betrachtet man aber zwei zeitlich verschobene Winddreiecke, so sieht die Sache völlig anders aus. Nimmt man einfachheitshalber an, dass der Wind d konstant ist, gibt es nur eine Lösung d für beide Winddreiecke (**Bild 3**).

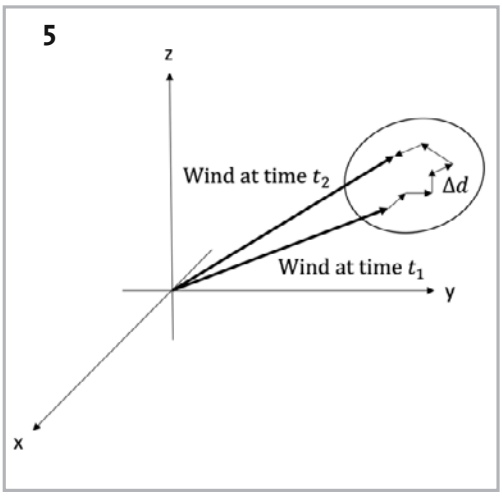
In **Bild 3** nehmen wir an, dass der Betrag der Vektoren vtas in beiden Dreiecken gleich ist. Deshalb müssen die Endpunkte der beiden Vektoren vtas auf dem Kreis liegen. Die Summe d+vtas ist gleich der Groundspeed vg in den jeweiligen Dreiecken.

Zur Bestimmung des Windes könnte man nun prinzipiell folgendermaßen vorgehen. Man berechnet einen Wert des Windes aus je zwei aufeinanderfolgenden Winddreiecken und bildet den Mittelwert der letzten Dreieckspaare. Die Aufgabenstellung ist aber weit komplizierter. Wir haben die vertikale Luftmassenbewegung bisher nicht in Betracht gezogen.









2. Winddreieck. 3. Bestimmung des Windes d mittels zweier Winddreiecke. 4. Das dreidimensionale Winddreieck. 5. Zeitlicher Verlauf des Windvektors

Das dreidimensionale Winddreieck

Die Luftmassendynamik ist dreidimensional. Wir müssen deshalb unsere Betrachtung um die vertikale Dimension erweitern. Zu diesem Zweck führen wir das dreidimensionale Winddreieck ein (**Bild 4**). Alle Vektoren haben nun drei Komponenten. Die Projektion des Windvektors auf die (x, y) Ebene ist das, was wir in der Fliegerei üblicherweise als „Wind" bezeichnen. Die gleiche Bezeichnung für einen drei- bzw. einen zweidimensionalen Vektor zu verwenden stört den Mathematiker. Welcher Vektor gemeint ist, sollte aus dem Kontext aber klar sein. Die vertikale Windkomponente dz entspricht dem „Netto Steigen" des Varios. Auch die beiden Vektoren vg und vtas haben eine z-Komponente. Die vertikale Komponente (vtas z) ist gleich der Sinkgeschwindigkeit (vg z) ist gleich der Geschwindigkeit des „wirklichen" Steigens des Flugzeuges.

Problemstellung definiert, wie vorgehen?

Die Aufgabenstellung ist definiert. Wie

sollen wir bei der Problemlösung vorgehen? Genau hier sei Immanuel Kant zitiert: "Es gibt nichts Praktischeres als eine gute Theorie. "
Auf die dreidimensionale Windmessung angewendet bedeutet das, dass wir einen Algorithmus entwerfen, der eine möglichst genaue Windanzeige (für alle drei Dimensionen) liefert, die auch rasch wechselnden Windvektoränderungen folgen kann („sekundengenaue Windmessung"). Der Algorithmus soll alle drei Komponenten zusammen schätzen und keine Trennung der vertikalen und der horizontalen Komponenten vornehmen. Die mathematische Systemtheorie beantwortet auch die Frage, unter welchen Bedingungen eine Windschätzung möglich ist. Im Grenzfall einer exakt geradlinigen Flugbewegung und vollkommen ruhiger Luft ist dies nicht möglich. Alle Dreiecke sind identisch. Wir (Huang und Meyr) konnten aber zeigen, dass die zufälligen Änderungen der Luftbewegung ausreichen, um das System „beobachtbar" zu machen. Unter Beobachtbarkeit versteht man in der mathematischen Systemtheorie, dass sich der Zustand des Systems aus den Messwerten der Vergangenheit bestimmen lässt.
Der Algorithmus, den wir einsetzen ist das „Extended Kalman Filter" (EKF), benannt nach R. E. Kalman, der den Algorithmus im Jahre 1960 publiziert hat. Das Kalman-Filter ist einer der fundamentalsten Algorithmen der digitalen Signalverarbeitung; ohne das EKF wäre keine Kapsel auf dem Mond gelandet.

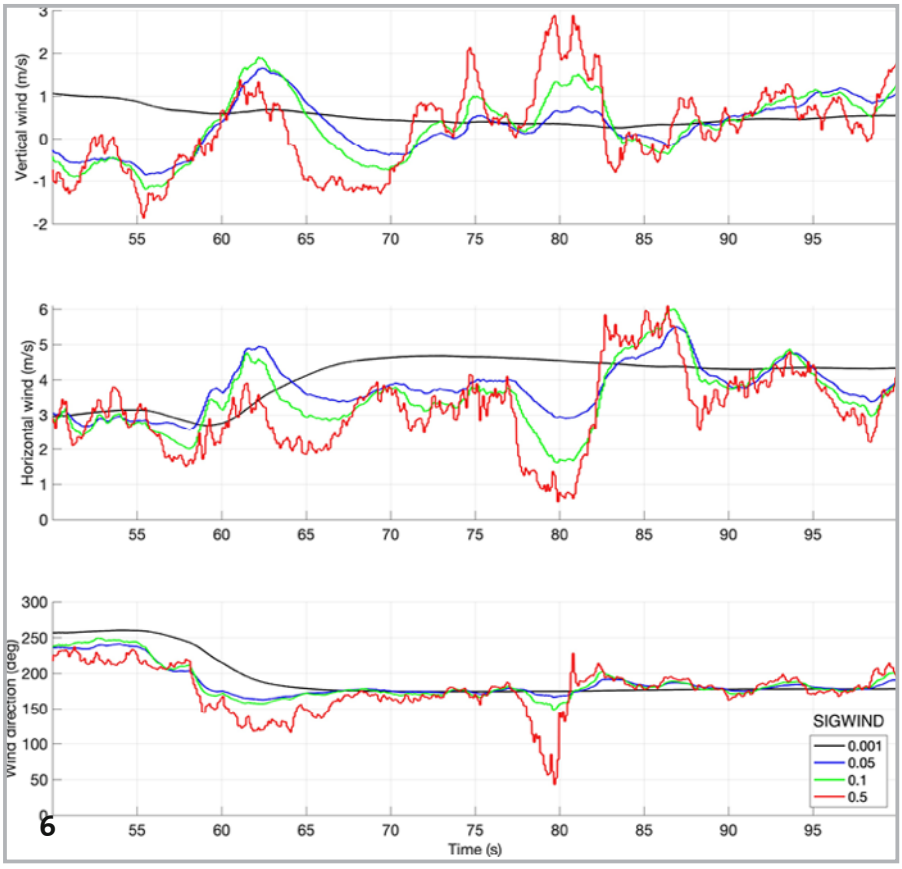
HAWK-Hardware

Die HAWK-Einheit besteht aus einem ARM-Prozessor und einer Sensoreinheit. Im Rechner läuft ein mathematisches Modell der Flugzeugkinematik, der Luftbewegung und der Sensorimperfektionen in Echtzeit. Das Modell enthält die Zustandsgrößen wie die Position p, die Groundspeed vg, die Windgeschwindigkeit d(x). Das Modell berechnet diese Zustandsgrößen in Echtzeit. Die Sensorbox enthält die folgenden Sensoren: GPS, Drucksensoren für statischen und dynamischen Druck und eine IMU (inertial measurement unit) mit einem dreiachsigen Beschleunigungssensor und einem dreiachsigen Gyrosensor (Winkeländerungen). Je nach Sensor werden Signale mit einer Taktrate zwischen 10 und 100 Hz verarbeitet.

Das Windmodell

Das EKF benötigt ein mathematisches Modell des dreidimensionalen Windvektors. Der Windvektor d(x, y, z; t) hängt von den drei Raumkoordinaten (x, y, z) und der Zeit t ab. Das Windfeld wird durch sehr komplexe mathematische Gleichungen beschrieben. Für unsere Zwecke ist es ausreichend, ein stark vereinfachtes Modell zu benützen. Wir nehmen an, dass der Windvektor aus zwei Elementen besteht: Einer langsam veränderlichen Komponente und einer schnell veränderlichen, zufälligen Störung (**Bild 5**). Daraus entnehmen wir, dass, je turbulenter die Luftmassenbewegung ist, desto größer ist das zufällige Inkrement. Die drei Windkomponenten werden als mathematisch unabhängig voneinander angenommen. Alle drei gehorchen dem gleichen mathematischen Gesetz.
Als Segelflieger sind wir es nicht gewohnt, die Luftmassenbewegung dreidimensional zu erfassen. Die Projektion des Windvektors auf die (x, y)-Ebene ist das, was wir in der Fliegerei üblicherweise als „Wind" bezeichnen. Im

6. Zeitverlauf der Luftmassenbewegungen Vertikal- und Horizontalgeschwindigkeit und Richtung mit verschiedenen SIGWIND-Werten (0.001, 0.05, 0.1, 0.5)

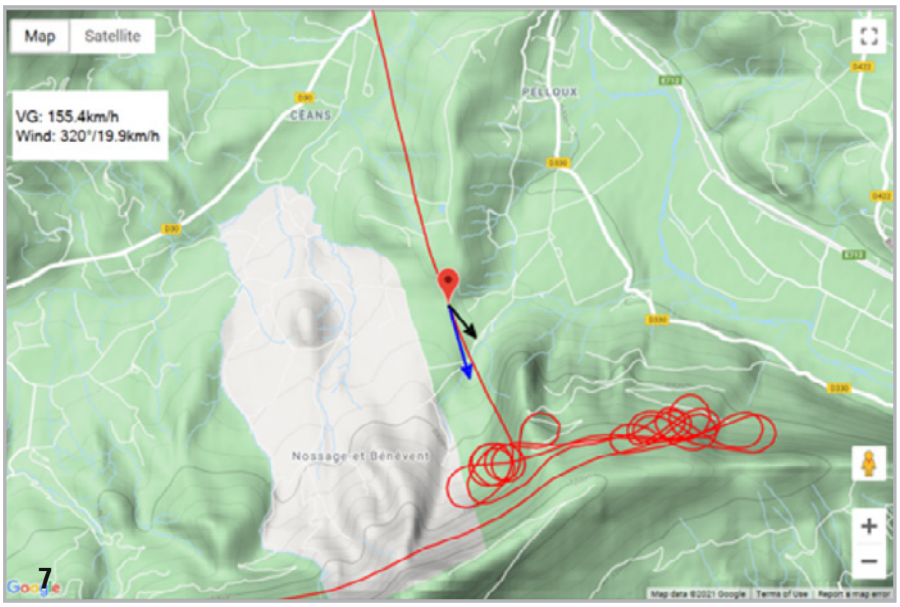


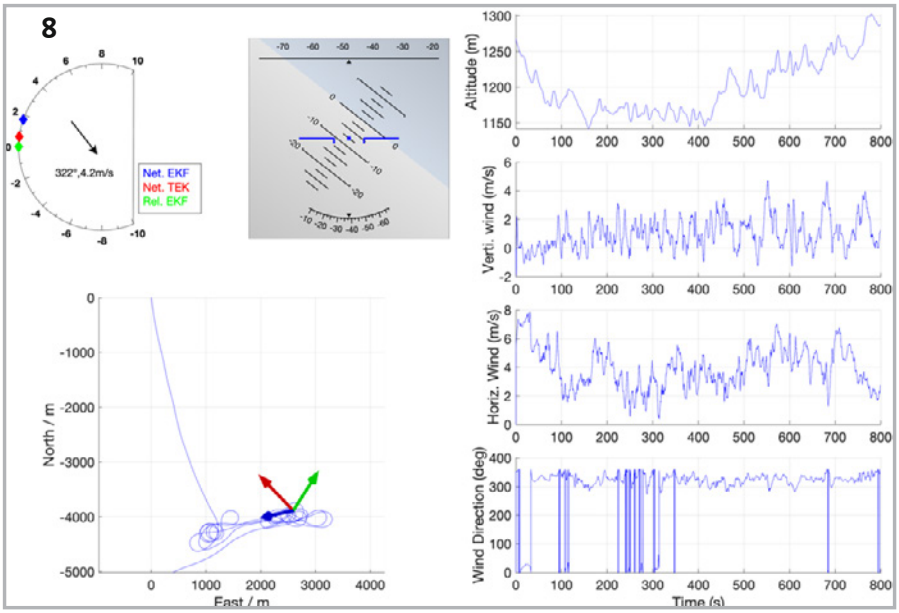
6

Abschnitt über das dreidimensionale Winddreieck haben wir gesehen, dass die vertikale Windkomponente dz das Nettosteigen ist, vtas z ist die Sinkgeschwindigkeit und vg z das effektive Steigen des Flugzeuges.

Die Signale aus dem HAWK müssen in eine interpretierbare Anzeige umgewandelt werden. Dies ist im S10/S100 eine Nettovarioanzeige mit einer integrierten Windanzeige. Bei einer turbulenten Luftmasse wird die Anzeige zu nervös und ist nicht mehr ablesbar. Mit einem Instrumentenparameter (SIGWIND) kann die Anzeige den Bedürfnissen des Piloten angepasst werden. **Bild 6** (*vorherige Seite*) zeigt, wie sich verschiedene SIGWIND-Parameter auf die Anzeige auswirken: Die oberste Kurve entspricht der Nettovarioanzeige, darunter sind Stärke und Richtung des horizontalen Windes zu sehen. Wählen wir einen sehr kleinen Wert von SIGWIND = 0.001 (schwarze Kurve), wertet der Algorithmus große Abweichungen als unwahrscheinlich und unterdrückt sie. Das Verhalten entspricht etwa einer Varioanzeige mit zu großer Zeitkonstante. Nimmt man nun einen sehr großen Wert, z. B. SIGWIND = 0.5 (rote Kurve), reagiert der Algorithmus reagiert sehr schnell auf jede Änderung (entsprechend einer sehr nervösen Varioanzeige).

Der Wert 0.05 (blaue Kurve) ergibt eine subjektiv gut brauchbare Anzeige. Die Testflüge haben gezeigt, dass die Wahl des Windparameters nicht sehr kritisch ist. Die meisten Piloten haben einen Wert zwischen 0.05 und 0.2 gewählt. Der Wert von 0.07 war der häufigste Wert.



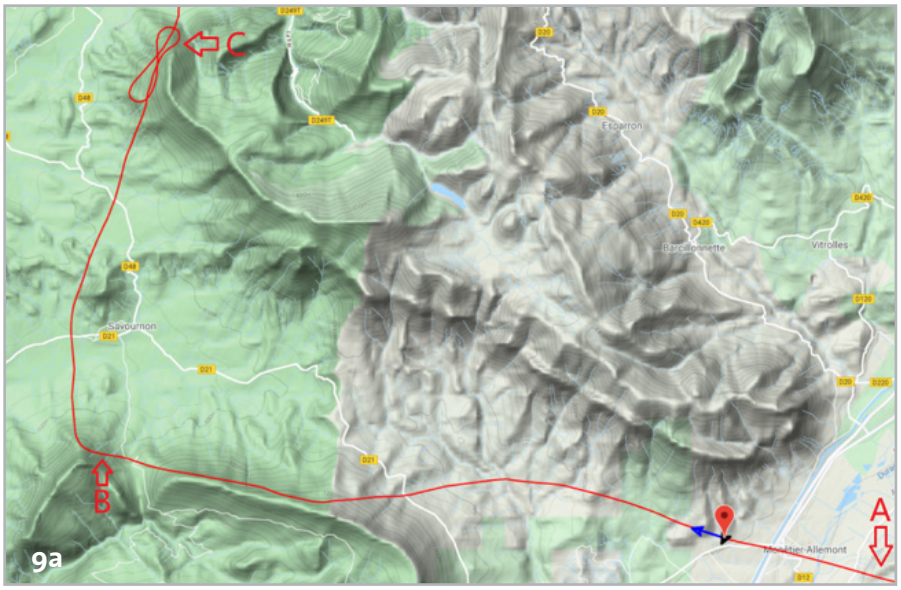


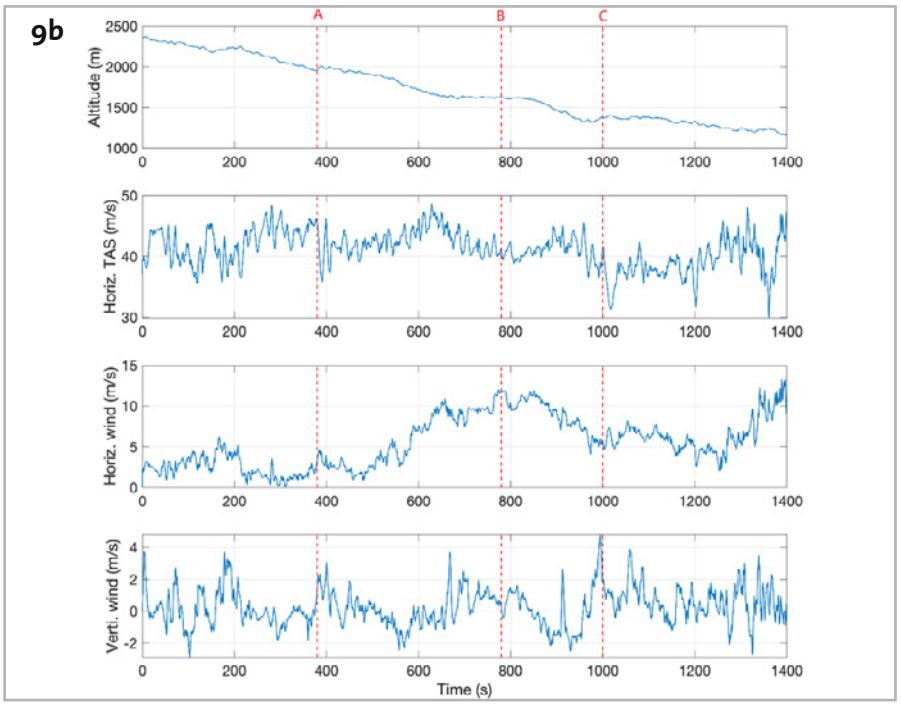
7. Flug von K. Ohlmann am 31.08.2020 ab Serres. 8. Der Verlauf von Höhe, vertikale Windgeschwindigkeit und Horizontalwind spiegelt die Aussagen von Klaus zu den schwachen Aufwinden wider. 9a/b. Anflug von der Durance nach Serres. 10. Ausschläge des TEK-Varios beim Durchfliegen einer Horizontalböe

Experimentelle Resultate

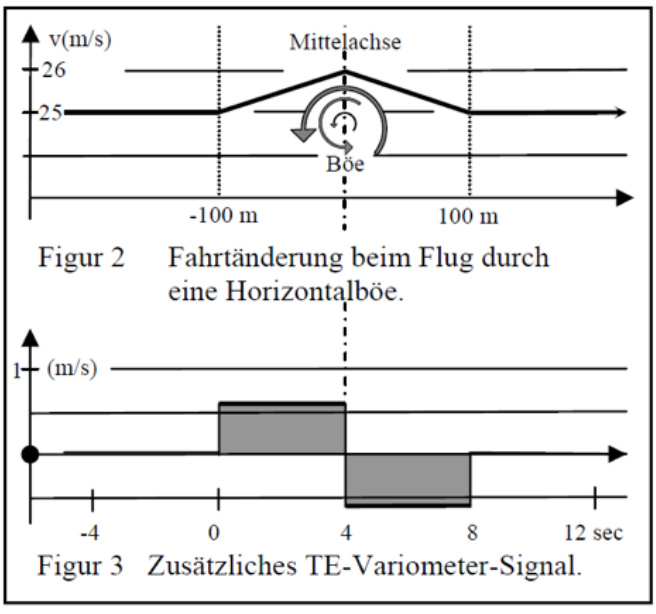
Der HAWK wurde in dem letzten Jahr von verschiedenen Piloten getestet. Hier sind einige interessante Analysen aus diesen Flügen. Zuerst ein Flug von Klaus Ohlmann am Hang der Chabre bei schwachen Bedingungen (**Bild 7 und 8**). Kommentar von Klaus Ohlmann: „Bei zunächst sehr müden Hangaufwinden konnte man sehr schön direkt ablesen, wo es gerade noch ging, weil ein bisschen Wind, und wo nicht, da Wind zu schwach. Hangwind an der Chabre, gemischt mit Thermik mit sehr mäßigem Nordwind und dann unter Cumuli schwacher Ostwind an den Südosthängen bei Orpierre. Das sollte gut im ersten Log sichtbar sein."

Beim gleichen Flug zeigte sich schön der Düseneffekt im Tal südöstlich von Serres (**Bild 9a und 9b**). Zitat Klaus Ohlmann: „Der zweite Log zeigt sehr schön den Anflug von der Durance nach





10



Serres mit der bei Nordwind typischen ausgeprägten Windzunahme und Westdrehung im Venturi zwischen der Badewanne und der Créte de Selles. Wirklich fantastisch dieses Phänomen live im Instrument mitzuverfolgen. Neben der aktuell wertvollen Information zum Anfliegen des richtigen Hangs ergibt sich damit eine ausgezeichnete Möglichkeit, die komplexen Strömungsverhältnisse im Gebirge zu analysieren und zu verstehen."

Vergleich von TEK und HAWK

Das TEK-Vario und das HAWK messen die gleiche physikalische Größe, aber mit völlig unterschiedlichen Messmethoden. Für einen sinnvollen Vergleich der Resultate muss deshalb auf Unterschiede der Messmethoden eingegangen werden.

Ein konventionelles TEK misst die vertikale Luftbewegung, basierend auf dem Gesetz der Energieerhaltung. In perfekt ruhiger Luft wird eine Änderung der kinetischen Energie (Geschwindigkeit) kompensiert durch eine genau gleich große Änderung der potenziellen Energie (Höhe). Wenn man am Knüppel zieht und deshalb das Flugzeug steigt, bleibt der Zeiger auf Null. Das TEK-Vario ist perfekt kompensiert.

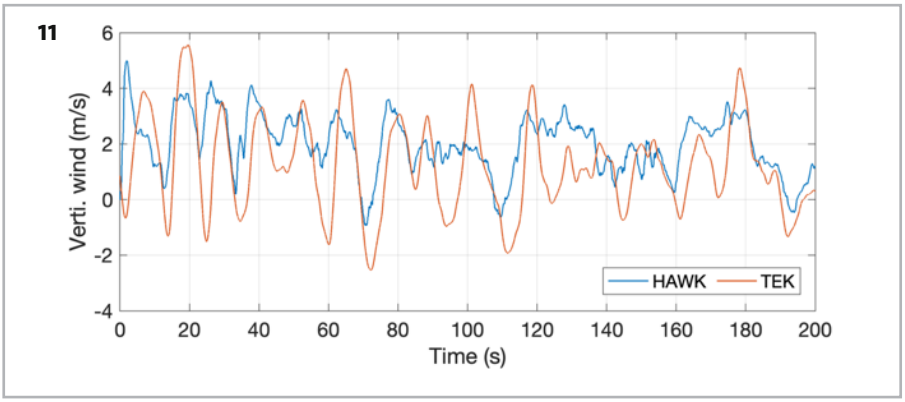
Aber auch ein perfekt kompensiertes TEK zeigt uns horizontale Windänderungen (Böen) als Steigen (wenn die Windscherung positiv ist) oder Sinken an, obwohl keine vertikale Luftbewegung vorhanden ist (**Bild 10**). Diese Fehlanzeigen sind durch die Messmethode bedingt (eindimensionale Energie Erhaltung) und lassen sich nicht kompensieren.

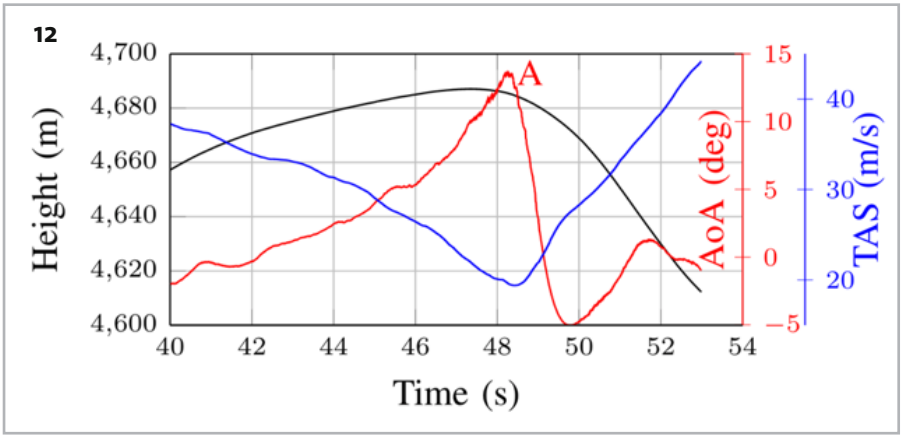
Das HAWK schätzt gleichzeitig alle drei Dimensionen der Luftmassenbewegung. Es ist so konstruiert, dass es zeitveränderliche Luftmassen korrekt verarbeitet. Beim Fliegen ist das der entscheidende Vorteil des „HAWK-Varios". Zeigt es beim schnellen Voraus-

flug ein Steigen an, so ist der angezeigte Steigwert gleich dem Steigen der vertikalen Luftmasse, unabhängig von der Geschwindigkeit des Flugzeuges und horizontalen Geschwindigkeits- oder Flugbahnänderungen.

Aus dem Gesagten folgt: Wegen des systematischen Fehlers des TEK ist ein Vergleich der beiden Varios im Übergang vom schnellen Geradeausflug zum Kreisen nicht sinnvoll. Jeder gute Pilot hat durch viel Übung gelernt, die Fehler seines Varios im Kopf zu „korrigieren". Das „HAWK-Vario" braucht keine Kompensation. Das ist in der Praxis ein Vorteil.

In **Bild 11** sind die Varioanzeigen des HAWK-(blau) und des TEK-Varios (rot) beim Kreisen einer ASH25 in einem schwachen, ruppigen Bart dargestellt.





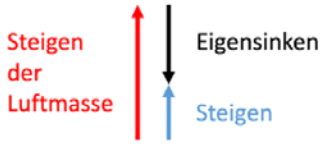
11. Varioanzeigen des HAWK-(blau) und des TEK-Varios (rot) beim Kreisen.
12. Strömungsabriss

Kommentar zur Tabelle

Der als „Netto-Luftmassensteigen" bezeichnete Steigwert des HAWK-Vario ist in der zweiten Reihe dargestellt. Der Vergleichswert des TEK-Varios ist in der vierten Reihe dargestellt. Die Differenz der Kurzzeitwerte beider Steigwerte weicht beträchtlich voneinander ab. In der Tabelle sind die Mittelwerte der Signale berechnet. Das HAWK zeigt 2,0 m/s steigen. Subtrahiert man das Eigensinken des Flugzeuges -1,3 m/s, so erhält man das wirkliche Steigen von 0,7 m/s. Das Eigensinken hängt u. a. von der Steilheit beim Kurbeln und dem Schiebewinkel (Faden) ab. Wenn man mit einem Schiebewinkel von 10 - 15 Grad kreist, erzeugt das einen zusätzlichen Widerstand. Das HAWK rechnet ein stärkeres Sinken aus, das mit einem größeren Steigen rechnerisch kompensiert wird, damit das Winddreieck erfüllt ist. In dem vorliegenden Flug ist der Wert vtas um 0,2 m/s größer als der aus der Kreisflugpolare errechnete Wert der durchschnittlichen Sinkrate von 1,1

Tabelle: Gemittelte Werte von Steigen und Sinken

Gemittelte Werte in der dargestellten Zeitspanne von 9.0s und 201.3s	
Durchschnittliches mittleres Steigen (v_g):	0.6 m/s
Durchschnittliches Netto Luftmassensteigen (HAWK):	2.0 m/s
Durchschnittliches Eigensinken des Flugzeuges v_{tas} (HAWK):	-1.3 m/s
Durchschnittliches Netto Luftmassensteigen (TEK):	1.2 m/s
Durchschnittliche Sinkrate (nach Kreisflugpolare):	-1.1 m/s
Durchschnittliche relatives Vario:	0.9 m/s
Durchschnittliche (d_z – TEK):	0.8 m/s



m/s. Dieses Verhalten wurde bei Testflügen verifiziert. Das TEK-Vario zeigt einen Netto Steigwert von 1,2 m/s. Subtrahiert man davon die durchschnittliche Sinkrate von -1,1 m/s so zeigt das TEK-Vario einen zu kleinen Wert an.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Die vorhandenen Daten ermöglichen eine Fülle weiterer Auswertungen. HAWK kennt die Lage des Flugzeuges im Raum und kann zur Darstellung eines künstlichen Horizontes genutzt werden. Ein anderer wichtiger Parameter ist der Anstellwinkel. **Bild 12** zeigt, wie bei abnehmender Geschwindigkeit der „angle of attack“ (AoA) zunimmt, bis die Strömung abreißt.

Der AoA könnte ganz verschieden genutzt werden, so einmal als klassische Stallwarnung. Alle relevanten Werte sind im HAWK vorhanden und können eingerechnet werden. Es gibt beispielsweise beim Fliegen am Hang in böigen Bedingungen immer wieder Situationen, bei welchen der AoA zu groß wird, ohne dass sich dies ankündigt – auch bei vermeintlich genug Geschwindigkeitsreserve. Strömungsabriss am Hang oder bei Außenlandungen ist eine viel zu häufige Ursache von schweren Unfällen.

Es ist denkbar, dass eine AoA-Information je nach Flugphase anders genutzt wird. Beim Fliegen in Bodennähe (beim Start, im Landeanflug und beim Hangflug) wird vor dem Überschreiten eines kritischen Anstellwinkels gewarnt. Dies könnte z. B. durch Vibrieren des Steuerknüppels angezeigt werden.

Wäre es denkbar, dass beim Kreisen in der Thermik der optimale Anstellwinkel angezeigt wird? Auch eine Konfigurierung nach den Bedürfnissen des Piloten wäre möglich. So könnte z. B. für Flugschüler eine andere Warnstufe gewählt werden als für einen Wettbewerbspiloten. ♦

Hintergrund

In den letzten Jahren hat das Interesse an einer genauen und schnellen Windmessung sehr stark zugenommen. Etwa parallel und unabhängig voneinander haben Benjamin Bachmeier und Meyr & Huang an der Aufgabe „Windmessung“ gearbeitet und sind zu vergleichbaren Ergebnissen gekommen. Aus persönlichem Interesse haben wir uns nachträglich ausgetauscht, um die Ergebnisse zu vergleichen.

Das Gerät anemoi von Benjamin Bachmeier ist ein autarkes Gerät zur sekundengenauen Windmessung. Unsere Lösung, HAWK, schätzt dreidimensionale Luftmassenbewegung und liefert damit eine Windmessung (x- und y-Komponente) sowie zusätzlich die vertikale z-Komponente: eine Varioanzeige. HAWK läuft auf den Plattformen S10/S100 von LXNAV und wird im Verlaufe dieses Jahres auf den LX-9000 Geräten verfügbar sein.

Literatur

Dinges, M. (2003). Das Totalenergievariometer im Strömungsfeld der Thermik. XXVII OSTIV Congress. Leszno, Poland.

P. Huang and H. Meyr and M. Dörpinghaus and G. Fettweis. (2020). Observability Analysis of Flight State Estimation for UAVs and Experimental Validation. 2020 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Paris, France.

Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering.

Allwetterschutzbezüge

▪ Atmungsaktiv ▪ Absolut wasserdicht ▪ Zweischichtsystem ▪ Viele Detaillösungen ▪ Exakte Passgenauigkeit ▪ Verstärkung für lange Lebensdauer ▪ 4 verschiedene Versionen

Staubbezüge

▪ Bieten optimalen Schutz in der Halle ▪ Reißfestes Material ▪ Verstärkung an beanspruchten Stellen

Vereins-Angebot

5% Rabatt auf 2 Stk.
10% Rabatt auf 3 Stk.
15% Rabatt auf 4 Stk.
auf den Gesamtpreis

Staubbezüge ab 357€ zzgl. MwSt

Haubenbezüge

▪ Wahlweise in Allwetter- oder Staubbezugsmaterial ▪ 100% Schutz vor Wasser, Staub & UV-Strahlung ▪ Fester Sitz durch “quick tight” ▪ Kleines Packmaß

Der perfekte Schutz für Dein Flugzeug

CLOUDDANCERS

▪ Alle Preise inklusive Befestigungsmaterial und Packtasche
▪ Passgenaue Form durch CAD-Design und digitalen Zuschnitt
▪ Über 150 Typen lieferbar, Sonderanfertigungen möglich

www.clouddancers.de
+49 176 245 243 58 ▪ info@clouddancers.de