

Windmesssysteme im Vergleich

1. Windreader

Bisher war der Windreader praktisch die einzige Möglichkeit, im Rahmen eines Ballonwettkampfes die lokalen Winde bis auf eine Höhe von maximal 2000 m zu messen. Dabei wird ein Pinballon von normierter Größe losgelassen und mit einem Theodoliten verfolgt. Grundlage, um aus diesen Messresultaten die Winde berechnen zu können, ist die Annahme, dass der Pinballon mit einer bekannten konstanten Geschwindigkeit aufsteigt. Misst man in regelmässigen zeitlichen Abständen den Azimut- und Elevationswinkel, so ergibt sich der Ort des Pinballons im Raum durch die Berechnung des Durchstosspunktes eines Strahls mit dem gemessenen Winkel durch die Ebene in der Höhe, die der Pinballon zu diesem Zeitpunkt erreicht hat. Aus der Abfolge der so berechneten Punkte kann man die Richtung und die Geschwindigkeit des Windes zwischen den Messpunkten berechnen.

Es hat sich eingebürgert, eine Steiggeschwindigkeit von 2.33 m/s für einen Pinballon mit 40 cm Durchmesser anzunehmen. Die wahre Steiggeschwindigkeit hängt insbesondere vom momentanen Luftdruck und der Umgebungstemperatur ab. Aus einer Abweichung der realen Steiggeschwindigkeit vom angenommenen Wert folgt, dass die berechneten Windgeschwindigkeiten dazu proportional falsch sind und die Höhenangaben zu den Windrichtungen ebenso. Die Abfolge der gemessenen Windrichtungen ist aber korrekt, solange die reale Steiggeschwindigkeit konstant ist.



Fig. 1: Messung mit Windreader (links) und Windsond (Mitte) mit hoch integrierter Elektronik (rechts)

2. Windsond-System

Das Windsond-System wurde von Anders Petersson (Schweden) entwickelt. Eine hoch integrierte Elektronik mit GPS, Drucksensor, Temperatursensor und optional Luftfeuchtigkeits-sensor sind zusammen mit einem Hochfrequenzsender und -empfänger auf einer kleinen Platine untergebracht (Figur 1, rechts). Diese Elektronik, inklusive der wieder-aufladbaren Batterie hat ein Gewicht von knapp 10 g. Die Elektronik ist in einem Styroporbecher untergebracht, der an einem Pinballon auf die Reise geschickt wird (Figur 1 Mitte). Während des ganzen Aufstiegs übermittelt der Hochfrequenzsender die Messdaten auf einen kleinen Empfänger, der an einem Messcomputer am Boden angeschlossen ist. Die horizontale Position der Sonde wird mit GPS-Genauigkeit (d. h. ca. +/- 5 m) bestimmt und die Höhe wird aufgrund der Druckmessung normiert auf die Höhe des Startplatzes übermittelt. Dadurch ergeben sich Windprofile mit einer weitaus geringeren Unsicherheit, als wir uns von Windreadermessungen gewohnt sind (Figur 2).

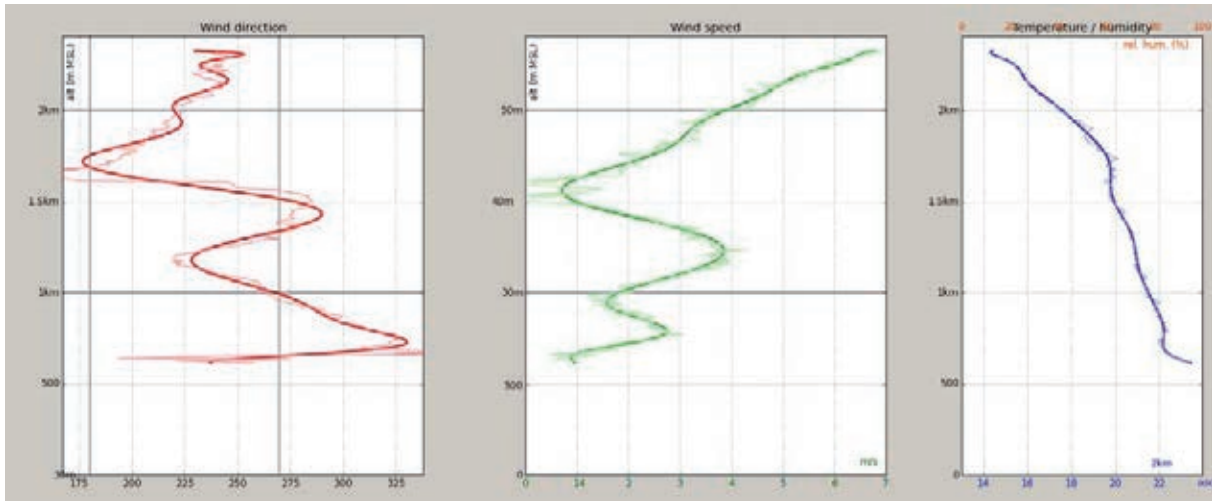
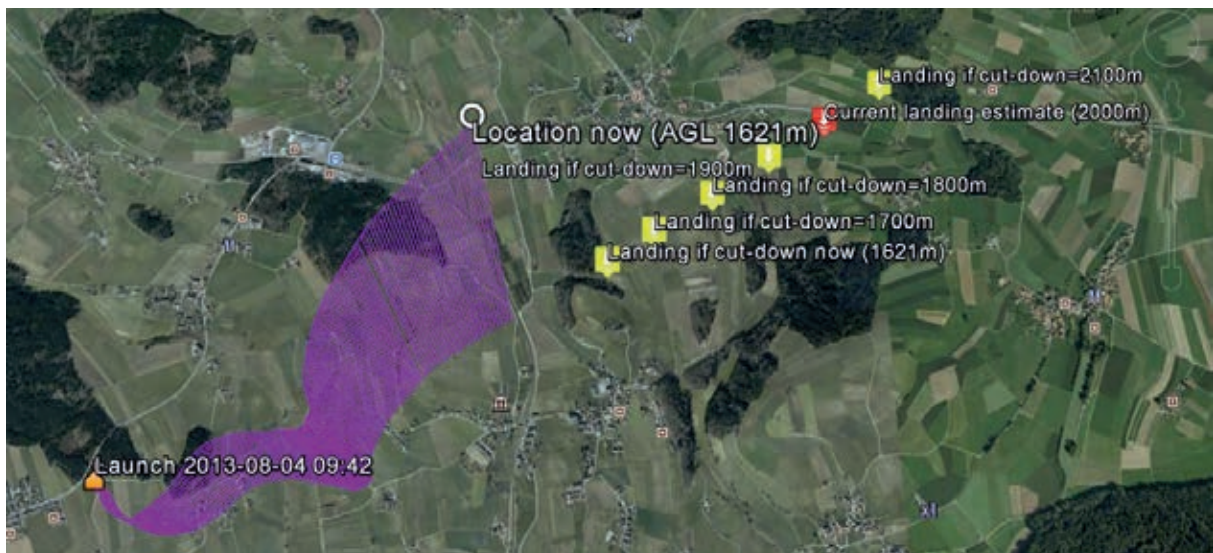


Fig. 2: Windsondmessung: Windrichtung (links), Windgeschwindigkeit (Mitte) und Temperatur (rechts)

Natürlich ist eine derartige Sonde nicht ganz billig und deshalb nicht unter Wegwerfmaterial einzuordnen. Damit man eine gute Chance hat, die Sonde wieder zu finden, berechnet der Computer während des ganzen Aufstiegs, wo man die Sonde voraussichtlich etwa suchen müsste, wenn der Abstieg auf einer bestimmten Höhe beginnen würde. Man kann sich dies auf einem Google Earth Ausschnitt anzeigen lassen (Figur 3).



Figur 3: Google Earth Darstellung einer Windsondmessung mit voraussichtlichen Sonden-Landeorten

Entweder auf einer vorprogrammierten Höhe, oder auf Knopfdruck am Messcomputer wird der Nylonfaden, an dem die Sonde am Pinballon befestigt ist, durchgeschmolzen und die Sonde fällt im freien Fall auf die Erde zurück. Dank dem geringen Gewicht pendelt sich die Fallgeschwindigkeit zwischen 7 m/s und 8 m/s ein. Die Elektronik übersteht den Aufprall des Styroporbechers normalerweise ohne Schaden. Während des ganzen Abstiegs, wie auch am Boden liegend übermittelt die Sonde ihre Position. Zudem macht sie sich am Boden, auf Befehl vom Messcomputer aus mit einem Beep und einem Lichtblitz bemerkbar. Bisher konnten wir die Sonde immer unbeschadet bergen.



3. Unsicherheiten bei den Windmessungen

Da beim Windsond-System die Ortsbestimmung auf GPS-Daten basiert und die Höhe der Sonde aus barometrischen Daten errechnet wird, weisen die damit bestimmten Windprofile eine sehr geringe Unsicherheit aus. Nur die notwendige Mittelung der Daten kann in einigen Fällen zu Ungenauigkeiten führen (s. unten)

Demgegenüber sind die Windreadermessungen mit einigen Unsicherheiten behaftet: Mit zunehmender Distanz des Pinballons vom Theodoliten werden die Windrichtungen und Geschwindigkeiten aus immer kleiner werdenden Änderungen der Azimut- und Elevationswinkel bestimmt. Dadurch nimmt die Unsicherheit der so berechneten Windwerte zu. Zudem wird mit abnehmendem Elevationswinkel der Durchstosspunkt durch die Höhenebene des Pinballons immer schleifender und dadurch die Ortsbestimmung unsicherer. Eine Abschätzung dieser Unsicherheiten ist sehr schwierig, solange man nicht für eine Vielzahl von Windreadermessungen die wahren Windprofile kennt.

Zu unserer grossen Überraschung zeigten die ersten Vergleiche zwischen den beiden Messsystemen schon in Bodennähe recht unterschiedliche Windrichtungen. Diese unterschiedlichen Windrichtungen werden verständlich, wenn man sich die Steiggeschwindigkeit aus den Windsonddaten betrachtet (Figur 4)

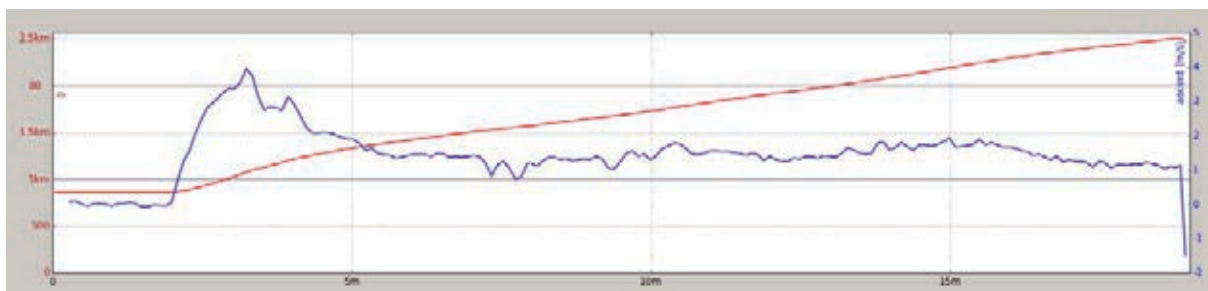
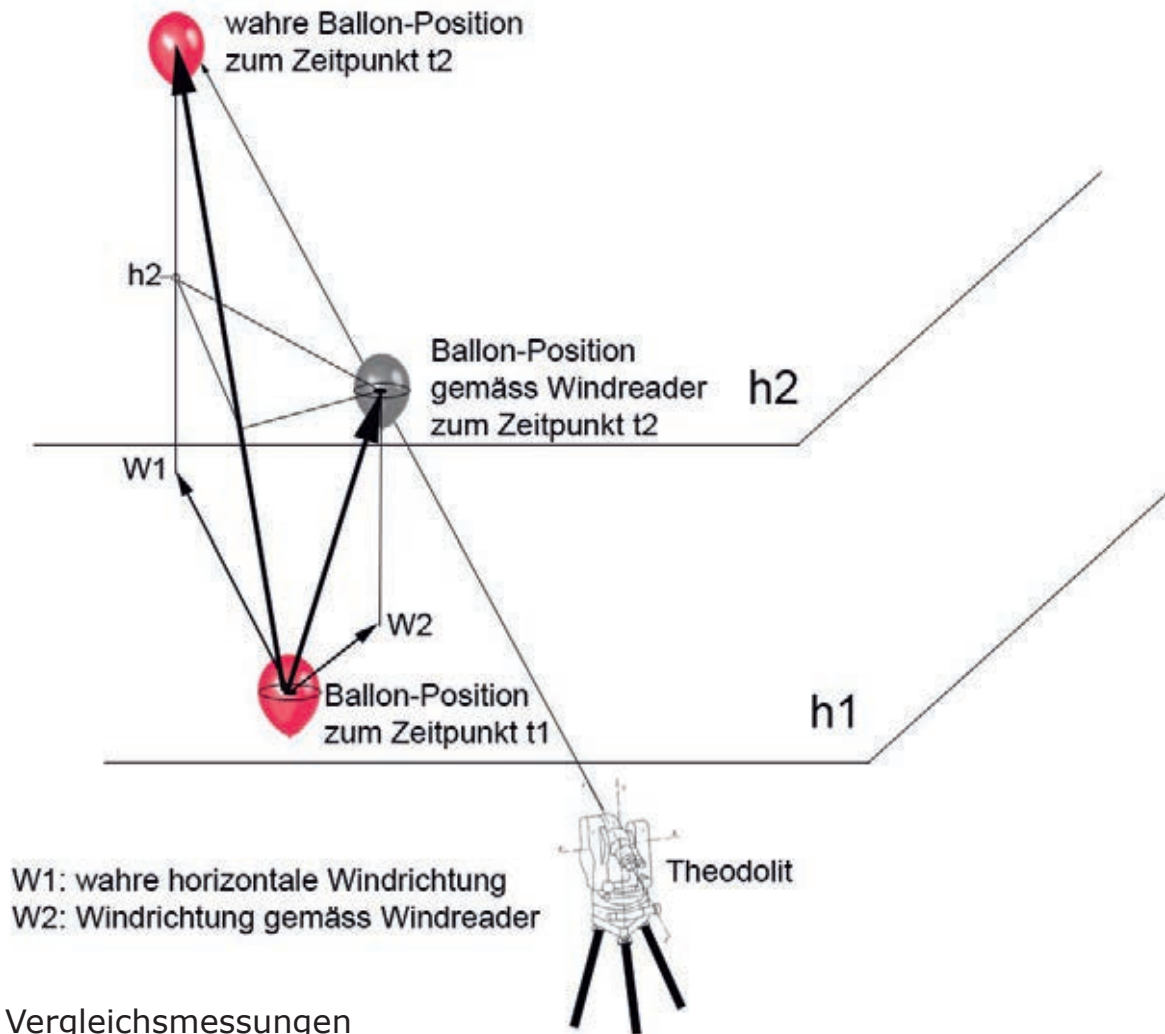


Fig 4: Steiggeschwindigkeit (blaue Kurve und rechte Skala [m/s]) und Höhe MSL (rote Kurve, linke Skala [m oben km]) in Abhängigkeit von der Messzeit [min]. Maximalhöhe: 1650 m AGL.

Die Steiggeschwindigkeit des Pinballons erreichte bei diesen atmosphärischen Bedingungen (21. 08. 2013: heisses, hochdruckbestimmtes Sommerwetter) ein Maximum von mehr als 4 m/s. Danach nahm die Steiggeschwindigkeit stark ab und war teilweise unterhalb von 1 m/s. Die mittlere Steiggeschwindigkeit betrug 1.6 m/s. Derart grosse Schwankungen verletzen die Grundannahme für den Windreader (konstante Steiggeschwindigkeit) deutlich. Bei den Windreaderdaten wirkt sich dies nicht nur auf die Genauigkeit der Windgeschwindigkeit und Höhenangaben aus, sondern auch die Windrichtungsangaben werden dadurch fehlerbehaftet. Dies können wir mit einem Gedankenexperiment besser verstehen: Gehen wir davon aus, dass bis zu einem Zeitpunkt t_1 die Steiggeschwindigkeit des Pinballons mit der Vorgabe in der Software übereinstimme. Bis zu diesem Zeitpunkt hat die Windreader-messung die korrekte Position des Pinballons im Raum ermittelt. Nach dem Zeitpunkt t_1 werde nun aber die Steiggeschwindigkeit stark beschleunigt. Nach dem nächsten Messzeitintervall ist der Pinballon also deutlich höher, als auf Höhe h_2 (vgl. Figur 5), in der ihn die Windreadersoftware annimmt. Diese berechnet die (scheinbare) Position des Pinballons im Raum aus dem Durchstosspunkt eines Strahls mit den gemessenen Elevations- und Azimutwinkeln durch die Ebene h_2 . Die wahre Position des Pinballons ist dazu nicht nur in der Höhe, sondern auch horizontal verschieden (ausser, wenn der Elevationswinkel zu diesem Zeitpunkt gerade 90° betragen würde). Entsprechend sind die so ermittelten als horizontal angenommenen Winde fehlerbehaftet.



4. Vergleichsmessungen

Für die Windsondmessung ist die Steiggeschwindigkeit nicht von Belang. Es ist deshalb möglich, denselben Pinballon für eine gleichzeitige Windreader- und Windsondmessung zu verwenden. Natürlich wird die Steiggeschwindigkeit durch das Gewicht der Sonde reduziert (Elektronik + Styroporbecher ca. 12 g). Der Pinballon müsste etwa 10 l mehr Inhalt haben, damit die Auftriebskraft etwa identisch zu einem Windreader-Normballon wäre. Da es die Windsonddaten aber erlauben, die Steiggeschwindigkeit zu messen, kann man die Reduktion hinnehmen und Windreader-Daten entsprechend korrigieren, respektive bei folgenden Messungen die voraussichtliche, reduzierte Steiggeschwindigkeit im Windreader-Messprogramm vorgeben.

Wir haben verschiedene solche Vergleichsmessungen durchgeführt. Hiezu wurden die Höhenangaben und die Windgeschwindigkeiten der Windreaderdaten mit der mittleren Steiggeschwindigkeit aus den Windsonddaten skaliert. In den meisten Fällen betrug die mittlere Steiggeschwindigkeit des Pinballons mit Sonde zwischen 1.7 m/s und 1.9 m/s. Es gab aber auch Ausnahmen: Am 25. Juli 2013 erreichte ein Pinballon eine maximale Steiggeschwindigkeit von ca. 6 m/s bei ca. 500 m AGL. Die mittlere Steiggeschwindigkeit über die Zeit, in der wir diesen mit dem Windreader verfolgen konnten, betrug 3.7 m/s. In grösserer Höhe war die Steiggeschwindigkeit wieder im Bereich 1.7-1.9 m/s (Fig. 6)

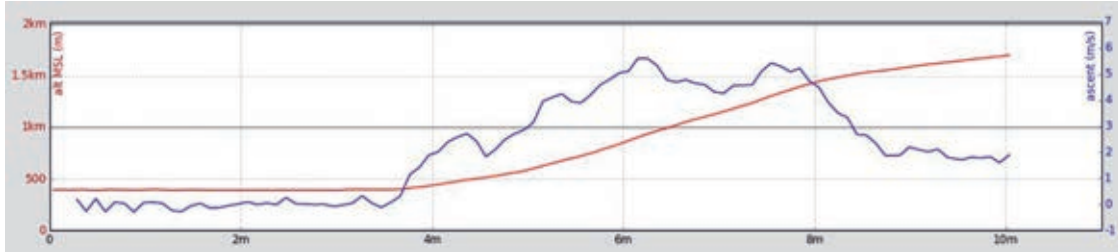


Fig 6: Steiggeschwindigkeit (blaue Kurve und rechte Skala [m/s]) und Höhe MSL (rote Kurve, linke Skala [m oben km]) in Abhängigkeit von der Messzeit [min]. Die höchste Steiggeschwindigkeit von ca. 6 m/s erreichte der Pinballon bei ca. 900 m MSL oder 500 m AGL.

Die Unterschiede in den gemessenen Windrichtungen waren in diesem Fall erheblich. Bei 500 m AGL betrug die Differenz 56 Grad (Fig. 7). Bei einem Wettkampf könnte eine derart falsche Richtungsangabe zu grosser Verwirrung führen.

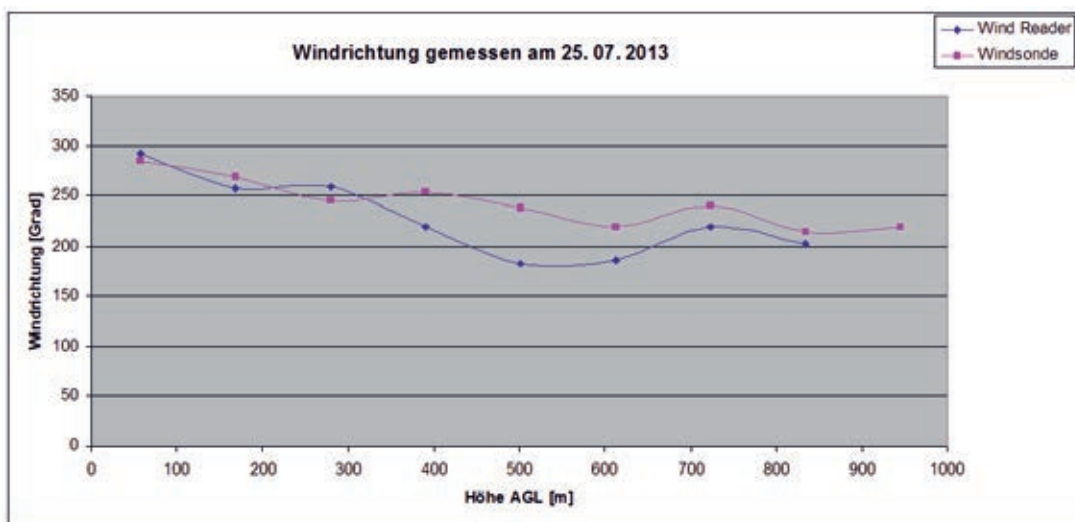


Fig 7: Windrichtung gemessen am 25. 07. 2013 mit dem Windreader und dem Windsond-System. Die maximale Differenz beträgt 56 Grad.

An der EM in Polen hatten wir am Morgen jeweils eine klare Inversionslage, was zu einer konstanten Steiggeschwindigkeit des Pinballons führte (Fig. 8). Da der Windreader nach einer Kompassnadel ausgerichtet wird und die Missweisung in Polen +5 Grad beträgt, wurden für den Vergleich alle Windreaderdaten um diesen Betrag korrigiert.

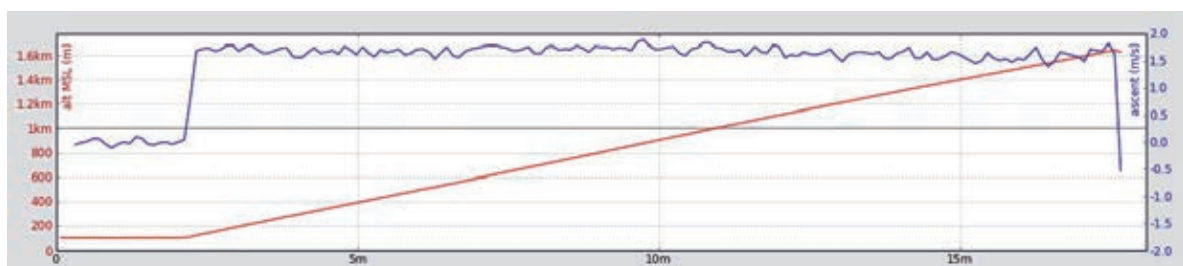


Fig 8: Steiggeschwindigkeit (blaue Kurve und rechte Skala [m/s]) und Höhe MSL (rote Kurve, linke Skala [m oben km]) in Abhängigkeit von der Messzeit [min] bei einer Inversionslage.

Bei diesen atmosphärischen Bedingungen ist die Übereinstimmung der Windrichtungen vom Windreader und Windsond-System recht gut (Fig. 9). Überraschend ist insbesondere, dass dies auch für grössere Höhen gilt. In diesen Höhen wird die Genauigkeit der Messung weitgehend von Präzision bestimmt, mit der die Person am Windreader, dem Pinballon zu folgen vermag.

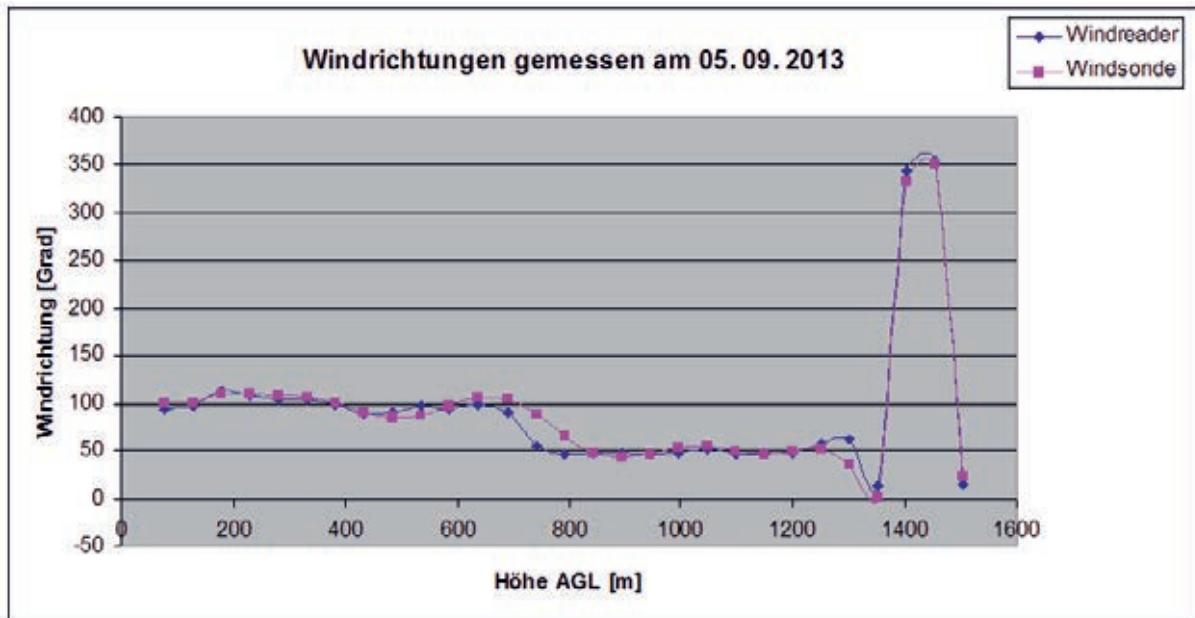


Fig 9: Windrichtung gemessen am 05.09.2013 mit dem Windreader und dem Windsond-System. Die Steiggeschwindigkeit des Pinballons war konstant bei 1.7 m/s

Die Genauigkeit der Windgeschwindigkeit hat im Wettkampf eine untergeordnete Bedeutung. Trotzdem ist es interessant, den Vergleich zwischen den beiden Systemen anzustellen (Fig. 10). Da die mit dem Windreader eine bestimmte Windgeschwindigkeit direkt proportional zur Steiggeschwindigkeit ist, und man diese im Normalfall nicht wirklich kennt, ist deren absolute Wert kaum zu nutzen. Demgegenüber kann man davon ausgehen, dass die mit dem Windsond-System ermittelten Windgeschwindigkeiten genau sind.

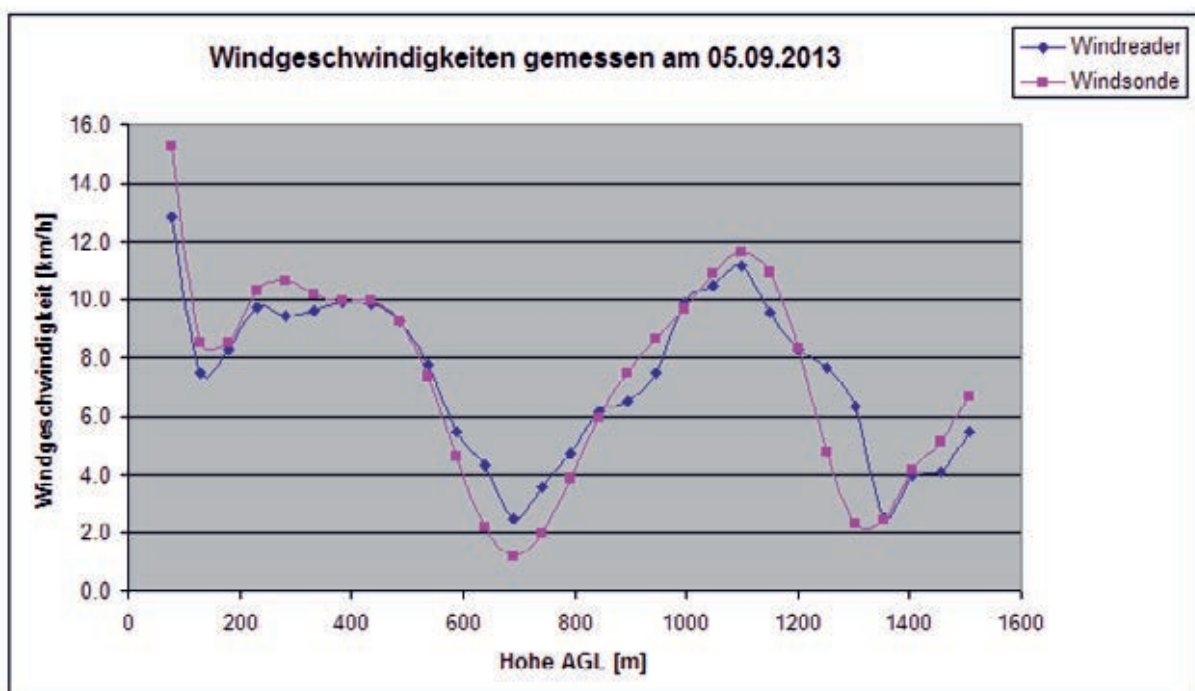


Fig 10: Windrichtung gemessen am 05.09.2013 mit dem Windreader und dem Windsond-System. Da die mit dem Windreader gemessenen Windgeschwindigkeiten mit der Steiggeschwindigkeit aus der Windsondmessung skaliert sind, hat dieser Vergleich nur geringe Aussagekraft.



Es gibt aber auch kleine Unsicherheiten bei den Windsond-Daten. Dies rührt daher, dass diese Daten gemittelt werden müssen. Hierzu wird ein Polynom höheren Grades durch die Messwerte gelegt. Dies hat den Nachteil, dass bei abrupten Richtungsänderungen diese durch das Polynom gerundet werden. Dies gilt insbesondere, wenn zwei solche Richtungsänderungen kurz hintereinander erfolgen. Es ist zu vermuten, dass bei der Messung vom 04.09.2013 zwischen 200 m und 300 m AGL die Windreaderdaten besser mit der Realität übereinstimmen, als die Windsonddaten.

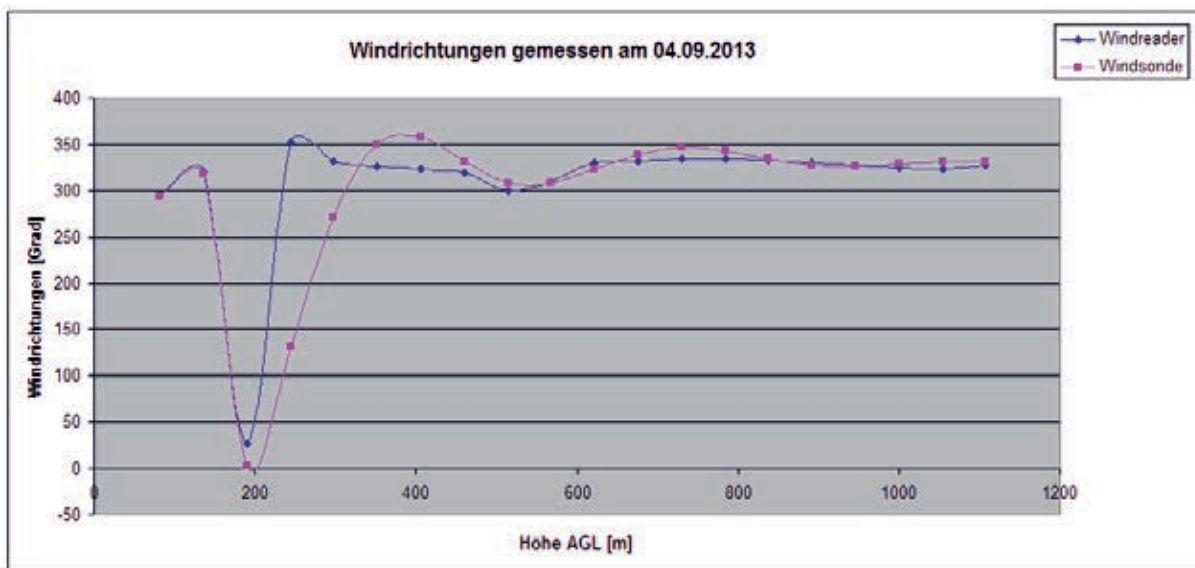


Fig 11: Windrichtung gemessen am 04.09.2013 mit dem Windreader und dem Windsond-System. Es ist zu vermuten, dass die Differenz zwischen 200 m und 300 m AGL weitgehend durch das Verfahren der Datenmittelung beim Windsond-System zustande kommt.

5. Zusammenfassung und Wertung

Die grösste Unsicherheit bei den Resultaten der Windreadermessungen ist nicht - wie bisher angenommen - eine Folge der begrenzten Präzision des Theodoliten beim Verfolgen des Pinballons, sondern resultiert aus der Ungewissheit, ob der Pinballon mit einer konstanten vertikalen Geschwindigkeit steigt. Ist dies nicht erfüllt, so können die gemessenen Windrichtungen empfindlich fehlerhaft sein.

Beim Windsond-System muss die Frage der Datenmittelung nochmals überdacht werden, da bei abrupten Änderungen der Windrichtungen, das System dies nicht genügend präzise darstellen kann.

Da beim Windsond-System die Sonden nach der Messung gesucht werden müssen, ist das Management mit dieser Messmethode oftmals aufwendiger und insbesondere der notwendige Zeitaufwand nicht abschätzbar. Zudem ist mit manchen Verlusten an Sonden zu rechnen (in Polen haben wir eine Sonde verloren).

Die Unsicherheit bei den Daten des Windsond-Systems ist deutlich geringer als bei jenen des Windreaders.

Dank: An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Franziska Grünig bedanken. Sie hat alle Windreadermessungen mit viel Geduld und hoher Präzision durchgeführt.

Léon André