

ForWind - Zentrum für Windenergieforschung,
Universität Oldenburg

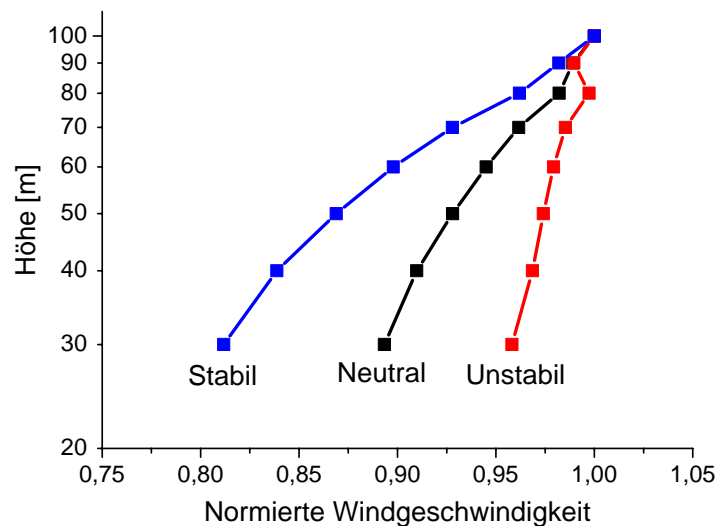
ForWind Bericht 2004-02

Bestimmung von Wärme- und Impulsfluss in der marinen atmosphärischen Grenzschicht für die Offshore-Windenergienutzung (BAGO)

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt, gefördert unter Az: 21223 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Bernhard Lange und Dipl.-Phys. Saskia Tautz



Oldenburg, November 2004

Bezugsmöglichkeit:

ForWind - Zentrum für Windenergieforschung
Marie-Curie-Straße 1
26129 Oldenburg

Tel +49 (0)441 36116-721
Fax +49 (0)441 36116-739
info@forwind.de

www.forwind.de

ForWind - Zentrum für Windenergieforschung,
Universität Oldenburg

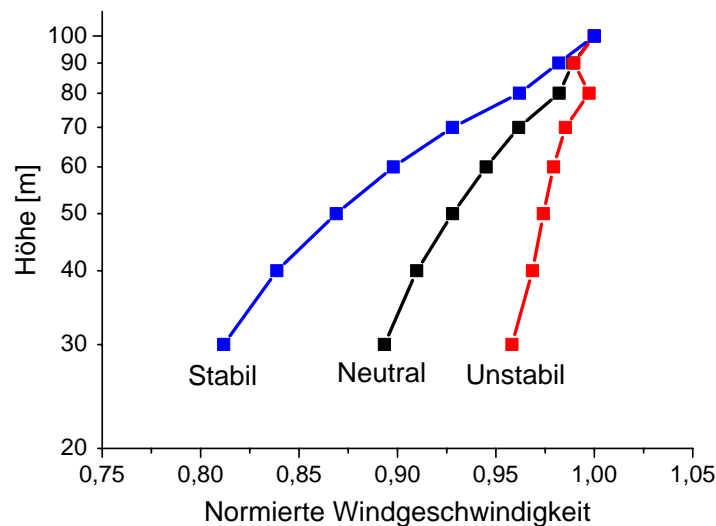
ForWind Bericht 2004-02

Bestimmung von Wärme- und Impulsfluss in der marinen atmosphärischen Grenzschicht für die Offshore-Windenergienutzung (BAGO)

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt, gefördert unter Az: 21223 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Bernhard Lange und Dipl.-Phys. Saskia Tautz



Oldenburg, November 2004

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



| | | | | | |
|----|--------------|---------|-------------|-------------|--------------------|
| Az | 21223 | Referat | 24/0 | Fördersumme | 14.760,00 € |
|----|--------------|---------|-------------|-------------|--------------------|

Antragstitel **Bestimmung von Wärme- und Impulsfluss in der marinen atmosphärischen Grenzschicht für die Offshore-Windenergienutzung**

Stichworte Energie, Wind, regenerativ

| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) |
|------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 13 Monate | 21.05.2003 | 30.06.2004 | 1 |

Zwischenberichte

| | | | |
|------------------------------|--|----------------|--------------------|
| Bewilligungsempfänger | Carl von Ossietzky Universität Oldenburg | Tel | 0441/798-3927 |
| | Institut für Physik | Fax | 0441/798-3326 |
| | Abteilung Energie- und Halbleiterforschung | Projektleitung | Dr. Bernhard Lange |
| | Carl-von-Ossietzky-Str. 9 – 11 | Bearbeiter | Dr. Bernhard Lange |
| | 26129 Oldenburg | | |

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Ein bedeutender Teil der Energieversorgung Deutschlands soll in Zukunft durch die Nutzung der Windenergie auf See bestritten werden. Die Bundesregierung hat in ihrer 'Strategie zur Windenergienutzung auf See' ein Ziel von 20-25.000 MW installierter Leistung Offshore bis zum Jahr 2030 gesetzt. Dies entspricht einem Anteil am Stromverbrauch Deutschlands von ca. 15%. Damit wird die Offshore-Windenergienutzung eine wesentliche Komponente des Aufbaus einer nachhaltigen Energieversorgung in Deutschland und wird wesentlich zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes beitragen. Erste Schritte zum Erreichen dieses Ziels sind u.a. mit der Initiierung des Forschungsprogramms FINO (Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee) eingeleitet worden. Im Rahmen des FINO-Projektes werden Messungen der Windverhältnisse mit einem 100 m Messmast an einem Standort nördlich von Borkum durchgeführt.

Für einen langfristigen Umbau der Energieversorgung ist aber nicht nur eine Messung, sondern ein grundlegendes Verständnis der diesen Parametern zu Grunde liegenden Struktur der Strömung nötig. Nur so können Aussagen über andere Standorte, die zeitliche Entwicklung, das Verhalten bei Extrembedingungen, etc. gemacht werden. Damit wird die Voraussetzung geschaffen, um die Stromerzeugung aus Windenergie Offshore langfristig erfolgreich und effizient entwickeln zu können.

In dem Forschungsprojekt BAGO soll das Messprogramm auf der ersten FINO-Messstation vor Borkum um die Messung von vertikalen Wärme- und Impulsflüssen für die wissenschaftliche Forschung erweitert werden. Die gewonnenen Flussdaten sollen zusammen mit den ebenfalls erhobenen Profildaten auf der Basis der Monin-Obukhov-Theorie analysiert werden. Es soll insbesondere untersucht werden, ob die bedeutenden Abweichungen von der Theorie, die bei Messungen in der Ostsee festgestellt wurden, auch in der Nordsee auftreten.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das Projekt gliedert sich in drei Phasen: Vor Beginn der Messung werden die Instrumentierung geplant und koordiniert und die Instrumente kalibriert. Die Messungen am FINO-Mast werden im Rahmen des FINO-Projektes des BMU vom Deutschen Windenergie Institut (DEWI) durchgeführt und sind nicht Teil dieses Projektes.

Nach der Bereitstellung der Daten durch das DEWI wird eine Qualitätskontrolle der Messdaten durchgeführt. Gleichzeitig werden die Auswertelgorithmen zur Gewinnung von Wärme- und Impulsfluss entwickelt. Nach Ende der Messphase wird eine erste Auswertung der Daten vorgenommen. Das Projekt hat eine Gesamtlauzeit von 13 Monaten.

Ergebnisse und Diskussion

Die drei seit August 2003 auf der Messplattform FINO 1 installierten Ultraschallanemometer des Typs Gill R3-50 liefern hochaufgelöste Messwerte des dreidimensionalen Windvektors und der Temperatur. Sie wurden vor der Montage im Windkanal der Universität Oldenburg vermessen. Dabei wurde festgestellt, dass eine Nachkalibration der werksseitig kalibrierten Instrumente nötig ist. Es wurde ein Kalibrationsverfahren entwickelt, das eine dreidimensionale Korrektur des Windvektors bei vertretbarem Messaufwand ermöglicht. Aus den hochaufgelösten Messdaten wurden Zeitreihen von 10-minütigen Mittelwerten des Impulsflusses, Wärmeflusses und der atmosphärischen Stabilität abgeleitet.

Eine erste Auswertung der Daten zeigt für das mittlere vertikale Windprofil deutliche Abweichungen von der erwarteten Profilform. Bis zu einer Höhe von etwa 60 - 70 m zeigt das Profil eine annähernd lineare Form. Dieses Verhalten ähnelt den bei anderen Offshore-Messungen in der Ostsee gefundenen Abweichungen. Es führt zu einer Unterschätzung des Energieertrags eines Windparks aus niedrigen Messdaten. Während die Messmasten in der Ostsee nur 50 - 60 m hoch sind, reicht die Messung auf der FINO 1 Plattform bis 100 m Höhe. Für das Windprofil zeigt sich für die Messungen über 70 m Höhe eine unerwartete Änderung der Profilform: Der Anstieg der Windgeschwindigkeit mit der Höhe ist hier geringer als erwartet, was bei der Energieertragsprognose eher zu einer Überschätzung führt. Die Messungen der atmosphärischen Stabilität zeigen deutliche Unterschiede zwischen Windprofilen unterschiedlicher Stabilitätsklassen.

Der Zusammenhang zwischen Profil- und Flussmessungen wurde durch den Vergleich der Windgeschwindigkeitsverhältnisse in verschiedenen Höhen mit den aus den Flussmessungen resultierenden Erwartungen der Monin-Obukhov-Theorie untersucht. Auch hier zeigten sich unerwartete Abweichungen. Die Abhängigkeit des Verhältnisses der Windgeschwindigkeiten von der Stabilität ist, ähnlich wie bei der Messung Rødsand in der Ostsee, stärker als theoretisch erwartet. Allerdings führt dies bei der Messung Rødsand dazu, dass neutrale und stabile Situationen unterschätzt werden, während bei der FINO 1 Messung vor allem instabile Situationen überschätzt werden.

Die im Rahmen des Projektes vorgenommene erste Auswertung der FINO 1 Messdaten hat bereits den hohen Wert dieser Daten für das Verständnis der Windverhältnisse gezeigt. Es ist davon auszugehen, dass die mit Hilfe dieses Projektes gewonnenen Daten für die wissenschaftliche Erforschung des Windklimas und der Strömungsverhältnisse an Standorten geplanter deutscher Offshore-Windparks eine große Bedeutung haben werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Diplomarbeit angefertigt. Erste Ergebnisse wurden auf der Konferenz '1st General Assembly of the European Geophysical Union' im April 2004 in Nizza vorgestellt. Auf der Deutschen Windenergie Konferenz DEWEK 2004 im Oktober 2004 wurden die Ergebnisse des Projektes im zwei Vorträgen und Artikeln vorgestellt.

Tautz, S.: *Thermal Effects in the Atmospheric Boundary Layer above the North Sea*, Diplomarbeit an der Universität Oldenburg, ForWind Report 2004-01, Oldenburg, 2004

Tautz, S., B. Lange, D. Heinemann: On the importance of flow distortion correction of ultrasonic anemometers for flux measurements in the marine surface layer., *Geophys. Res. Abstr.* 6 (2004) published on CD

Tautz, S., B. Lange, D. Heinemann: Correction of the heat and momentum flux measurements with the ultrasonic anemometers at the FINO I offshore meteorological mast for flow distortion and mounting effects. *DEWEK 2004* (accepted for oral presentation)

Lange, B.: Comparison of wind conditions of offshore wind farm sites in the Baltic and North Sea. *DEWEK 2004* (accepted for oral presentation)

Fazit

Das Messprogramm der FINO 1 Plattform wurde erfolgreich um Flussmessungen erweitert. Die erste Auswertung der Messdaten zeigte sowohl beim vertikalen Windprofil als auch beim Vergleich mit der Monin-Obukhov-Theorie unerwartete Ergebnisse, die für die Windenergienutzung relevant sind. Sie entsprechen nur zum Teil den in der Ostsee gefundenen Effekten. Die Ergebnisse zeigen deutliche Defizite im heutigen Verständnis der Strömung in der marinen Grenzschicht auf. Gleichzeitig ist in dem Projekt durch hochwertige Messdaten von Impuls- und Wärmefluss die Voraussetzung für weitere wissenschaftliche Forschung geschaffen worden.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Zusammenfassung | 10 |
| 2 | Einleitung | 11 |
| 3 | Beschreibung der Messung und Instrumentierung | 13 |
| 3.1 | Das Ultraschallanemometer Gill R3-50 | 13 |
| 3.2 | Die FINO I Messplattform | 14 |
| 4 | Windkanalmessungen und Kalibrierung der Ultraschallanemometer | 18 |
| 4.1 | Messaufbau | 18 |
| 4.2 | Ergebnisse | 19 |
| 4.3 | Entwicklung der Kalibrierungsmethode | 21 |
| 4.4 | Fazit | 21 |
| 5 | Qualitätskontrolle der Messdaten | 22 |
| 5.1 | Hochaufgelöste Daten der Ultraschallanemometer | 22 |
| 5.2 | Meteorologische Daten | 23 |
| 6 | Bestimmung des Impuls- und Wärmeflusses mit der Eddy- Kovarianz Methode | 26 |
| 6.1 | Die Eddy-Kovarianz Methode | 26 |
| 6.2 | Planar Fit | 27 |
| 6.3 | Detrending | 28 |
| 7 | Übersicht über die Messungen von Flüssen und Stabilität | 29 |
| 8 | Vertikale Profile der Windgeschwindigkeit | 31 |
| 8.1 | Korrektur der gemessenen Windprofile für Umströmungseffekte am Messmast | 31 |
| 8.2 | Mittlere Profile | 34 |
| 8.3 | Stabilitätsabhängigkeit der Windprofile | 35 |
| 8.4 | Abhängigkeit des Windprofils von Windrichtung und Küstenentfernung | 39 |
| 9 | Vergleich der gemessenen Windprofile mit der auf den Flussmessungen basierenden Monin-Obukhov Theorie | 41 |
| 10 | Vergleich mit Ergebnissen der Messung Rødsand in der Ostsee | 43 |
| 11 | Fazit | 47 |
| 12 | Literaturverzeichnis | 49 |
| | Anhang | 50 |

Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen

Abbildungen

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Technische Zeichnung des Ultraschallanemometers mit Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts) (nach Gill, 2001) | 14 |
| Abbildung 2: FINO Messplattform in der Nordsee (aus GL, 2004) | 15 |
| Abbildung 3: Karte: Lage der Messplattform (aus GL, 2004) | 16 |
| Abbildung 4: Grundriss der Messplattform; unten links ist der Messmast und die Ausrichtung der Ausleger zu erkennen. (aus GL, 2004) | 17 |
| Abbildung 5: Messaufbau. Position des Anemometers auf dem Schwenkarm. Rechts daneben sind zwei der Staudruckrohre zu erkennen | 19 |
| Abbildung 6: Ultraschallanemometermessung der Windgeschwindigkeit als prozentualer Anteil der Wind-Referenzmessung gegen die Windgeschwindigkeit. Der Einströmungswinkel beträgt 0° , wenn nicht anders vermerkt. | 20 |
| Abbildung 7: Die Vertikalkomponente über der Windrichtung aufgetragen. Die Windgeschwindigkeit beträgt 10 m/s, der Kippwinkel 0° . | 20 |
| Abbildung 8: Verhältnis der Schalenstern- und der Ultraschallmessung gegen die Windrichtung. | 22 |
| Abbildung 9: 10 Minuten Intervall der Windgeschwindigkeitsmessung aufgetragen über die Zeit. | 23 |
| Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen. | 24 |
| Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungsmessungen in Polarkoordinaten. | 25 |
| Abbildung 12: Zwei Luftschichten unterschiedlicher Temperatur. Es findet Austausch von Luftmassen zwischen den beiden Schichten statt. Aus (Tautz, 2004). | 27 |
| Abbildung 13: Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit (oben links), Schubspannungsgeschwindigkeit (oben rechts), sensiblem Wärmefluss (unten links) und atmosphärischer Stabilität (unten rechts) | 29 |
| Abbildung 14: Variation der Häufigkeit unterschiedlicher Stabilitätsklassen in den verschiedenen Monaten | 30 |
| Abbildung 15: Korrekturfunktion für die Umströmungseffekte des Messmastes und der Ausleger | 32 |
| Abbildung 16: Verhältnis der gemessenen Windgeschwindigkeit am Mastspitzenanemometer auf 100m Höhe und dem Anemometer auf 80m Höhe | 32 |
| Abbildung 17: Verhältnis der gemessenen Windgeschwindigkeiten des Schalensternanemometers und des Ultraschallanemometers auf 40m Höhe | 33 |
| Abbildung 18: Vergleich des gemessenen Windgeschwindigkeitsverhältnisses des Schalensternanemometers und des Ultraschallanemometers auf 40m Höhe mit dem aus den Korrekturfunktionen modellierten Verhältnis | 34 |
| Abbildung 19: Gemessene mittlere Windgeschwindigkeiten der Schalensternanemometer in verschiedenen Höhen; Fehlerbalken zeigen die berechnete Standardabweichung des Mittelwertes; außerdem ist ein linearer Fit dargestellt | 35 |
| Abbildung 20: Wie Abbildung 19, nur in logarithmischer Darstellung und mit logarithmischem Fit | 35 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 21: Stabilitätsabhängige Höhenprofile der Windgeschwindigkeit für Messungen mit neutraler, unstabiler und stabiler Schichtung; gezeigt sind Mittelwerte der mit den Schalensternanemometern gemessenen Windgeschwindigkeiten und deren Standardabweichungen | 37 |
| Abbildung 22: Wie Abbildung 21, aber mit jeweils auf den Messwert in 100m Höhe normierten Windprofilen | 38 |
| Abbildung 23: Wie Abbildung 22, aber in linearer Darstellung | 38 |
| Abbildung 24: Vertikale Windprofile für verschiedene Windrichtungssektoren; gezeigt sind jeweils normierte, gemittelte Windgeschwindigkeiten für Fälle mit neutraler, unstabiler und stabiler atmosphärischer Schichtung | 40 |
| Abbildung 25: Das Verhältnis der Windgeschwindigkeiten in 60m und 30m Höhe in Abhängigkeit vom Stabilitätsparameter 10m/L; gezeigt sind gemessene Daten, die daraus bingemittelten Werte mit der Standardabweichung des Mittelwertes und die theoretisch erwartete Abhängigkeit nach der Monin-Obukhov Theorie | 42 |
| Abbildung 26: Wie Abbildung 25, aber mit dem Verhältnis der Windgeschwindigkeiten in 90m und 60m Höhe | 42 |
| Abbildung 27: Wie Abbildung 25, aber mit dem Verhältnis der Windgeschwindigkeiten in 90m und 30m Höhe | 43 |
| Abbildung 28: Karte der Messstation Rødsand | 44 |
| Abbildung 29: Das Verhältnis der Windgeschwindigkeiten in 50m und 10m Höhe in Rødsand in Abhängigkeit vom Stabilitätsparameter 10m/L; die durchgezogene Linie zeigt die theoretisch erwartete Abhängigkeit (nach Lange et al (2004a), verändert) | 45 |
| Abbildung 30: Das Verhältnis der Windgeschwindigkeiten in 60m und 30m Höhe bei FINO 1 in Abhängigkeit vom Stabilitätsparameter 10m/L; die durchgezogene Linie zeigt die theoretisch erwartete Abhängigkeit | 46 |

Tabellen

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Spezifikationen des Gill R3-50 (nach Gill, 2001)..... | 13 |
| Tabelle 2: Verfügbarkeit der Messung des Ultraschallanemometers auf 40m Höhe..... | 16 |
| Tabelle 3: Abweichung der Ausrichtung der Ultraschallanemometer von Norden. | 23 |
| Tabelle 4: Abschätzung der Parameter für die Mastkorrekturfunktion..... | 33 |
| Tabelle 5: Definition der verwendeten Windrichtungssektoren | 39 |

1 Zusammenfassung

Die Instrumentierung der Messplattform FINO 1 wurde im Rahmen dieses Vorhabens für die Messung von vertikale Impuls- und Wärmeflüssen erweitert. Dazu wurden Ultraschallanemometer des Typs Gill R3-50 angeschafft, die den vorgesehenen Typ mit nur 4 Hz Auflösung und ohne Temperaturmessung. Die Geräte wurden vor der Montage im Windkanal der Universität Oldenburg ausführlich vermessen. Es wurde ein neues Verfahren entwickelt, das eine dreidimensionale Kalibration des Windvektors mit vertretbarem Messaufwand ermöglicht. Seit August 2003 sind die drei Ultraschallanemometer auf der Messplattform FINO 1 installiert und liefern hochaufgelöste Messwerte des dreidimensionalen Windvektors und der Temperatur. Die Messungen werden im Rahmen des FINO-Projektes des BMU vom Deutschen Windenergie Institut DEWI durchgeführt.

Aus den hochaufgelösten Messdaten wurden Zeitreihen von 10-minütigen Mittelwerten des Impulsflusses, Wärmeflusses und der atmosphärischen Stabilität berechnet. Das am FINO 1 Mast gemessene vertikale Windprofil wurde in einer ersten Auswertung in Abhängigkeit von Stabilität und Windrichtung untersucht und mit den Erwartungen der Monin-Obukhov Theorie verglichen. Die Ergebnisse wurden denen der Messung Rødsand in der Ostsee gegenüber gestellt.

Für das mittlere vertikale Windprofil wurden deutliche Abweichungen von der erwarteten Profilform gefunden. Bis zu einer Höhe von etwa 60m zeigt das Profil eine annähernd lineare Form statt der erwarteten Ähnlichkeit zur logarithmischen Abhängigkeit. Dieses Verhalten ähnelt den bei der Messung Rødsand gefundenen Abweichungen. Der Messmast in Rødsand ist im Gegensatz zur 100m hohen FINO Messung nur 50m hoch. Bei den FINO Daten zeigt sich für die Messungen über 70m Höhe eine Änderung der Profilform: Der Anstieg der Windgeschwindigkeit mit der Höhe ist hier geringer als erwartet. Die Messungen der atmosphärischen Stabilität zeigen deutliche Unterschiede zwischen Windprofilen unterschiedlicher Stabilitätsklassen. Auch für unterschiedliche Windrichtungssektoren ergeben sich Unterschiede in den vertikalen Windprofilen.

Der Zusammenhang zwischen Profil- und Flussmessungen wurde durch den Vergleich der Windgeschwindigkeitsverhältnisse in verschiedenen Höhen mit den aus den Flussmessungen resultierenden Erwartungen der Monin-Obukhov Theorie untersucht. Auch hier zeigten sich unerwartete Abweichungen. Die Abhängigkeit des Verhältnisses der Windgeschwindigkeiten von der Stabilität ist, ähnlich wie bei der Messung Rødsand in der Ostsee, stärker ist als theoretisch erwartet. Allerdings führt dies bei der Messung Rødsand dazu, dass neutrale und stabile Situationen unterschätzt werden, während bei der FINO 1 Messung vor allem unstabile Situationen überschätzt werden.

Das vertikale Windprofil ist für die Windenergienutzung von besonderer Relevanz. Es hat direkte Auswirkung auf die Rotorblattlasten einer Windkraftanlage, auf die Energieertragsprognose von Windparks, etc. Energieertragsprognosen beinhalten z.B. häufig eine Extrapolation der Windgeschwindigkeit aus der niedrigeren Messhöhe auf die Nabenhöhe der Anlagen. Ist der Anstieg der Windgeschwindigkeit mit der Höhe größer als erwartet, wie bei der Messung Rødsand, führt dies zu einer Unterschätzung des Energieertrags eines Windparks, während das Profil am FINO Mast über 70m eher zu einer Überschätzung führt.

Die Ergebnisse zeigen großen Bedarf an der weiteren Erforschung des Windes in der marinen Grenzschicht auf. Gleichzeitig ist in dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten (Az: 21223) Projekt mit hochwertigen Messdaten von Impuls- und Wärmefluss die Voraussetzung für zukünftige Forschungsarbeiten geschaffen worden.

2 Einleitung

Ein bedeutender Teil der Energieversorgung Deutschlands soll in Zukunft durch die Nutzung der Windenergie auf See bestritten werden. Die Bundesregierung hat in Ihrer 'Strategie zur Windenergienutzung auf See' (o.A., 2002) ein Ziel von 20-25.000 MW installierter Leistung Offshore in Deutschland bis zum Jahr 2030 gesetzt. Dies entspricht einem Anteil am Stromverbrauch Deutschlands von ca. 15%. Damit wird die Offshore-Windenergienutzung eine wichtige Komponente des Aufbaus einer nachhaltigen Energieversorgung in Deutschland und wird wesentlich zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes und damit zur Verringerung des Schadstoffausstoßes beitragen, der für die antropogenen Klimaveränderungen verantwortlich ist. Erste Schritte zum Erreichen dieses Ziels sind mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), der Ausweisung von potentiellen Eignungsgebieten (o.A., 2002) und der Initiierung des Forschungsprogramms FINO (Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee) (Rakebrandt-Gräßner, 2002) unternommen worden.

Die Quelle dieser zukünftigen Energieversorgung ist der Wind. Es liegt auf der Hand, dass über diese Energiequelle umfassendes Wissen vorhanden sein muss. Einige Beispiele: Für das Design von Windkraftanlagen sind Kenntnisse über Turbulenz, Scherung, Extremwerte, etc. Voraussetzung. Für die wirtschaftliche Planung von Windparks ist eine sehr genaue Kenntnis des Windpotentials am Standort nötig. Für den Betrieb der Windparks im Stromnetz ist die Vorhersagbarkeit der Leistungsabgabe wesentlich.

Im Rahmen des FINO Projektes führt das Deutsche Windenergie Institut (DEWI) Messungen der Windverhältnisse mit einem 100 m Messmast an einem Standort 45km nördlich von Borkum durch (Neumann, 2004). Für einen langfristigen Umbau der Energieversorgung ist aber nicht nur eine Messung, sondern ein grundlegendes Verständnis der diesen Parametern zugrundeliegenden Struktur der marinen atmosphärischen Grenzschicht nötig. Nur so können Aussagen über andere Standorte, die zeitliche Entwicklung, das Verhalten bei Extrembedingungen, etc., gemacht werden. Damit wird die Voraussetzung geschaffen, um die Stromerzeugung aus Offshore Windenergie langfristig erfolgreich und effizient entwickeln zu können.

Zur Untersuchung der marinen atmosphärischen Grenzschicht liegen umfangreiche Arbeiten mit Messungen in der Ostsee vor. Dabei wurden Daten von Freifeldmessungen an Standorten zukünftiger dänischer Offshore-Windparks ausgewertet. Eine Validierungsstudie mit dem Potentialbestimmungsprogramm WASP zeigte Abweichungen dieses einfachen klimatologischen Modells in Abhängigkeit zum Abstand zur Küste (Lange and Højstrup, 2001). Daraufhin wurden verschiedene Modelle zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit des Meeres untersucht und für die Anwendung in der Windenergie angepasst (Lange et al., 2004). Außerdem wurde der Einfluss der atmosphärischen Stabilität auf das vertikale Windgeschwindigkeitsprofil untersucht. Dabei wurden erhebliche Abweichungen von der einfachen mikrometeorologischen Theorie gefunden. Als Ursache wird die Ausbildung einer Inversionsschicht angenommen, die sich bei der Überströmung von kaltem Wasser mit erwärmter Luft bildet. (Lange et al., 2004a; Lange et al., 2004b). Es ist zu erwarten, dass diese nur durch den komplexen Einfluss der Land-See-Diskontinuität auf Rauigkeit und Stabilität zu verstehen sind.

Ziel des Projektes ist zum einen die Erweiterung der FINO Messung um Impuls- und Wärmefluss und damit die Schaffung eines einmaligen Datensatzes für die energiemeteorologische Forschung. Zum anderen werden in einer ersten Auswertung der Daten die Anwendbarkeit der Monin-Obukhov Theorie für die Beschreibung des

Windprofils über dem Meer untersucht. Die Ergebnisse werden mit denen von der Messung Rødsand in der Ostsee verglichen, wo bedeutende Abweichungen von der Theorie festgestellt wurden.

Zur Erweiterung der FINO Messung wurden statt der ursprünglich geplanten Ultraschallanemometer von Typ 'Windmaster' solche von Typ 'Gill R3-50' mit einer maximalen Samplingrate für Wind und Temperatur von 50 Hz und einer hochauflösenden Temperaturmessung verwendet. Die hohe Auflösung dieses Instrumentes und die integrierte Temperaturmessung ermöglichen die direkte Bestimmung von Wärme- und Impulsfluss und daraus abgeleitet der Obukhov-Länge als Stabilitätsparameter. Die Messungen am FINO-Mast werden im Rahmen des FINO-Projektes des BMU vom DEWI durchgeführt und waren daher nicht Teil dieses Projektes. Die Instrumentierung und die FINO Messung sind in Abschnitt 3 kurz beschrieben.

Die Ultraschallanemometer wurden im Windkanal der Universität Oldenburg kalibriert. Wegen der Anordnung der Transducer in einem 'Käfig' aus Haltestäben kommt es bei Ultraschallanemometern zu windrichtungsabhängigen Messfehlern. Zusätzliche Messfehler entstehen bei Schräganströmung des Instrumentes durch die Umströmung der Transducer selber. Dabei ist eine Kalibration in Abhängigkeit vom Windvektor in drei Dimensionen nötig. Um der Messaufwand einer solchen Kalibration in vertretbarem Rahmen zu halten, wurde eine neue Kalibrationsmethode entwickelt, die durch Ausnutzung von Symmetrien und Linearitäten mit relativ wenig Messaufwand auskommt. Die Windkanalmessungen und die daraus gewonnenen Kalibrierungen sind in Abschnitt 4 und im Anhang II dargestellt.

Nach vorliegen der ersten Messdaten wurde die Qualität der Rohdaten, die von den Ultraschallanemometern mit 10 Hz Auflösung aufgenommen werden, überprüft. Auch die Daten der Schalensternanemometer und Windfahnen, die für die Profilmessungen verwendet wurden, wurden einer Qualitätskontrolle unterzogen (siehe Abschnitt 5).

Auswertelgorithmen zur Gewinnung der mittleren Flüsse aus den mit 10 Hz aufgelösten Messdaten der Ultraschallanemometer wurden implementiert und getestet. Dabei wird zunächst das Koordinatensystem des Ultraschallanemometers dreidimensional in ein auf den mittleren Windvektor bezogenes Koordinatensystem transferiert. Lineare Trends im Windvektor werden entfernt, bevor die Kovarianzmatrix und daraus die Flüsse und die Obukhov-Länge berechnet werden. Das verwendete Verfahren ist in Abschnitt 6 beschrieben, eine Übersicht über die Messungen gibt Abschnitt 7.

Für die Windenergienutzung ist insbesondere das vertikale Profil der Windgeschwindigkeit von Bedeutung, auf dessen Untersuchung daher auch der Schwerpunkt dieser Studie liegt (siehe Abschnitt 8). Zunächst werden die mit den Schalensternanemometern gemessenen Windgeschwindigkeiten für Messfehler, die durch die Umströmung des Messmastes und der Ausleger hervorgerufen werden, korrigiert. Aus den korrigierten Werten wird das mittlere Windgeschwindigkeitsprofil berechnet und mit den theoretischen Erwartungen verglichen. Dem folgt eine detailliertere Untersuchung des Einflusses von atmosphärischer Stabilität und von unterschiedlichen Windrichtungssektoren auf die Profile.

In Abschnitt 9 werden die gemessenen Windprofile mit der auf den Flussmessungen basierenden Monin-Obukhov Theorie verglichen. Die dort gefundenen Abweichungen werden in Abschnitt 10 mit den bekannten Ergebnissen der Messung Rødsand in der Ostsee verglichen. Im letzten Abschnitt wird ein Fazit gezogen.

3 Beschreibung der Messung und Instrumentierung

3.1 Das Ultraschallanemometer Gill R3-50

Mit Ultraschallanemometern sind hochaufgelöste Messungen des dreidimensionalen Windvektors und der Temperatur möglich. Diese Möglichkeit macht sie für Flussmessungen mit der Eddy-Kovarianz-Methode attraktiv, für die hochaufgelösten Messungen einzelner Komponenten des Windvektors nötig sind.

Ein Ultraschallanemometer besteht aus Transducerpaaren, zwischen denen Ultraschallsignale hin und her gesendet werden. Die Windkomponente entlang dieses Pfades verändert die Laufzeit des Signals je nach seiner Laufrichtung. Dies führt zu einem Laufzeitunterschied zwischen den beiden Laufrichtungen. Ist die Entfernung zwischen den beiden Transducern bekannt, so kann die Windgeschwindigkeit des Luftvolumens zwischen ihnen anhand des Laufzeitunterschieds berechnet werden.

Wenn t_1 die Zeit für den Hinweg, t_2 die Zeit für den Rückweg und s die Distanz zwischen den Transducern sind, kann die Windgeschwindigkeit v berechnet werden:

$$v = \frac{s}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \quad (3.1)$$

Werden drei linear unabhängige Messpfade gewählt, so ist eine dreidimensionale Messung möglich. Die Abwesenheit von beweglichen Teilen machen Ultraschallanemometer zu wartungsarmen Geräten. Jedoch muss jedes Messinstrument kalibriert werden, da die Stützstreben und die Transducer den Luftstrom im Messvolumen beeinflussen.

Auf der Messplattform FINO I wurden Ultraschallanemometer von Gill Instruments Ltd., Modell 121-OR3-50 (vgl. Gill, 2001) installiert. Die Seriennummern der Geräte sind #255, #273 und #274. Die Geräte sind 0,75m hoch. Der Messkopf ist symmetrisch aufgebaut, die Stützstreben sind in 120° Schritten angebracht. In Abbildung 1 ist eine technische Zeichnung des Gerätes zu sehen. In Tabelle 1 befindet sich eine Auflistung der Spezifikationen.

Tabelle 1: Spezifikationen des Gill R3-50 (nach Gill, 2001)

| | |
|--|--------------------|
| Modell | Gill 121OR3-50 |
| Max. Frequenz des Ultraschallsignals | 50 Hz |
| Bereich und Auflösung der Windgeschwindigkeitsmessung | 0-45 m/s, 0.01 m/s |
| Genauigkeit der Windgeschwindigkeitsmessung | < ± 1% RMS |
| Bereich und Auflösung der Windrichtungsmessung | 0-360°, 1° |
| Genauigkeit der Windrichtungsmessung | < ± 1° |
| Temperaturmessbereich | -40° bis +60° C |
| Bereich in der die Windgeschwindigkeit mit der angegebenen Genauigkeit gemessen wird | < 32 m/s |

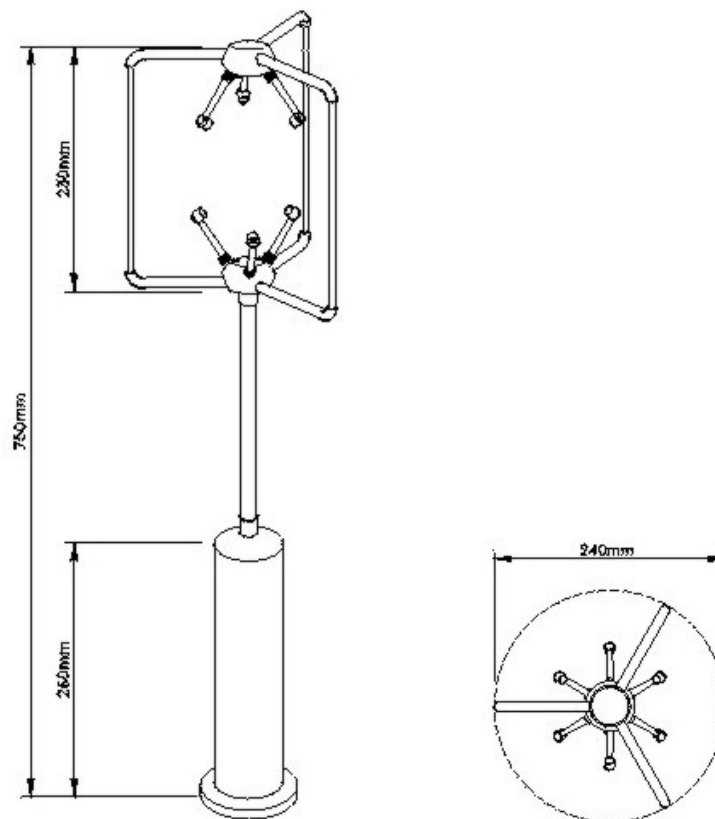


Abbildung 1: Technische Zeichnung des Ultraschallanemometers mit Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts) (nach Gill, 2001)

3.2 Die FINO I Messplattform

Die FINO I Messplattform (Abbildung 2) liegt 45 km nördlich der Insel Borkum in der Nordsee (Abbildung 3). Die Höhe des Messmastes beträgt 100m. An jeder Seite befinden sich 7 Ausleger im Abstand von 10m auf Höhen von 30 – 90 m, die in Nord-Nord-West und Süd-Süd-Ost – Richtung ausgerichtet sind (siehe Abbildung 4). Die Messplattform ist für meteorologische Messungen u.a. mit Ultraschallanemometern, Windfahnen und Schalensternanemometern bestückt. Für eine ausführlichere Beschreibung der Messungen siehe (Neumann, 2004) und Rakebrandt-Gräßner (2002).

Die in diesem Projekt verwendeten Messinstrumente sind folgendermaßen angeordnet: Die Schalensternanemometer sind auf einer Seite des Mastes auf den Auslegern und an der Spitze des Messmastes angebracht. Die Windfahnen und die Ultraschallanemometer sind abwechselnd auf der anderen Seite angebracht: Die Ultraschallanemometer in 40, 60 und 80m Höhe, die Windfahnen in 30, 50,70 und 90m Höhe. Temperatursensoren befinden sich in 30, 50, 70 und 100m Höhe, Luftfeuchtesensoren in 30 und 90 m Höhe.

Die Messplattform zeichnet Daten von den Ultraschallanemometern mit einer Messfrequenz von 10 Hz auf. Alle anderen Messdaten werden als 10-minütige Mittelwerte gespeichert. Die meteorologischen Messungen auf der FINO I Plattform werden vom DEWI vorgenommen und die Daten für dieses Projekt bereitgestellt.



Abbildung 2: FINO Messplattform in der Nordsee (aus GL, 2004)

Die Errichtung der Plattform war im Juli 2003 beendet. Seit August wurden meteorologische Daten aufgezeichnet. Ein Probetrieb fand bis Dezember 2003 statt, der reguläre Betrieb wurde am 1. Januar 2004 aufgenommen. In diesem Projekt wurden meteorologische Daten von September 2003 bis April 2004 und Daten der Ultraschallanemometer von November 2003 bis April 2004 verwendet.

In dieser Zeit kam es bei den Ultraschallanemometern zu einigen Messausfällen. Tabelle 2 zeigt die Verfügbarkeit des Ultraschallanemometers auf 40m Höhe, wobei Daten aus Windrichtungen mit Mastabschattung bereits als Fehlerwerte berücksichtigt wurden.

Bei der Bereitstellung der FINO 1 Daten gab es organisatorische Probleme in FINO-Projekt des BMU. Dadurch verzögerte sich auch die Bereitstellung der Daten. Bedingt durch den hohen Rechenaufwand bei der Verarbeitung der hochaufgelösten Daten

konnten daher im Rahmen dieser Studie nur die Daten eines der drei Ultraschallanemometer ausgewertet werden.

Tabelle 2: Verfügbarkeit der Messung des Ultraschallanemometers auf 40m Höhe

| | Anzahl 10-Min. Messwerte | Verfügbarkeit |
|----------|--------------------------|---------------|
| Nov 03 | 2843 | 66% |
| Dez 03 | 0 | 0% |
| Jan 04 | 3875 | 87% |
| Feb 04 | 3839 | 92% |
| März 04 | 3967 | 89% |
| April 04 | 4254 | 98% |

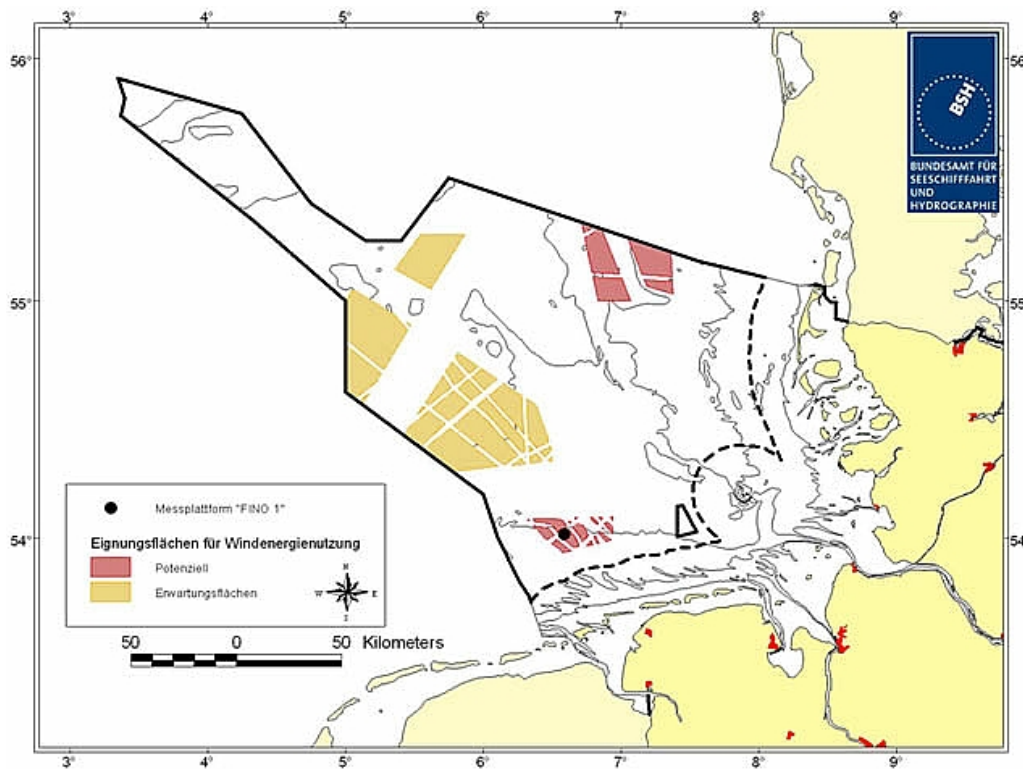


Abbildung 3: Karte: Lage der Messplattform (aus GL, 2004)

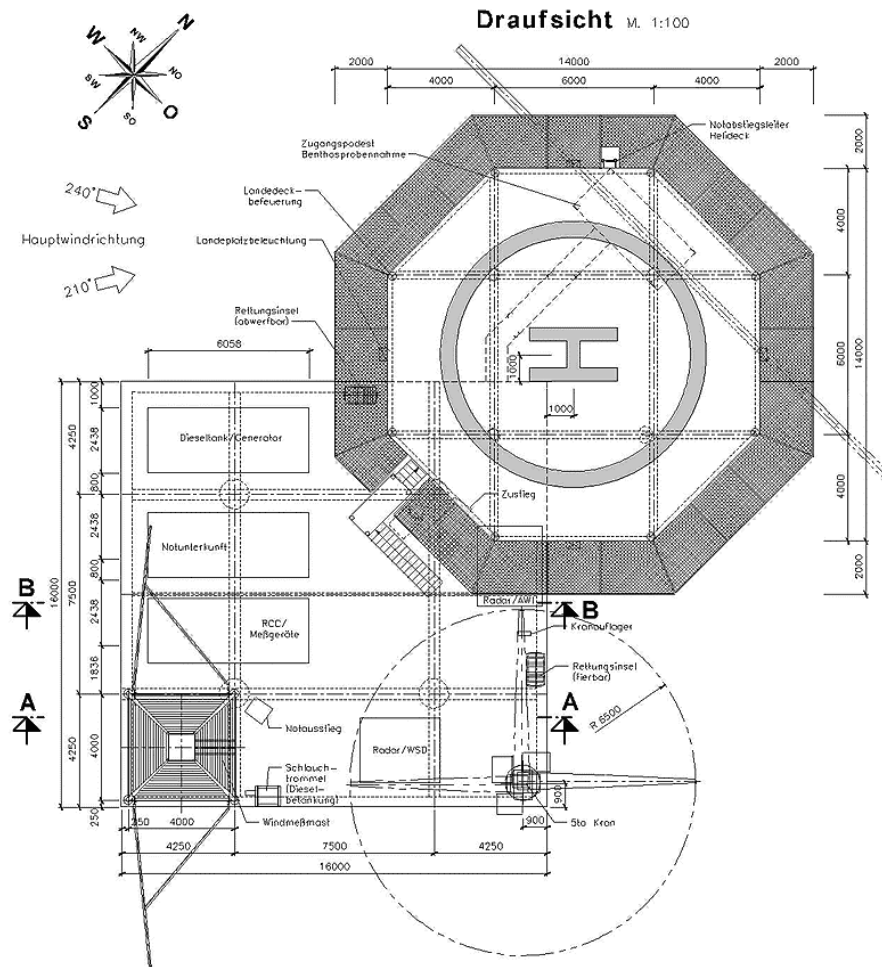


Abbildung 4: Grundriss der Messplattform; unten links ist der Messmast und die Ausrichtung der Ausleger zu erkennen. (aus GL, 2004)

4 Windkanalmessungen und Kalibrierung der Ultraschallanemometer

Vor der Installation auf der FINO Messplattform wurden die drei Ultraschallanemometer im Windkanal getestet. Hierbei wurde die werkseitige Kalibrierung überprüft und später eine Korrektur und Erweiterung entwickelt. Eine ausführliche Dokumentation der Untersuchungen und der Kalibrierung der Anemometer ist im Anhang zu finden. Da die werkseitige Kalibrierung von Gill keine Korrektur der Vertikalkomponente vornimmt, wurde auf diese ein besonderer Augenmerk gelegt.

Die vom Hersteller vorgenommenen Kalibrierung ist eine rein empirische Methode, bei der die Anemometer bei einer festen Windgeschwindigkeit im Windkanal um 360° gedreht werden. Die Messung des Anemometers wird mit der Referenzgeschwindigkeit verglichen. Abweichungen werden in einer Tabelle gespeichert und die Messwerte je nach Windrichtung mit dem entsprechenden Wert modifiziert.

Vor der Installation der Geräte war nur begrenzte Zeit für die Messungen im Windkanal vorhanden. Aus diesem Grund wurde eine Korrekturmethode entwickelt, die nur wenige Messdaten braucht. Es wurde besonders nach möglichen Symmetrien und linearem Verhalten der drei entscheidenden Variablen (Windrichtung, Kippwinkel und Windgeschwindigkeit) gesucht, die nicht nur die Vermessung des Anemometers vereinfachen können, sondern sich auch bei einer späteren Korrektur als hilfreich erweisen.

4.1 Messaufbau

Die Messungen fanden im Windkanal der Universität Oldenburg statt. Eine Beschreibung des Windkanal findet sich bei (Stabe und Langner, 1997).

Das zu vermessende Anemometer wird auf einem Schwenkarm im Windkanal angebracht. Es kann um 360° gedreht werden. Zusätzlich können über den Schwenkarm Kippwinkel von bis zu $\pm 35^\circ$ eingestellt werden. Vier Staudruckrohre dienen als Referenzmessung der Windgeschwindigkeit. Abbildung 5 zeigt den Messaufbau. Der Messbereich der Staudruckrohre liegt zwischen 5 und 17 m/s.



Abbildung 5: Messaufbau. Position des Anemometers auf dem Schwenkarm. Rechts daneben sind zwei der Staudruckrohre zu erkennen

4.2 Ergebnisse

Die wichtigsten der im Anhang dokumentierten Ergebnisse werden hier kurz zusammengefasst.

Bei zwei Ultraschallanemometern liegen die Messwerte permanent 1-1.5% unter der Referenzwindgeschwindigkeit (siehe Abbildung 6).

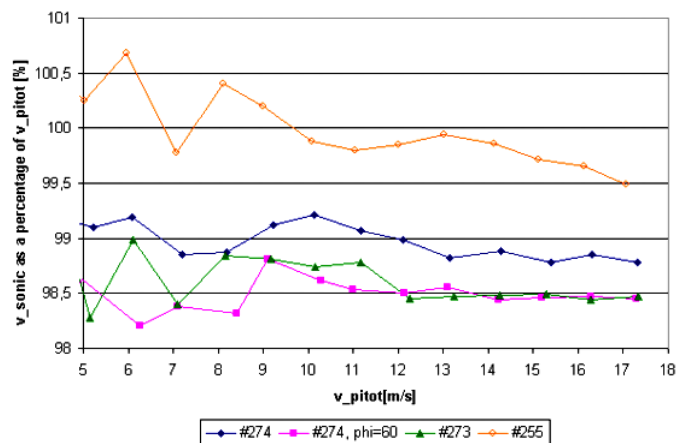


Abbildung 6: Ultraschallanemometermessung der Windgeschwindigkeit als prozentualer Anteil der Wind-Referenzmessung gegen die Windgeschwindigkeit. Der Einströmungswinkel beträgt 0° , wenn nicht anders vermerkt.

Zudem zeigt sich für die windrichtungsabhängigen Messungen, dass im Bereich um den Bügel bei allen vermessenen Anemometern für Horizontal- und Vertikalkomponenten Abweichungen von mehr als 1% auftreten. Abbildung 7 zeigt exemplarische Messergebnisse für die Vertikalkomponente.

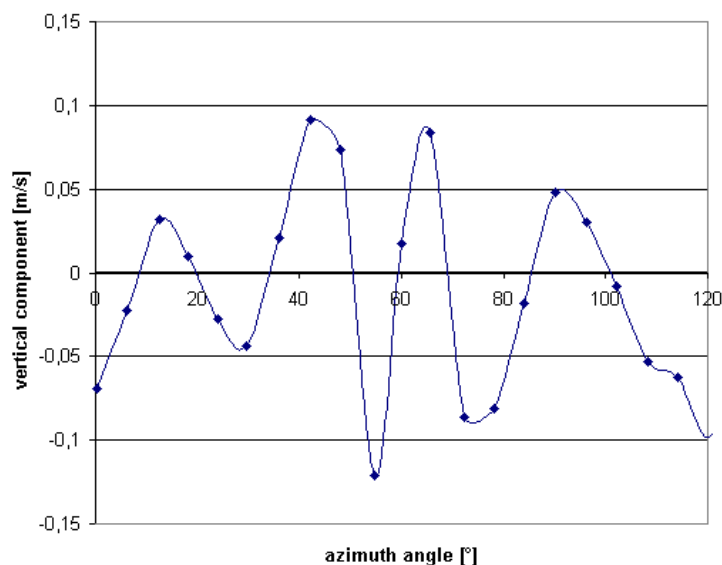


Abbildung 7: Die Vertikalkomponente über der Windrichtung aufgetragen. Die Windgeschwindigkeit beträgt 10 m/s, der Kippwinkel 0° .

Die Kippwinkelabhängigkeit zeigt erst bei Winkel größer als 20° stärkeren Einfluss auf die gemessene Windgeschwindigkeit. An den kritischen Stellen um die Bügel machen sich allerdings schon Kippwinkel unter 20° durch stärkere Abweichung von der Referenzgeschwindigkeit bemerkbar.

Eine Korrektur der werkseitig kalibrierten Ultraschallanemometer, insbesondere der bisher nicht berücksichtigten Vertikalkomponente, ist somit unabdingbar.

4.3 Entwicklung der Kalibrierungsmethode

Mit Hilfe des in den Messungen gefundenen symmetrischen und linearen Verhaltens wurde eine Kalibrierungsmethode entwickelt.

Für die Variation der Windrichtung zeigt sich eine 120° Symmetrie, analog zum Aufbau des Probenkopfes. Dies ist sowohl für die Horizontalkomponente als auch für die vertikale Komponente der Fall. Messungen für verschiedene Kippwinkel zeigten keine Symmetrien für Kippwinkel gleicher Größe aber verschiedener Richtungen. Es wurde gezeigt das die Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit als linear angenommen werden kann.

Anhand dieser Symmetrien und Linearitäten werden Korrekturfunktionen aus einer ausgewählten Anzahl an Messungen abgeleitet. Hierzu werden sogenannte „Lookup Tables“ erstellt, in denen für jede Windrichtung und jeden Kippwinkel die entsprechenden Korrekturwerte für diese räumliche Konfiguration stehen. Die Korrekturwerte entstehen aus dem Vergleich der Messwerte mit den Referenzwerten. Der lineare Einfluss der Windgeschwindigkeit ermöglicht es, mit normierten Werten zu arbeiten.

Die Anwendung der Korrektur auf eine im Windkanal vorgenommene Testmessung zeigt gute Ergebnisse. Abweichungen, besonders für die vorher unkorrigierte vertikale Komponente, werden reduziert. Auch für Freifelddaten ist der Einfluss der Korrektur gut sichtbar und manifestiert sich besonders in den Flüssen, zu deren Berechnung die Vertikalkomponente verwendet wird.

4.4 Fazit

Die werkseitige Kalibrierung zeigt deutliche Schwächen. Problematisch ist vor allem der falsche Kalibrationsfaktor, der zu einer generellen Abweichung der gemessenen Windgeschwindigkeit führt. Außerdem wurden im Bereich um die Stützstreben Abweichungen von bis zu 3% von der Referenzgeschwindigkeit gemessen. Für die bisher unkorrigierte Vertikalkomponente wurden Abweichungen in der Höhe von 0,1 m/s bei einer Windgeschwindigkeit von 10m/s gefunden. Um die Anemometer für Flussmessungen nutzen können, muss die werkseitige Kalibrierung sowohl erweitert als auch korrigiert werden.

Durch Ausnutzung von Symmetrien und Linearitäten wurde eine Kalibrationsmethode gefunden, durch die eine erneute Vermessung deutlich effizienter zu gestalten ist. So ist z.B. nur noch die Vermessung eines 120° Sektors notwendig, anstatt einer vollen 360° Drehung. Die Korrektur wurde über "Lookup Tables" bewerkstelligt, analog zur vom Hersteller verwendeten Methode, jedoch unter Berücksichtigung von verschiedenen Kippwinkeln.

5 Qualitätskontrolle der Messdaten

In diesem Abschnitt werden die Messdaten der Plattform auf ihre Validität hin untersucht. Hierbei geht es zum einen darum, die Verlässlichkeit der gemittelten (10 min) meteorologischen Messdaten zu prüfen (Schalensternanemometer, Windfahnen) als auch die Verlässlichkeit der hochaufgelösten Daten der Ultraschallanemometer.

Im ersten Teil werden die hochauflösenden Ultraschalldaten mit den meteorologischen Daten verglichen, im zweiten Teil Zeitreihen und Häufigkeitsverteilungen der meteorologischen Messdaten in verschiedenen Höhen.

Ein ausführlicher Bericht ist im Anhang zu finden. Im folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse kurz dargestellt.

5.1 Hochaufgelöste Daten der Ultraschallanemometer

Das Verhältnis von Messdaten der Schalenstern- und Ultraschallanemometer wurde gebildet und gegen die Windrichtung aufgetragen, um mögliche Abweichungen untereinander zu untersuchen. Für die Überprüfung der Windrichtungsmessung wurden die Messdaten der Windfahne in 30m Höhe mit denen des Ultraschallanemometers verglichen. Außerdem wurden 10-Minuten-Mittelwerte der Ultraschalldaten gebildet und auf Peaks im Zeitverlauf untersucht, um mögliche Fehlfunktionen der Geräte zu entdecken.

Beim Vergleich der gemessenen Windgeschwindigkeit (siehe Abbildung 8) ist die Position des Mastes deutlich zu erkennen. Außerhalb des Bereiches der Mastabschattung ist das Verhältnis von Schalenstern- und Ultraschallmessung annähernd eins, der Einfluss des Mastes muss jedoch weiterhin berücksichtigt werden.

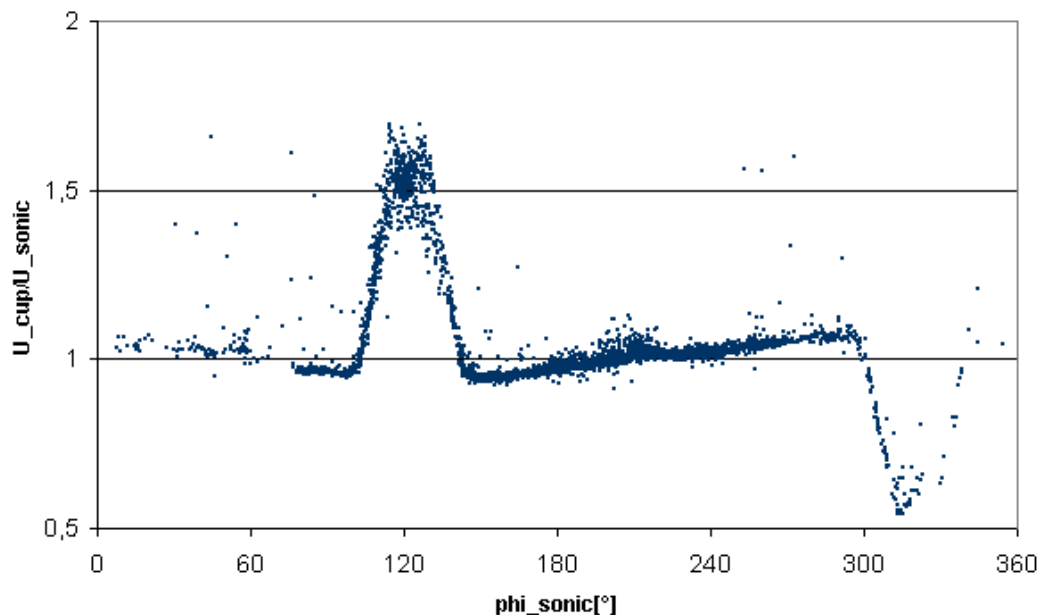


Abbildung 8: Verhältnis der Schalenstern- und der Ultraschallmessung gegen die Windrichtung.

Verglichen mit der Messung der Windfahne auf 30m Höhe ist die Messung der Ultraschallanemometer für die Windrichtung konsistent. Jedes Ultraschallanemometer weist jedoch eine eigene Verschiebung von der Nordausrichtung vor. Die vom Betreiber

der Plattform angegebenen Winkel stimmen recht gut mit den aus dem Vergleich der Messungen ermittelten überein. Diese Verschiebewinkel sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Abweichung der Ausrichtung der Ultraschallanemometer von Norden.

| Ultraschallanemometer | Abweichung von der Nordausrichtung |
|-----------------------|------------------------------------|
| #255 | 54 |
| #273 | 277 |
| #274 | 29 |

Um kurzfristig stark abweichende Messdaten ("Peaks") der Ultraschallanemometer zu finden, die auf Fehlfunktionen der Instrumente hinweisen, wurde exemplarisch für den November die Standardabweichung der gemessenen Windgeschwindigkeiten in jedem 10 Minuten Intervall mit ihren maximalen und minimalen Werten verglichen. Dabei fallen Peaks durch Fehlfunktionen des Gerätes durch eine ungewöhnlich große Differenz zwischen Standardabweichung und Extremwert auf. Dies trat im November bei 5 Messwerten auf. Der Einfluss auf die gemessenen Flüsse ist dementsprechend gering. Diese Abweichungen gründen sich in für einige Sekunden stark schwankenden Messungen in dem zehnmütigen Messintervall, wie in Abbildung 9 zu sehen ist. Der Einfluss dieser Schwankungen ist aufgrund ihres seltenen Auftretens äußerst gering.

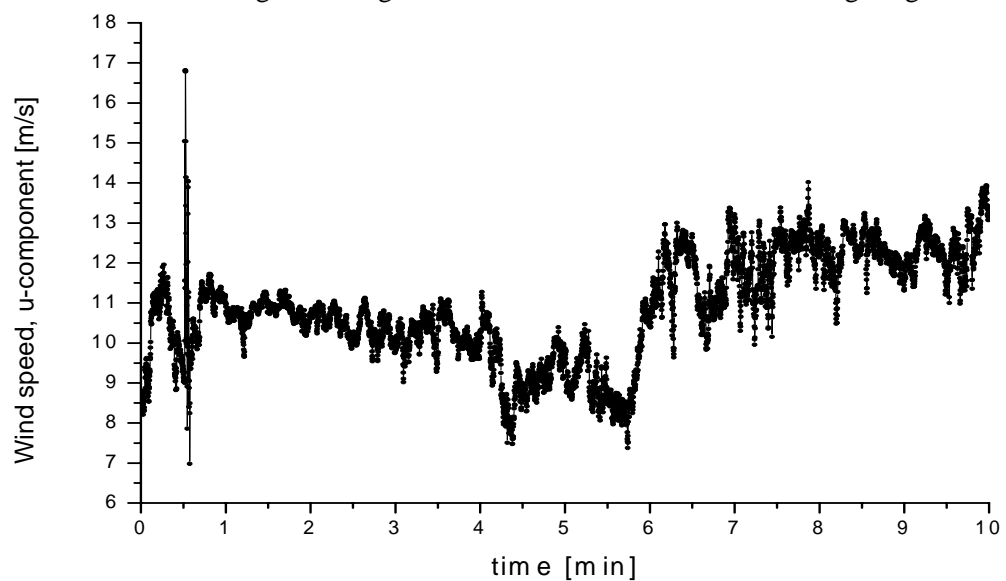


Abbildung 9: 10 Minuten Intervall der Windgeschwindigkeitsmessung aufgetragen über die Zeit.

Die Messdaten der Ultraschallanemometer sind durchweg konsistent und können nach Korrektur der Nordverschiebung und Herausnahme der Peaks in den 10 Minuten - Messungen verwendet werden.

5.2 Meteorologische Daten

Zeitreihen der Messungen wurden auf Messlücken und andere augenscheinliche Probleme inspiziert. Mehrere Perioden mit fehlenden oder fehlerhaften Messungen wurden gefunden und für die Datenauswertung entfernt. Hierzu zählen zum Beispiel die Messungen der Windfahnen in 50 und 70 m Höhe, bei denen der Messkanal nicht auf

Richtungsmessungen ausgelegt war, so dass es zu falschen Richtungsangaben bei der Mittelung kommt.

Die Diskretisierung der verschiedenen Messdaten wurde für den Verlauf der Messperiode untersucht.

Häufigkeitsverteilungen der verschiedenen Messhöhen wurden miteinander verglichen. Des Weiteren wurden „Scatter Plots“ erstellt, bei denen Messungen verschiedener Höhen gegeneinander aufgetragen wurden, um mögliche Trends im Verhältnis deutlicher hervorzuheben.

Zum weiteren Vergleich wurden für Messdaten unterschiedlicher Höhen der Quotient von Windgeschwindigkeiten, die Differenzen von Windrichtungen, Temperatur und Luftfeuchte über Windrichtung und Zeit betrachtet.

Es zeigt sich, dass die Diskretisierung der Messdaten nicht konsistent ist. So werden zum Beispiel im November die Windfahnen in 90 und 30m Höhe in 1° Schritten gemessen, ansonsten werden 6 Nachkommastellen erfasst. Für die Temperaturmessungen und die Luftfeuchtemessungen gibt es ebenfalls Abschnitte unterschiedlicher Diskretisierung.

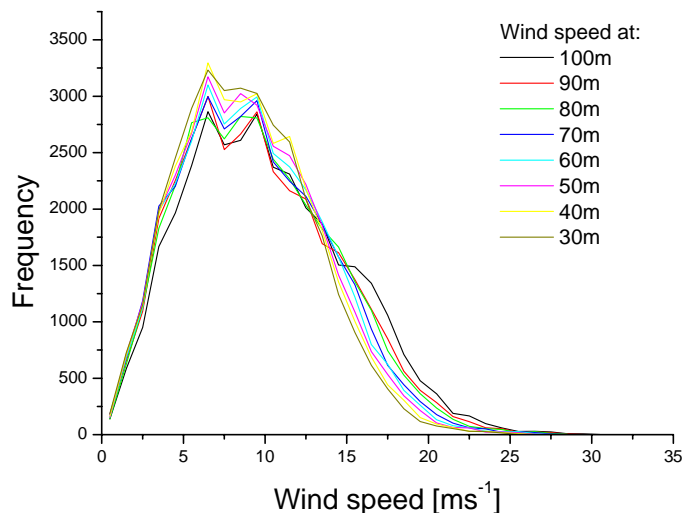


Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen.

Der Quotient der Windgeschwindigkeiten aufgetragen über der Windrichtung zeigt jeweils gut erkennbar die Mastposition, das Verhältnis der jeweiligen benachbarten Windhöhen ist ungefähr 1. Werden die benachbarten Windgeschwindigkeiten gegeneinander aufgetragen, kommt es wie erwartet zu einer Steigung von etwa eins.

Die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungsmessung zeigt für die besonders problematischen Windfahnen (70 und 50m) starke Abweichungen im kritischen Messintervall, was zu erwarten war (siehe Abbildung 11).

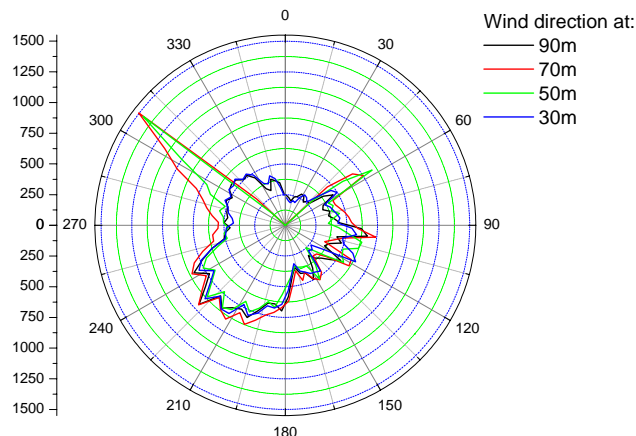


Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungsmessungen in Polarkoordinaten.

Beim Vergleich der Windfahnen wird ein Problem augenscheinlich: die Verschiebung unter den jeweiligen Richtungsmessungen ist nicht konstant. So differiert der Winkel, um den zwei dieser Windfahnen zueinander verschoben sind, um bis zu 4 Grad. Diese Verschiebung ist weder zeitlich noch räumlich eindeutig zuzuordnen und tritt bei allen Messhöhen außer bei 30m Höhe auf.

Die Unterschiede in der Windrichtungsmessung sind nicht konsistent, aber nehmen bei steigender Windgeschwindigkeit ab. Die Mastposition zeichnet sich in Vergleichen der Messungen deutlich ab.

Die Temperaturmessungen sind noch nicht kalibriert und sind daher momentan noch nicht verwendbar.

Insgesamt lässt sich sagen, dass von den meteorologischen Daten für die Windgeschwindigkeitsmessungen der Schalensternanemometer keine Bedeutenden Probleme gefunden wurden. Für die Windfahnen bietet sich auf Grund der beschriebenen Probleme die Verwendung der Windfahne auf 30m Höhe an, die Temperaturmessungen erweisen sich als problematisch. Für die Messungen von Windgeschwindigkeit und Windrichtung muss in jedem Fall eine Mastkorrektur vorgenommen werden.

6 Bestimmung des Impuls- und Wärmeflusses mit der Eddy-Kovarianz Methode

6.1 Die Eddy-Kovarianz Methode

Transport von Wärme, Aerosolen und Feuchtigkeit findet in der atmosphärischen Grenzschicht größtenteils über Turbulenz statt. Diese Transportprozesse, die das Verhalten der Grenzschicht entscheidend beeinflussen, können als Flüsse beschrieben werden.

Für die Beschäftigung mit turbulenten Prozessen wird die sogenannte „Reynolds Zerlegung“ verwendet: Ein Signal X besteht aus einem turbulenten x' und einem mittleren \bar{x} Anteil.

$$X = x' + \bar{x} \quad (6.1)$$

Mit der Eddy-Kovarianz Methode werden Flüsse über die Kovarianz zweier Werte berechnet. Hierzu wird der turbulente Anteil des jeweiligen Signals verwendet. Für eine detailliertere Einführung sei (Foken, 2003) empfohlen.

Aus den Kovarianzen von Temperatur und vertikaler Windgeschwindigkeit $\overline{w'T'}$ wird der Wärmefluss H berechnet (Kaimal und Finnigan, 1994).

$$H = \rho c_p \overline{w'T'} \quad (6.2)$$

Wobei ρ die Luftdichte und c_p die spezifische Wärme bei konstantem Druck für feuchte Luft ist.

Aus den Kovarianzen der horizontalen mit der vertikalen Windgeschwindigkeit $\overline{u'w'}$ und $\overline{v'w'}$ wird der Impulsfluss τ berechnet (Stull, 1988):

$$\tau = -\rho \sqrt{\overline{u'w'}^2 + \overline{v'w'}^2} \quad (6.3)$$

Am Beispiel des Wärmeflusses kann dieser Zusammenhang gut veranschaulicht werden. Man stelle sich zwei Luftschichten vor, die obere kühler als die untere, wie in Abbildung 12 gezeigt. Steigt ein Paket warmer Luft aus der unteren Schicht in die obere Schicht kühlerer Luft auf, so ist die Temperaturdifferenz T' positiv, da die Umgebungstemperatur kälter ist. Die vertikale Windgeschwindigkeit w' ist ebenfalls positiv, da die Luft aufsteigt. Für kältere Luft, die in die wärmere Schicht absinkt, sind die Temperaturdifferenz und die vertikale Windgeschwindigkeit beide negativ aus analogen Gründen. Für beide Fälle ist die Kovarianz $w'T'$ positiv und es wird Wärme nach oben transportiert. Um nun den gesamten durch turbulenten Transport entstandenen Wärmefluss zu beschreiben, werden die Kovarianzen aufsummiert. Dieser Wert ist proportional zur Wärmefluss.

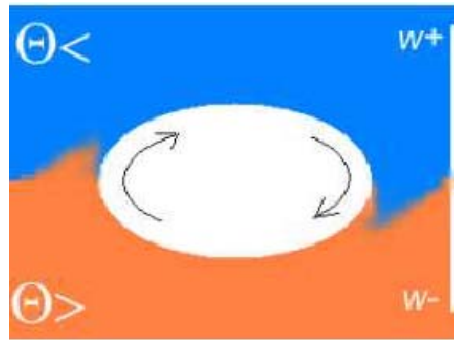


Abbildung 12: Zwei Luftschichten unterschiedlicher Temperatur. Es findet Austausch von Luftmassen zwischen den beiden Schichten statt. Aus (Tautz, 2004).

Bevor Flüsse aus den Messdaten berechnet werden können, müssen diese erst korrigiert werden. Zum einen muss die Störung durch das Messinstrument selber herausgerechnet werden, zum anderen müssen sowohl eine mögliche Verkippung der Messgerätes als auch Trends berücksichtigt werden. Die Kalibrierung des Ultraschallanemometers wurde in Abschnitt 5 behandelt. Auf die beiden anderen Punkte wird im folgenden eingegangen.

6.2 Planar Fit

Für diese Verkippungskorrektur nach Wilczak (2001) wird das Stromlinienfeld mit den Mittelwerten der Ultraschallmessungen verglichen. Für ein verkippertes Ultraschallanemometer können die Werte im Stromlinienfeld (\vec{u}_p) durch Multiplikation der Messwerte (\vec{u}_m) mit einer Drehmatrix erlangt (\mathbf{P}) werden, die die Messwerte ins Stromlinien-Koordinatensystem transformiert. Hierbei muss ein möglicher Offset des Anemometers (\vec{c}) berücksichtigt werden.

$$\vec{u}_p = \mathbf{P}(\vec{u}_m - \vec{c}) \quad (6.4)$$

Folglich sind die einzelnen Komponenten :

$$\begin{aligned} \bar{w}_p &= p_{11}(\bar{u}_m - c_1) + p_{12}(\bar{v}_m - c_2) + p_{13}(\bar{w}_m - c_3) \\ \bar{w}_p &= p_{21}(\bar{u}_m - c_1) + p_{22}(\bar{v}_m - c_2) + p_{23}(\bar{w}_m - c_3) \\ \bar{w}_p &= p_{31}(\bar{u}_m - c_1) + p_{32}(\bar{v}_m - c_2) + p_{33}(\bar{w}_m - c_3) \end{aligned} \quad (6.5)$$

Da im mittleren Stromliniensystem die vertikale Komponente \bar{w}_m gleich Null ist, kann gefolgert werden:

$$\bar{w}_m = c_3 + \frac{p_{31}}{p_{33}}\bar{u}_m - \frac{p_{32}}{p_{33}}\bar{v}_m = b_0 + b_1\bar{u}_m + b_2\bar{v}_m \quad (6.6)$$

Aus Mittelwerten von Messintervallen einer bestimmten Länge (10 Minuten in dieser Untersuchung) werden mit multipler Regression die Parameter b_0 , b_1 und b_2 errechnet. Alle Komponenten von \mathbf{P} können aus diesen Parametern bestimmt werden. Dies ist möglich auf Grund von Beziehungen zwischen den Drehwinkeln und den p-Koeffizienten, sowie geometrischen Beziehungen zwischen den p- und b-Koeffizienten. Eine detailliertere Aufschlüsselung der Berechnung wird von Wilczak (2001) präsentiert. Nachdem die Drehmatrix errechnet wurde, können die Messwerte transformiert und in Hauptwindrichtung gedreht werden. Dies geschieht mit einer zweiten Drehmatrix \mathbf{M} .

$$M = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.7)$$

Wobei $\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{v}_p}{\bar{u}_p} \right)$

6.3 Detrending

Nur die turbulenten Anteile eines gemessenen Signals tragen zum Fluss bei. Da auch ein genereller Anstieg der Windgeschwindigkeit zu einer Abweichung vom Mittelwert beiträgt, aber nicht zu den Flüssen, muss dieser Anteil herausgerechnet werden, bevor die Messdaten zur Berechnung der Flüsse verwendet werden. Hierzu wird mit linearer Regression der Trend des jeweiligen Messintervalls berechnet und von den Messungen subtrahiert.

7 Übersicht über die Messungen von Flüssen und Stabilität

Aus den hochaufgelösten (10 Hz) Messdaten der Ultraschallanemometer wurden, wie in Abschnitt 6 beschrieben, Impulsfluss, Wärmefluss und daraus abgeleitet die atmosphärische Stabilität bestimmt. Eine Übersicht über die Häufigkeitsverteilung der Messwerte zeigt Abbildung 13. Auffällig ist der im Mittel positive Wärmefluss, der anzeigt, dass Wärme vom Wasser in die Luft transportiert worden ist und zu einer unstablen Schichtung führt.

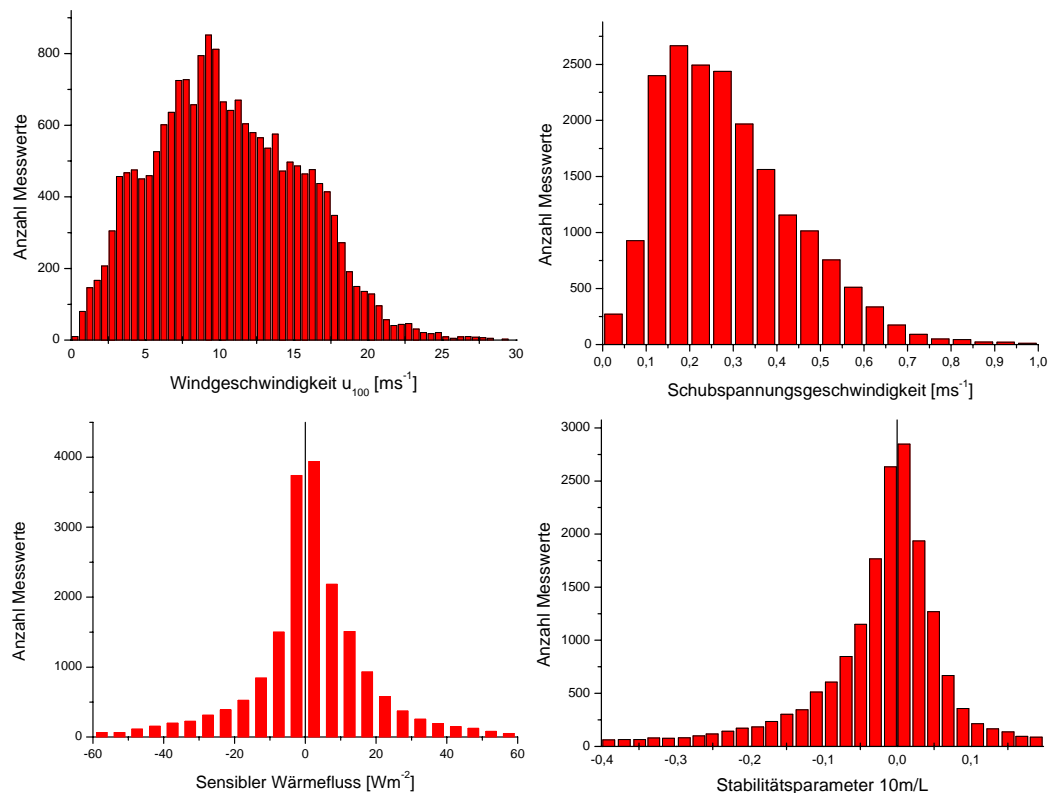


Abbildung 13: Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit (oben links), Schubspannungsgeschwindigkeit (oben rechts), sensiblem Wärmefluss (unten links) und atmosphärischer Stabilität (unten rechts)

In Abbildung 14 ist der jahreszeitliche Verlauf des Auftretens verschiedener Stabilitätsklassen dargestellt. Es wurde zwischen sehr unstabler ($-2 < 10\text{m/L} < -0.1$), unstabler ($-0.1 < 10\text{m/L} < -0.02$), nahezu neutraler ($-0.02 < 10\text{m/L} < 0.01$), stabiler ($0.01 < 10\text{m/L} < 0.05$) und sehr stabiler Schichtung ($0.05 < 10\text{m/L} < 1$) unterschieden. Im November überwiegen die Situationen mit unstabler Schichtung (50% instabil zu 20% stabil). Dieses Verhältnis kehrt sich bis April fast um (30% instabil zu 50% stabil).

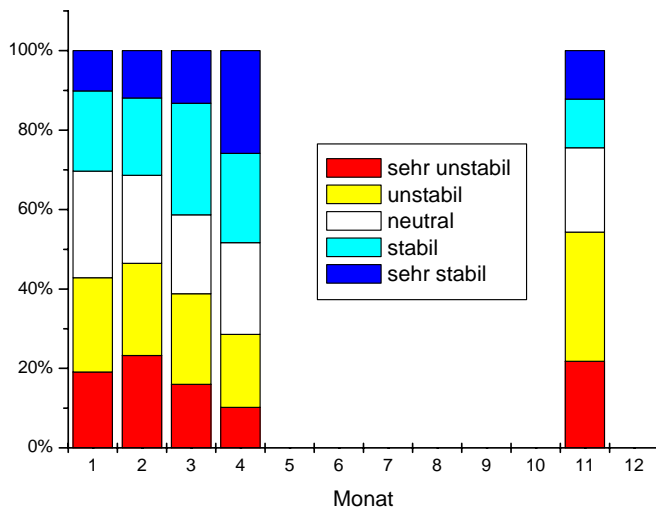


Abbildung 14: Variation der Häufigkeit unterschiedlicher Stabilitätsklassen in den verschiedenen Monaten

8 Vertikale Profile der Windgeschwindigkeit

8.1 Korrektur der gemessenen Windprofile für Umströmungseffekte am Messmast

Windgeschwindigkeitsmessungen mit Anemometern, die mit Hilfe von Auslegern seitlich an einem Messmast montiert werden, haben wegen der Störung der Windströmung durch den Mast und die Ausleger systematische Messfehler. Die Korrektur dieser Fehler ist für die Untersuchung von vertikalen Windprofilen unerlässlich, da hier kleine Differenzen von relativ großen Windgeschwindigkeitswerten untersucht werden. Dabei kann der zu untersuchende Effekt leicht eine ähnliche Größe haben wie der Messfehler durch die Umströmung des Messmastes.

Für Windrichtungen, wo das Anemometer in Lee des Messmastes liegt, also im direkten Mastschatten ist, ist der Messfehler offensichtlich sehr groß. Für diese Situationen wird keine Korrektur vorgenommen, sondern die Messwerte als fehlerbehaftet verworfen. Für alle anderen Windrichtungen wird ein einfaches Korrekturverfahren auf der Basis von (Højstrup, 1999) verwendet (siehe auch Lange et al., 2004).

Das Korrekturverfahren unterscheidet drei unterschiedliche Fälle: Bei direktem Mastschatten wird die Messung verworfen, beim entgegengesetzten Fall der Strömung vom Anemometer zum Mast tritt ein Stauwirkung auf, der die gemessene Windgeschwindigkeit vermindert. Wenn das Anemometer neben dem Mast oder seitlich hinter dem Mast ist, tritt ein Umströmungseffekt auf, der die gemessene Windgeschwindigkeit erhöht. Hier wird ein einfacher linearer Verlauf der Störung mit zunehmendem Winkel angenommen. Die Korrekturfunktion ist in Abbildung 15 gezeigt. Es werden 5 Parameter benötigt: Die Richtung dir_{Mast} des Mastes vom Anemometer aus, Die Breiten der Windrichtungssektoren mit Mastschatten und konstantem Stauwirkung (x_{shadow} und x_{block}) und die Größe der Korrekturfaktoren für die beiden Richtungen Mastschatten und Maststau (y_{shadow} und y_{block}).

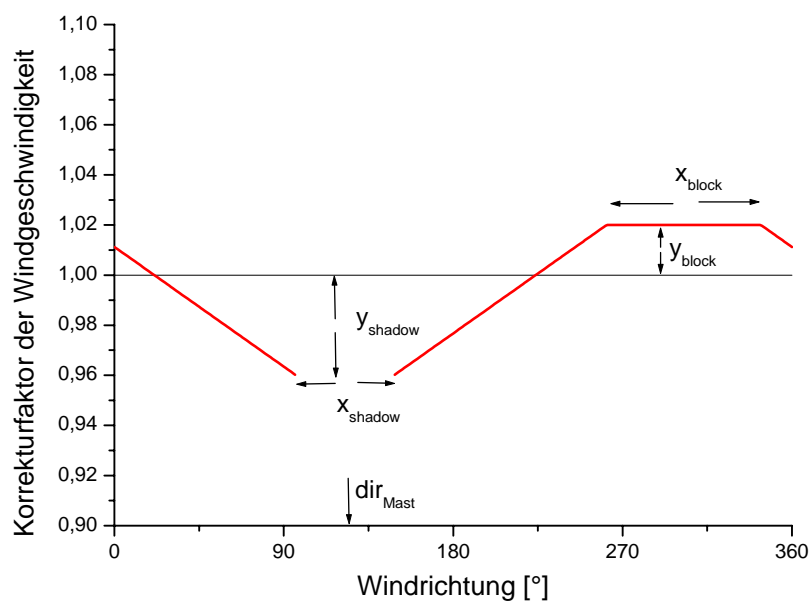


Abbildung 15: Korrekturfunktion für die Umströmungseffekte des Messmastes und der Ausleger

Die Richtung der Ausleger zum Mast ist von der Montage bekannt, alle anderen Parameter müssen empirisch gefunden werden. Dafür werden zwei Methode verwendet:

- Die Messdaten des (ungestörten) Mastspitzenanemometers werden mit denen der anderen Anemometer verglichen (siehe Abbildung 16 als Beispiel für die Höhe 80m).
- Die Daten von Schalenstern- und Ultraschallanemometern auf unterschiedlichen Seiten des Mastes aber in gleicher Höhe werden verglichen (siehe Abbildung 17).

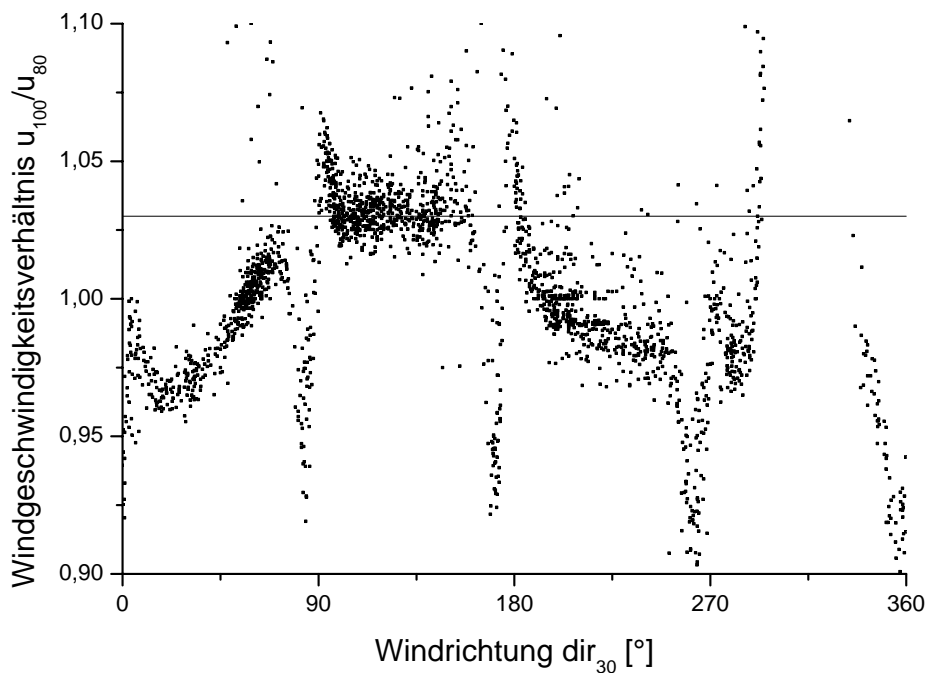


Abbildung 16: Verhältnis der gemessenen Windgeschwindigkeit am Mastspitzenanemometer auf 100m Höhe und dem Anemometer auf 80m Höhe

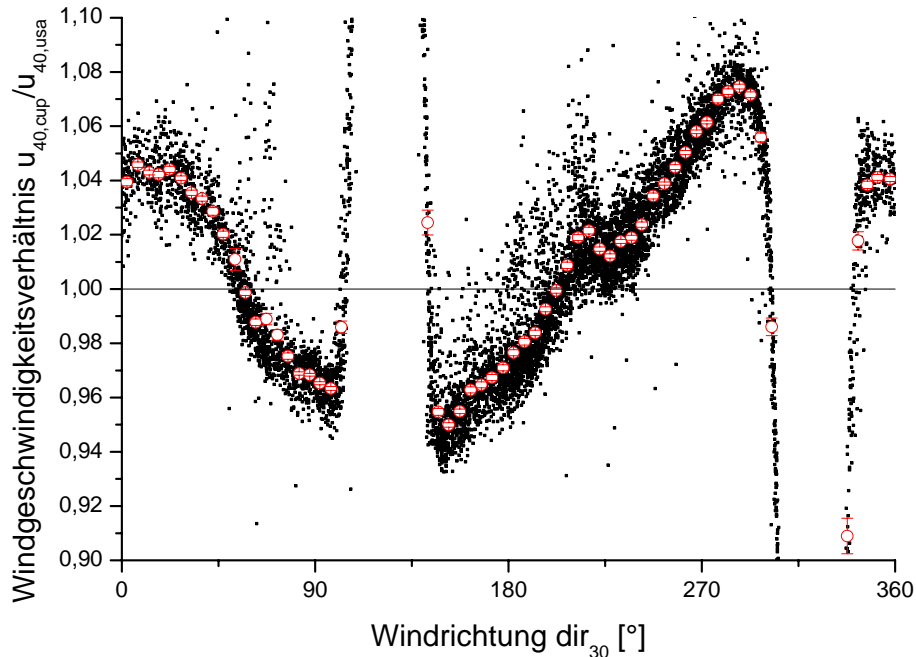


Abbildung 17: Verhältnis der gemessenen Windgeschwindigkeiten des Schalensternanemometers und des Ultraschallanemometers auf 40m Höhe

Aus den Messungen wurden die Parameter der Mastkorrekturfunktion abgeschätzt (siehe Tabelle 4). Dabei wurden die geringen Unterschiede zwischen Anemometern auf verschiedenen Höhen vernachlässigt.

Tabelle 4: Abschätzung der Parameter für die Mastkorrekturfunktion

| | |
|---------|------|
| dirMast | 320° |
| xshadow | 50° |
| xblock | 80° |
| yshadow | 0,04 |
| yblock | 0,02 |

Ein Vergleich der Messung mit der Korrekturfunktion ist in Abbildung 18 gezeigt, wo aus den beiden Korrekturfunktionen für die Anemometer auf unterschiedlichen Seiten des Mastes das Verhältnis gebildet und dieses mit dem gemessenen Verhältnis der Windgeschwindigkeiten verglichen wird (siehe Abbildung 17). Es ist zu erkennen, dass der generelle Verlauf zwar gut wiedergegeben wird, die Annahme einer linearen Abhängigkeit mit der Windgeschwindigkeit aber nur unzureichend erfüllt ist. Außerdem liegt die Korrekturfunktion im Mittel unter den gemessenen Werten, was darin begründet ist, dass die Windgeschwindigkeitsmessung des Ultraschallanemometers generell etwa 1% niedriger ausfällt als die des Schalensternanemometers.

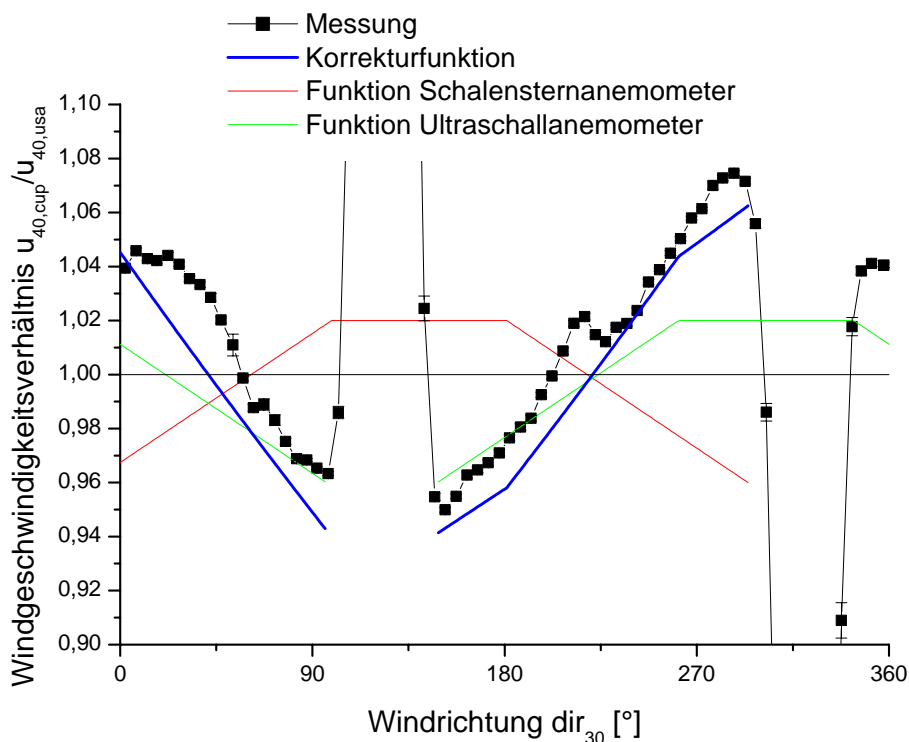


Abbildung 18: Vergleich des gemessenen Windgeschwindigkeitsverhältnisses des Schalensternanemometers und des Ultraschallanemometers auf 40m Höhe mit dem aus den Korrekturfunktionen modellierten Verhältnis

8.2 Mittlere Profile

Die, wie in Abschnitt 8.1 beschrieben, korrigierten Windgeschwindigkeiten der Schalensternanemometer werden zur Erstellung des Höhenprofils der Windgeschwindigkeit verwendet. Abbildung 19 zeigt das mit den Schalensternanemometern gemessene Höhenprofil der Windgeschwindigkeit. Außerdem ist ein linearer Fit an die gemittelten Werte dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Form des Höhenprofils in Höhen von 30m bis 70m näherungsweise linear verläuft und nicht logarithmisch. Dies wird insbesondere durch Vergleich mit Abbildung 20 deutlich, die die gleichen Werte in logarithmischer Darstellung zeigt.

Die Messung auf 80m Höhe zeigt einen deutlich höheren Wert als ein lineares Profil ergeben würde, während die Messwerte für 90m und 100m vergleichsweise geringer sind. Es muss allerdings beachtet werden, dass die bei Windgeschwindigkeitsmessungen auftretenden systematischen Messfehler durch Kalibrierung der Instrumente, unvollständige Korrektur von Umströmungseffekten, etc., etwa 1-2% betragen können und damit in der gleichen Größenordnung liegen wie die festgestellten Abweichungen. Außerdem ist zu beachten, dass die Messung in 100m Höhe durch die Umströmung der Blitzableiterstangen gestört ist, die nicht korrigiert wurde und daher hier Abweichungen zu erwarten sind (Messwert eingeklammert).

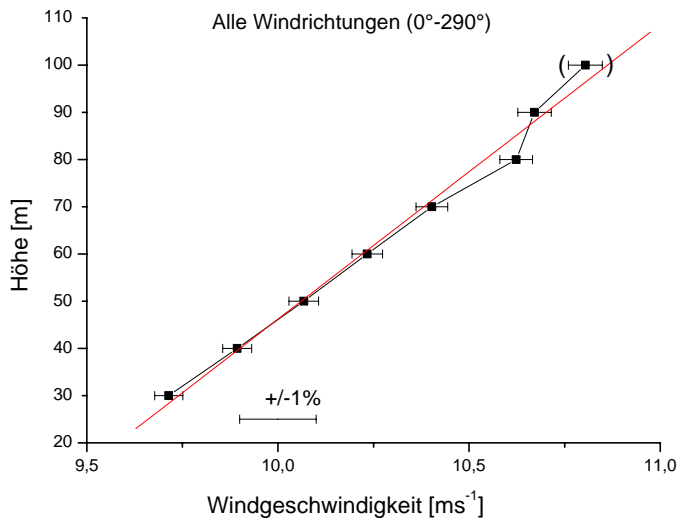


Abbildung 19: Gemessene mittlere Windgeschwindigkeiten der Schalensternanemometer in verschiedenen Höhen; Fehlerbalken zeigen die berechnete Standardabweichung des Mittelwertes; außerdem ist ein linearer Fit dargestellt

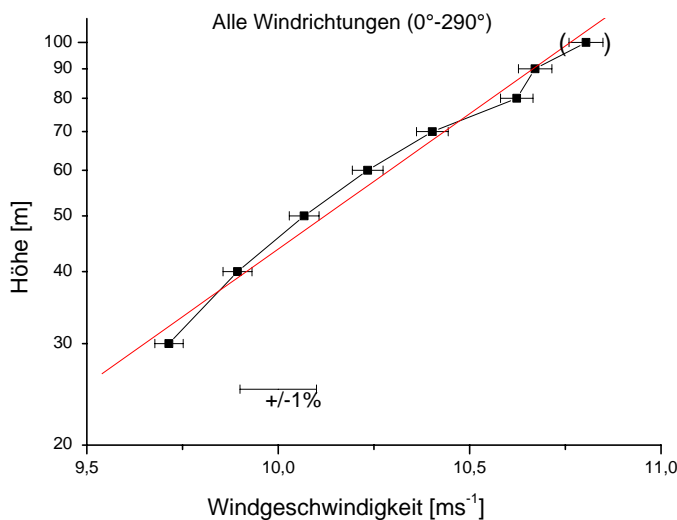


Abbildung 20: Wie Abbildung 19, nur in logarithmischer Darstellung und mit logarithmischem Fit

8.3 Stabilitätsabhängigkeit der Windprofile

Das Höhenprofil der Windgeschwindigkeit in der neutralen, bodennahen, atmosphärischen Grenzschicht kann unter homogenen und stationären Bedingungen als logarithmisches Profil beschrieben werden:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (8.1)$$

Die Windgeschwindigkeit u in der Höhe z ist dabei bestimmt durch die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* und die aerodynamische Rauigkeitslänge der Oberfläche z_0 . κ ist die von Karman Konstante, hier (wie allgemein üblich) als 0.4 angenommen.

Während die Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Höhe bei neutraler Schichtung logarithmisch ist, wird sie beim diabatischen Profil der Monin-Obukhov Theorie als linear-logarithmisch angenommen:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \Psi_m\left(\frac{z}{L}\right) \right] \quad (8.2)$$

Hier ist L die Obukhov-Länge und Ψ_m die integrierte universelle Stabilitätsfunktion. Für diese wurde die Businger-Dyer Formulierung (Businger et al., 1971) verwendet. Für die empirischen Parameter β und γ wurden die Werte verwendet, die Högström (1988) aus einer Reanalyse der Kansas Daten für die von Karman Konstante von 0.4 bestimmt hat ($\beta=4.8$ and $\gamma=19.3$).

$$\Psi_m = \begin{cases} 2 \ln\left(\frac{1 + \Phi_m^2}{2}\right) - 2 \tan^{-1}(\Phi_m) + \frac{\pi}{2} & \text{with } \Phi_m = \left(1 - \gamma \frac{z}{L}\right)^{1/4} \text{ for } z/L < 0 \\ -\beta \frac{z}{L} & \text{for } z/L > 0 \end{cases} \quad (8.3)$$

Um die Abhängigkeit der Profilform von der vorherrschenden thermischen Schichtung zu untersuchen, wurden die Messwerte in Abhängigkeit von der mit dem Ultraschallanemometer in 40m Höhe gemessenen Stabilität gemittelt. Dabei wurde zwischen nahezu neutralen ($-0.02 < 10m/L < 0.02$), unstabilen ($-2 < 10m/L < -0.02$) und stabilen ($0.02 < 10m/L < 0.05$) Situationen unterschieden. Das Ergebnis zeigt Abbildung 21. Zu erkennen ist, dass die mittlere Windgeschwindigkeit bei unstabiler Schichtung deutlich geringer ist als bei neutraler und stabiler Schichtung, was den Vergleich der Profilformen erschwert.

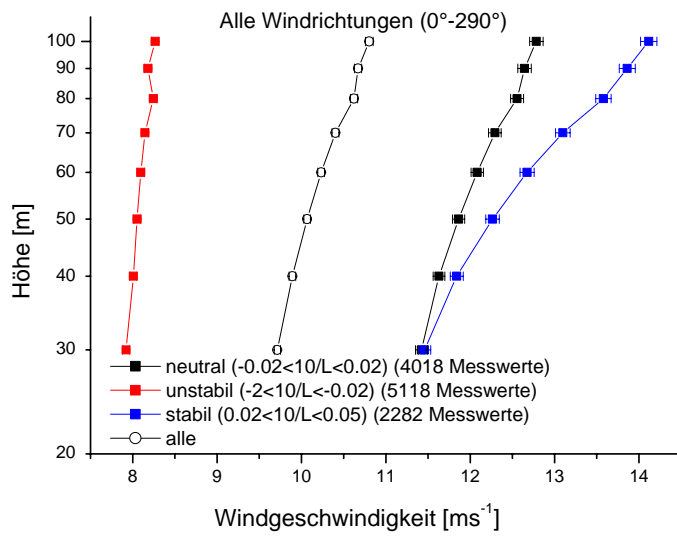


Abbildung 21: Stabilitätsabhängige Höhenprofile der Windgeschwindigkeit für Messungen mit neutraler, unstabiler und stabiler Schichtung; gezeigt sind Mittelwerte der mit den Schalensternanemometern gemessenen Windgeschwindigkeiten und deren Standardabweichungen

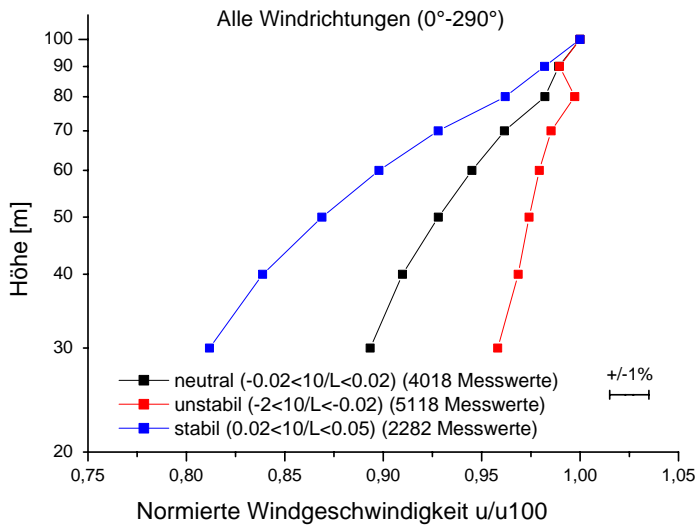


Abbildung 22: Wie Abbildung 21, aber mit jeweils auf den Messwert in 100m Höhe normierten Windprofilen

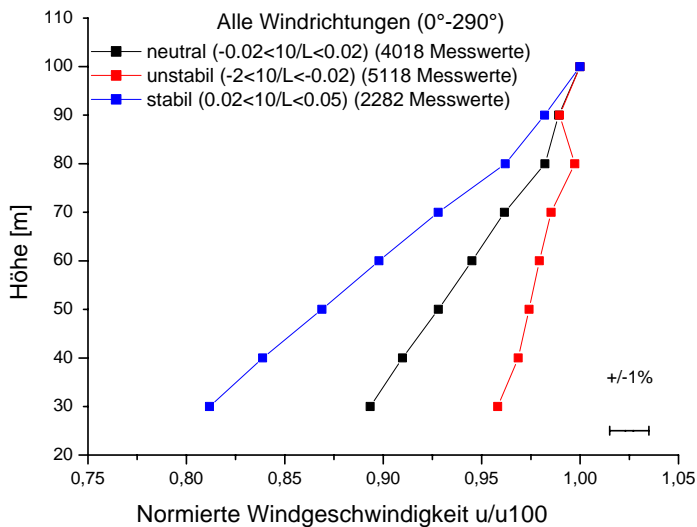


Abbildung 23: Wie Abbildung 22, aber in linearer Darstellung

Zum Vergleich der Profilformen wurden daher die gemessenen Windgeschwindigkeiten jeweils auf die Windgeschwindigkeit in 100m Höhe normiert (Abbildung 22). Wie erwartet, ist bei unstabiler Schichtung die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe am geringsten, da bei unstabiler Schichtung - bedingt durch die zusätzliche auftriebsinduzierte Turbulenz - der vertikale Impulstransport am größten ist. Bei neutraler Schichtung tritt dagegen nur scherungsbedingte Turbulenz auf und das Windprofil ist entsprechend flacher. Bei stabiler Schichtung wird auch die scherungsbedingte Turbulenz durch die thermische Stabilität der Luftschichtung zum Teil unterdrückt, so dass der Impulstransport am schwächsten und daher das Höhenprofil am flachsten ist.

Die Form der Profile entspricht dagegen nicht den Erwartungen. Auch bei nahezu neutraler Schichtung ist zumindest von 30m bis 70m Höhe kein logarithmisches Windprofil zu beobachten. Wie in Abbildung 23 zu sehen ist, ist das Profil bei stabiler und neutraler Schichtung in diesem Höhenbereich nahezu linear. Bei unstabiler Schichtung ist zwischen 40m und 70m ein nahezu linearer Verlauf zu beobachten.

8.4 Abhängigkeit des Windprofils von Windrichtung und Küstenentfernung

Zur Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren auf das Windprofil werden die Messdaten in Abhängigkeit von der Windrichtung in mehrere Sektoren aufgeteilt und sektorweise gemittelt. Die Definition der verwendeten Windrichtungssektoren ist in Tabelle 5 gezeigt. Der Abstand zur Küste ist in Sektor 3 am kleinsten, bei Sektor 2 ebenfalls noch klein im Vergleich zu den Sektoren 4 und 5, Sektor 1 umfasst sehr unterschiedliche Küstenabstände.

Tabelle 5: Definition der verwendeten Windrichtungssektoren

| | Windrichtung | Beschreibung | Abstand zur Küste |
|----------|--------------|------------------------------------|-------------------|
| Sektor 1 | 350° - 045° | Norwegen und Dänemark | 150-550 km |
| Sektor 2 | 045°-110° | Deutsche Westküste | 120-150 km |
| Sektor 3 | 110°-225° | Niederlande und deutsche Nordküste | 50-120 km |
| Sektor 4 | 225°-255° | Englischer Kanal | 360-480 km |
| Sektor 5 | 255°-290° | England | 480-550 km |

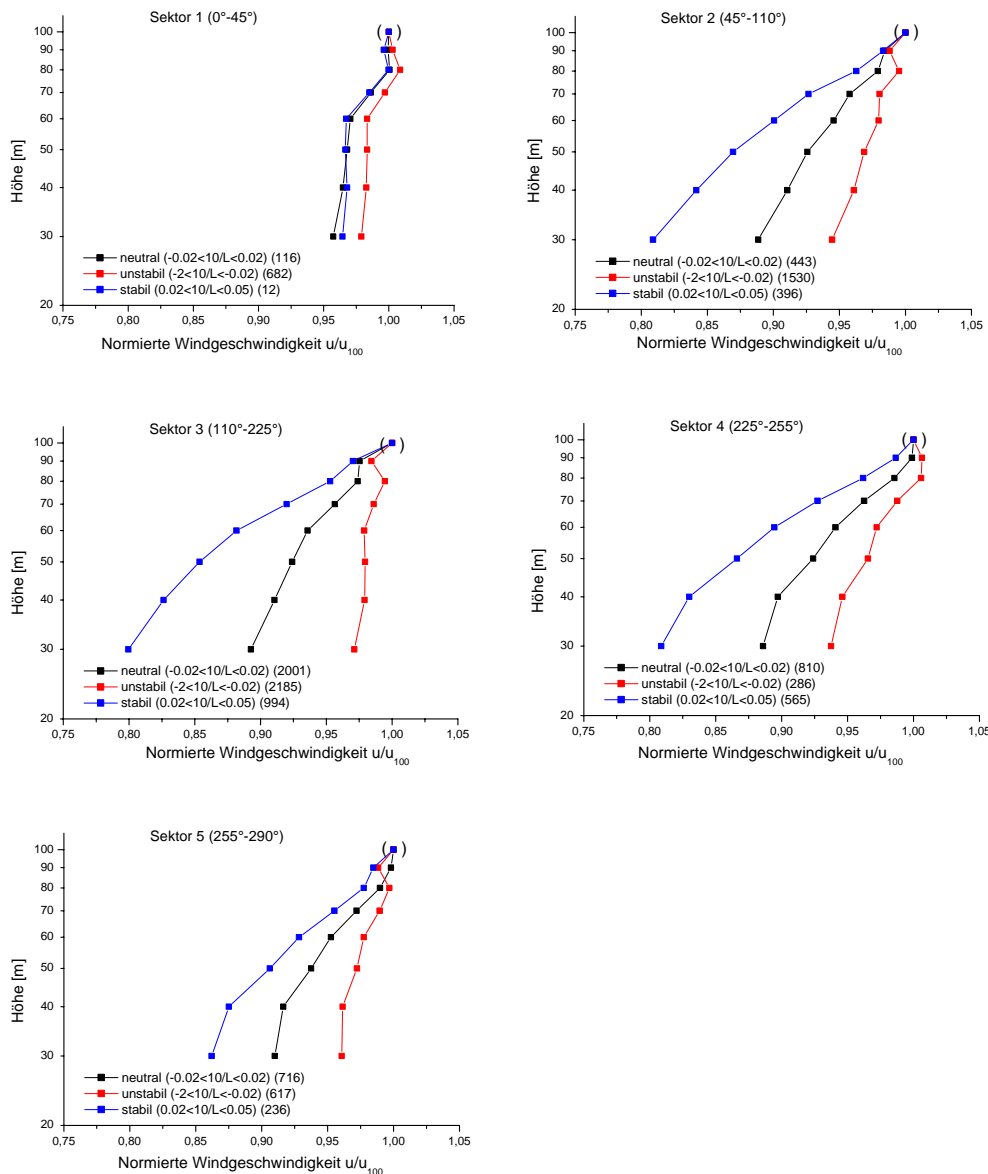


Abbildung 24: Vertikale Windprofile für verschiedene Windrichtungssektoren; gezeigt sind jeweils normierte, gemittelte Windgeschwindigkeiten für Fälle mit neutraler, instabiler und stabiler atmosphärischer Schichtung

In Abbildung 24 werden die gemessenen Windprofile für jeden Sektor dargestellt, die wie in Abschnitt 8.3 beschrieben erzeugt wurden. Deutlich ist die große Variation der Profile für die unterschiedlichen Sektoren zu sehen. Der Anstieg der Windgeschwindigkeit mit der Höhe (die Windscherung) ist für die unterschiedlichen Stabilitätsklassen für einige Sektoren klein (siehe Sektor 1 und 5), für andere erheblich größer (siehe Sektor 3). Insbesondere Sektor 1 zeigt ein deutlich von den anderen Sektoren abweichendes Bild.

In vielen Profilen sind deutliche Änderungen der Windscherung mit der Höhe ("Knicks") zu erkennen, die aber in unterschiedlichen Höhen auftreten: Bei Sektoren 1 und 3 ist ein "Knick" in 60m Höhe erkennbar, in Sektor 2 liegt er eher bei 70m und in den Sektoren 4 und 5 tritt ein deutlicher "Knick" in 40m Höhe auf.

Für Höhen über 70m zeigen die Profile z.T. sehr ungewöhnliche Formen, insbesondere bei unstabiler Schichtung, wo in einigen Profilen die Windgeschwindigkeit in 90m Höhe unter der in 80m und 100m liegt. Insgesamt lässt sich für 80m eine eher erhöhte und für 90m eine erniedrigte Windgeschwindigkeit feststellen.

Für Höhen bis 70m sind in den sektorweisen Profilen im Gegensatz zum über alle Windrichtungen gemittelten Profil auch deutlich logarithmische Abschnitte zwischen den "Knicks" zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass möglicherweise die Mittelung von logarithmischen Profilen mit "Knicks" in verschiedenen Höhen zu der eher linearen Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit mit der Höhe in den gemittelten Profilen führt.

Auffallend ist auch das, für die einzelnen Sektoren sehr unterschiedliche, Auftreten der Stabilitätsklassen. Während in Sektor 1 hauptsächlich instabile Situationen vorkommen, dominieren z.B. in Sektor 4 die neutralen und stabilen Situationen. Wegen der Unsicherheit in der Bestimmung von L ist zu vermuten, dass die jeweils dominante Stabilitätsklasse auch in den anderen Klassen vorhanden ist und die Profile verfälscht.

Ein deutlicher Einfluss der Küstenentfernung auf die Profile kann nicht festgestellt werden. Vergleicht man die Sektoren 1 und 2, die geringere Entfernungen zur Küste aufweisen, mit den Sektoren 3 und 4, so fällt die unterschiedliche Höhe des ersten "Knicks" auf. Die Sektoren unterscheiden sich aber auch in anderer Hinsicht, z.B. in der vorherrschenden Stabilität.

Zur genaueren Untersuchung der gefundenen Unterschiede in den Profilen sollten weitere mögliche Einflussfaktoren wie die jahreszeitliche Entwicklung, die Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und von der Meeresströmung in die Analyse mit einbezogen werden.

9 Vergleich der gemessenen Windprofile mit der auf den Flussmessungen basierenden Monin-Obukhov Theorie

Eine Möglichkeit des Vergleichs der Windprofile mit den theoretischen Erwartungen der Monin-Obukhov Theorie ist der Vergleich des Verhältnisses von zwei Windgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Höhen.

Da die Obukhov-Länge L und die Bodenrauigkeit z_0 für homogene, stationäre Strömungen als konstant angenommen werden können, kann das Verhältnis zweier Windgeschwindigkeiten aus dem Monin-Obukhov Profil berechnet werden:

$$\frac{u(z_2)}{u(z_1)} = \frac{\left[\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) - \Psi_m\left(\frac{z_2}{L}\right) \right]}{\left[\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right) - \Psi_m\left(\frac{z_1}{L}\right) \right]} \quad (9.1)$$

Abbildung 25 bis Abbildung 27 zeigen die gemessenen Quotienten der Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen (60m/30m, 90m/60m, 90m/30m) in Abhängigkeit vom Stabilitätsparameter $10m/L$. Dabei wurden nur Messwerte dargestellt, bei denen die Windgeschwindigkeiten in allen 3 Höhen (90m, 60m, 30m) größer als 5 m/s sind, um Probleme mit großen Unsicherheiten der Quotienten bei kleinen Absolutwerten zu vermeiden. Außer den Messdaten sind auch die bin-gemittelten Werte (Binweite 0.02) mit der Standardabweichung ihrer Mittelwerte dargestellt. Die theoretisch erwartete Abhängigkeit des Windgeschwindigkeitsverhältnisses von der Stabilität nach der Monin-Obukhov Theorie (Gleichung 8.4) ist als Kurve gezeigt.

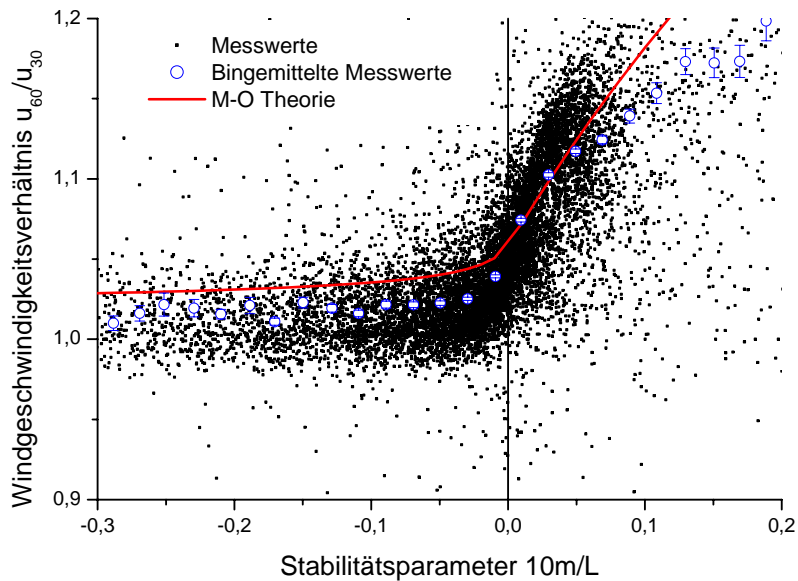


Abbildung 25: Das Verhältnis der Windgeschwindigkeiten in 60m und 30m Höhe in Abhängigkeit vom Stabilitätsparameter 10m/L; gezeigt sind gemessene Daten, die daraus bingemittelte Werte mit der Standardabweichung des Mittelwertes und die theoretisch erwartete Abhängigkeit nach der Monin-Obukhov Theorie

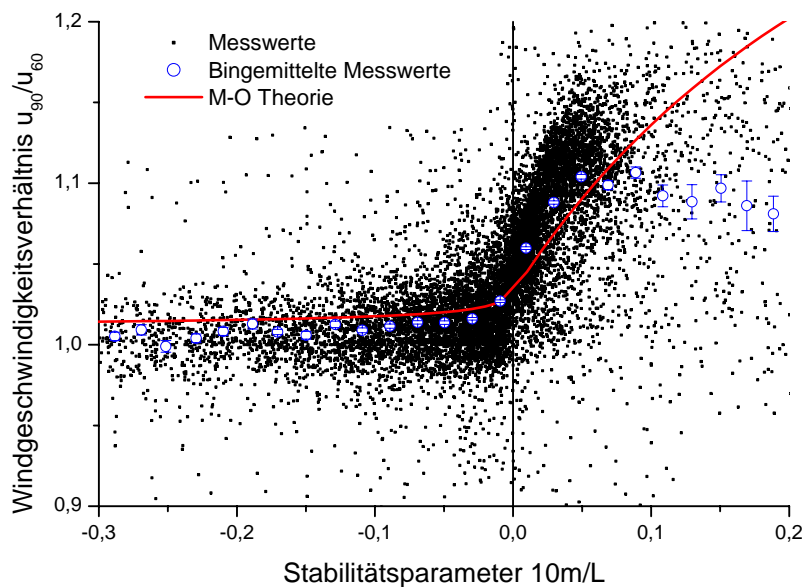


Abbildung 26: Wie Abbildung 25, aber mit dem Verhältnis der Windgeschwindigkeiten in 90m und 60m Höhe

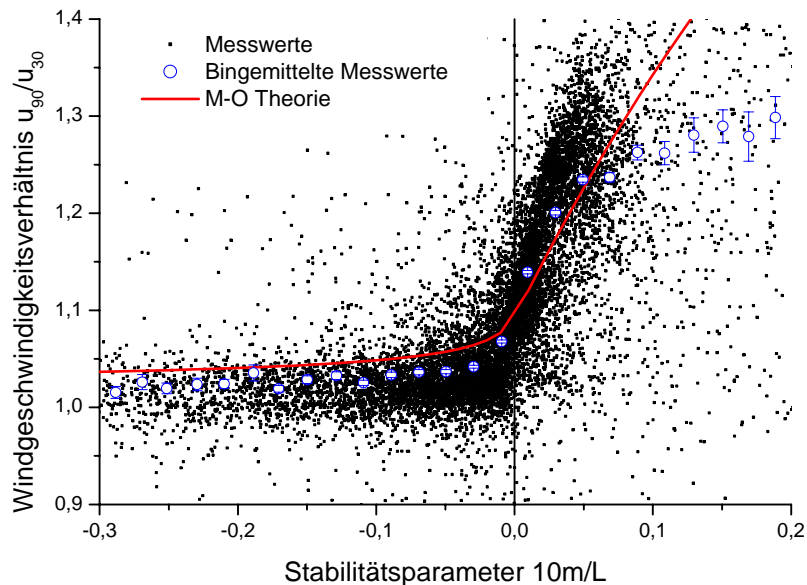


Abbildung 27: Wie Abbildung 25, aber mit dem Verhältnis der Windgeschwindigkeiten in 90m und 30m Höhe

Die Messwert streuen stark, was im wesentlichen auf zwei Gründe zurückzuführen ist: Die Sampling-Variabilität ist bei den Kovarianzmessungen, auf denen die Bestimmung des Stabilitätsparameters L beruht, groß. Dies ist insbesondere der Fall, da nur ein relativ kurzer Mittelungszeitraum von 10 Minuten verwendet wurde und die Messung in der vergleichsweise großen Höhe von 40m stattfand. Der andere wichtige Grund ist, dass eine eindeutige Abhängigkeit der Windscherung von der Stabilität nur für stationäre Strömungen zu erwarten ist, die atmosphärische Strömung aber durch das synoptischbedingte Wettergeschehen z.T. sehr instationär ist.

Der Vergleich der gemessenen Werte mit der Theorie zeigt für den Bereich unstabiler Schichtung ($10m/L < 0$) eine systematische Überschätzung der Windscherung durch die Theorie, insbesondere in niedriger Höhe (60m/30m). Bei nahezu neutraler Schichtung ($10m/L$ um 0) stimmt die Theorie gut mit den Messungen überein. Bei leicht stabilen Situationen ($0 < 10m/L < 0,05$) wird die Windscherung in größerer Höhe (90m/60m) unterschätzt. In Situationen mit stärker stabiler Schichtung ($10m/L > 0,1$) kann die Theorie offensichtlich nicht angewandt werden.

10 Vergleich mit Ergebnissen der Messung Rødsand in der Ostsee

Die Messstation Rødsand wurde 1996 als Teil einer dänischen Studie der Windbedingungen für zukünftige Offshore-Windparks errichtet. Sie steht im Gebiet des heutigen Windparks Nysted. Eine detaillierte Beschreibung der Messstation, der Instrumentierung und der Daten geben Lange et al. (2001) und Lange et al. (2004). Die Messung besteht aus einem 50m hohen Messmast ca. 11km südlich der Insel Lolland (Siehe Abbildung 28). Die Windgeschwindigkeiten wurden ähnlich wie bei den FINO 1 Daten (siehe Abschnitt 7) nach (Højstrup, 1999) für Umströmungseffekte des Messmastes korrigiert.

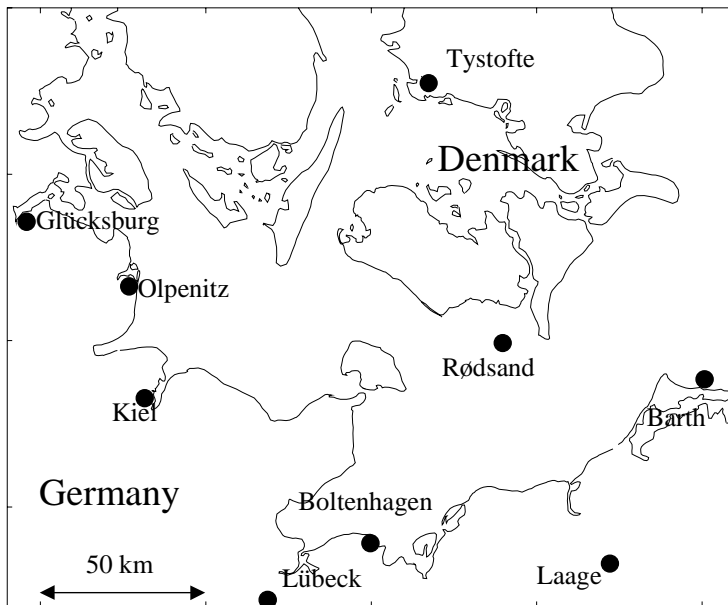


Abbildung 28: Karte der Messstation Rødsand

Im Gegensatz zu FINO 1 liegt Rødsand in geschützten Gewässern der dänischen Ostsee. Die Abstände zur Küste betragen in fast alle Richtungen zwischen etwa 10km und 80km.

Abbildung 29 zeigt das bei Rødsand gemessene Windgeschwindigkeitsverhältnis zwischen 10m und 50m Höhe zusammen mit der Beziehung nach Gleichung (9.1) (siehe Lange et al (2004b)). Abbildung 30 zeigt zum Vergleich das bei FINO 1 gemessene Windgeschwindigkeitsverhältnis zwischen 30m und 60m Höhe in gleicher Skalierung.

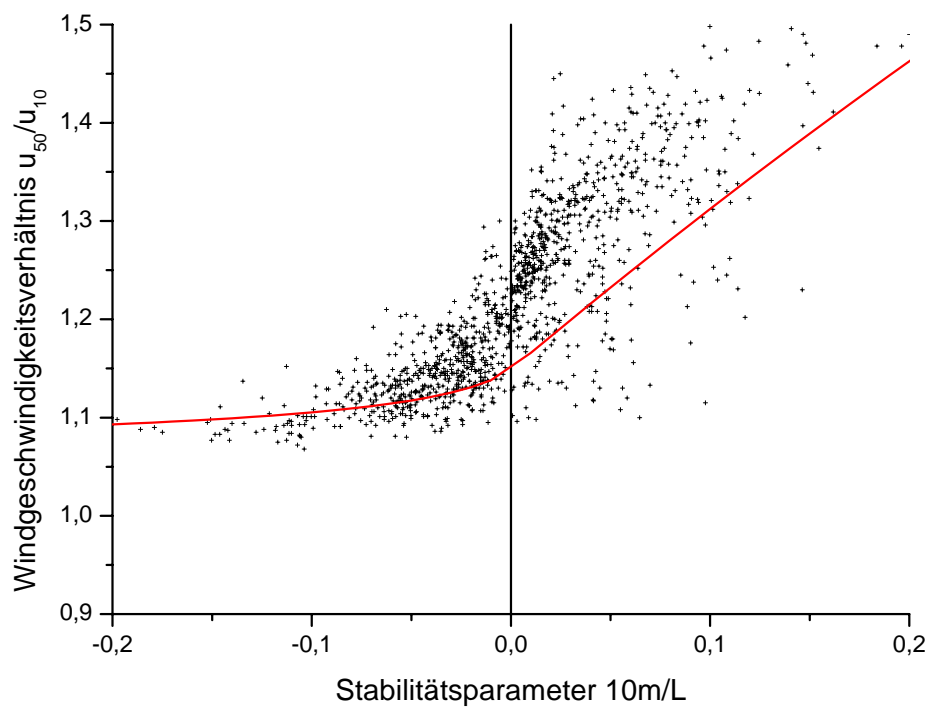


Abbildung 29: Das Verhältnis der Windgeschwindigkeiten in 50m und 10m Höhe in Rødsand in Abhängigkeit vom Stabilitätsparameter 10m/L; die durchgezogene Linie zeigt die theoretisch erwartete Abhängigkeit (nach Lange et al (2004a), verändert)

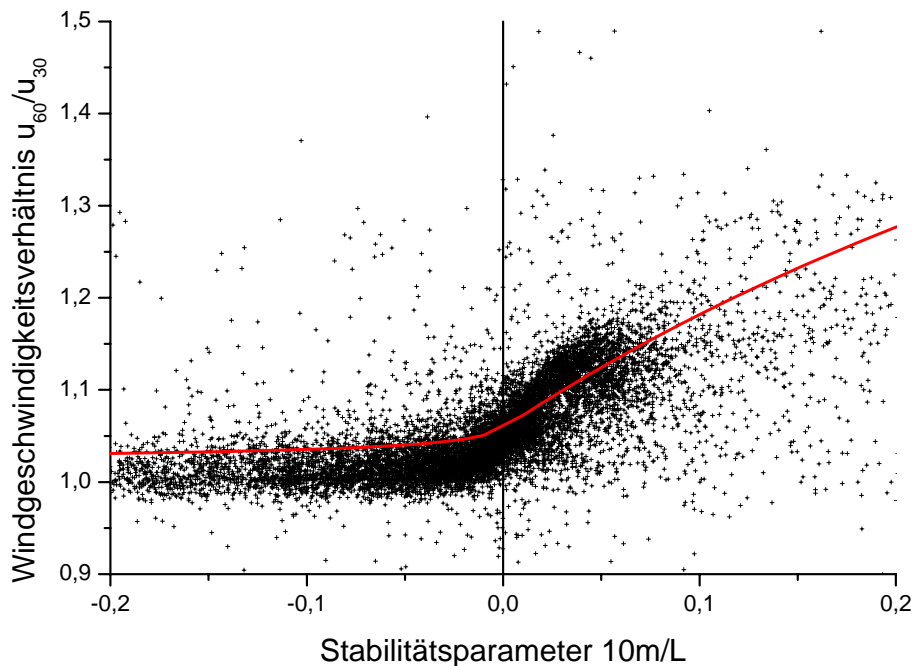


Abbildung 30: Das Verhältnis der Windgeschwindigkeiten in 60m und 30m Höhe bei FINO 1 in Abhängigkeit vom Stabilitätsparameter 10m/L; die durchgezogene Linie zeigt die theoretisch erwartete Abhängigkeit

Die wesentlich geringere Streuung der Messdaten bei der Rødsand Messung ist darin begründet, dass hier die Daten von stark nichtstationären Situationen entfernt wurden sind. Beim Vergleich zwischen Messung und Modell fällt auf, dass bei beiden Messungen die Abhängigkeit des Verhältnisses der Windgeschwindigkeiten von der Stabilität stärker ist als theoretisch erwartet. Allerdings führt dies bei der Rødsand Messung dazu, dass neutrale und stabile Situationen unterschätzt werden, während bei der FINO 1 Messung vor allem unstabile Situationen überschätzt werden. Die extrem niedrigen Windgeschwindigkeitsverhältnisse der FINO 1 Messung bei unstabiler Schichtung müssen weiter untersucht werden.

11 Fazit

Die Instrumentierung der Messplattform FINO 1 wurde im Rahmen des Projektes erfolgreich aufgerüstet. Die drei seit August 2003 am Messmast installierten Ultraschallanemometer liefern hochaufgelöste und qualitativ hochwertige Messwerte. Die drei auf FINO1 installierten Ultraschallanemometer des Typs Gill R3-50 wurden vor der Montage im Windkanal der Universität Oldenburg vermessen. Es wurde gezeigt, dass eine Nachkalibration der bereits werksseitig kalibrierten Instrumente nötig ist. Hierfür wurde ein Kalibrationsverfahren entwickelt, das eine dreidimensionale Kalibration des Windvektors bei vertretbarem Messaufwand ermöglicht. Aus den hochaufgelösten Messdaten wurden Zeitreihen von 10-minütigen Mittelwerten von Impulsfluss, Wärmefluss und atmosphärischer Stabilität abgeleitet. Die im Rahmen des Projektes vorgenommene erste Auswertung der FINO 1 Messdaten hat bereits den hohen Wert dieser Daten für das Verständnis der Windverhältnisse gezeigt.

Das am FINO 1 Mast gemessene vertikale Windprofil wurde in einer ersten Auswertung in Abhängigkeit von Stabilität und Windrichtung untersucht und mit den Erwartungen der Monin-Obukhov Theorie verglichen. Die Ergebnisse wurden denen der Messung Rødsand in der Ostsee gegenüber gestellt.

Für das mittlere vertikale Windprofil wurden deutliche Abweichungen von der erwarteten Profilform gefunden. Bis zu einer Höhe von etwa 60m zeigt das Profil eine annähernd lineare Form statt der erwarteten Ähnlichkeit zur logarithmischen Abhängigkeit. Dieses Verhalten ähnelt den bei der Messung Rødsand gefundenen Abweichungen. Der Messmast in Rødsand ist im Gegensatz zur 100m hohen FINO Messung nur 50m hoch. Bei den FINO Daten zeigt sich für die Messungen über 70m Höhe eine Änderung der Profilform: Der Anstieg der Windgeschwindigkeit mit der Höhe ist hier geringer als erwartet. Die Messungen der atmosphärischen Stabilität zeigen deutliche Unterschiede zwischen Windprofilen unterschiedlicher Stabilitätsklassen. Auch für unterschiedliche Windrichtungssektoren ergeben sich Unterschiede in den vertikalen Windprofilen.

Der Zusammenhang zwischen Profil- und Flussmessungen wurde durch den Vergleich der Windgeschwindigkeitsverhältnisse in verschiedenen Höhen mit den aus den Flussmessungen resultierenden Erwartungen der Monin-Obukhov Theorie untersucht. Auch hier zeigten sich unerwartete Abweichungen. Die Abhängigkeit des Verhältnisses der Windgeschwindigkeiten von der Stabilität ist, ähnlich wie bei der Messung Rødsand in der Ostsee, stärker ist als theoretisch erwartet. Allerdings führt dies bei der Messung Rødsand dazu, dass neutrale und stabile Situationen unterschätzt werden, während bei der FINO 1 Messung vor allem instabile Situationen überschätzt werden.

Das vertikale Windprofil ist für die Windenergienutzung von besonderer Relevanz. Es hat direkte Auswirkung auf die Rotorblattlasten einer Windkraftanlage, auf die Energieertragsprognose von Windparks, etc. Energieertragsprognosen beinhalten z.B. häufig eine Extrapolation der Windgeschwindigkeit aus der niedrigeren Messhöhe auf die Nabenhöhe der Anlagen. Ist der Anstieg der Windgeschwindigkeit mit der Höhe größer als erwartet, wie bei der Messung Rødsand, führt dies zu einer Unterschätzung des Energieertrags eines Windparks, während das Profil am FINO Mast über 70m eher zu einer Überschätzung führt.

Abweichungen zum geplanten Projektverlauf gab es im wesentlichen in zeitlicher Hinsicht durch die verzögerte Bereitstellung der Messdaten des FINO-Projektes des BMU. Wegen organisatorischer Probleme wurden die ersten Daten erst im März 2004 für dieses Vorhaben bereitgestellt. Mit einer Verlängerung der Projektlaufzeit von gut einem Monat und der Beschränkung der rechenzeitintensiven Auswertung der hochaufgelösten

Daten auf das für die Auswertung erforderliche Minimum konnten die im Vorhaben geplanten Arbeiten trotzdem durchgeführt werden.

Die FINO Plattform vor Borkum ist unseres Wissens nach weltweit die erste Mastmessung auf dem Meer mit einer Höhe von 100 m. Die gewonnenen meteorologischen Daten sind weltweit einmalig. Durch die mit diesem Projekt ermöglichte Messung der vertikalen Flüsse zusätzlich zu den Profilmessungen kann wesentlich zum grundlegenden wissenschaftlichen Verständnis der Strömungsverhältnisse in der küstennahen, marinen, atmosphärischen Grenzschicht beigetragen werden. Damit ist eine wichtige Voraussetzung geschaffen worden, um die Stromerzeugung aus Offshore-Windenergie langfristig erfolgreich und effizient entwickeln zu können. Diese Daten werden für die weitere Forschung zur Offshore-Windenergienutzung eine wichtige Rolle spielen.

Die erste Auswertung der Messdaten zeigte sowohl beim vertikalen Windprofil als auch bei den Fluss-Profil Relationen systematische Abweichungen von den theoretischen Erwartungen, die für die Windenergienutzung relevant sind. Sie entsprechen nur zum Teil den in der Ostsee gefundenen Ergebnissen. Die mit diesem Projekt gewonnenen Messdaten zeigen deutlich die Notwendigkeit einer grundlegenden wissenschaftlichen Untersuchung der Strömung in der marinen Grenzschicht.

Dazu ist zunächst eine Absicherung der in dieser ersten Auswertung gefundenen Ergebnisse mit den Daten der anderen beiden Ultraschallanemometer nötig, sowie eine Reduzierung der Messunsicherheit der atmosphärischen Stabilität. Dies schafft die Voraussetzung für die Erforschung der Ursachen der in diesem Projekt gefundenen ungewöhnlichen vertikalen Windprofile und Stabilitätsfunktionen. Diese Frage führt zu der Frage, welche Faktoren das Windprofil über dem Meer beeinflussen. Neben den hier untersuchten Faktoren atmosphärische Stabilität und Abstand zur Küste sind hier beispielsweise das Wellenfeld, die Meeresströmungen, die Höhe der Grenzschicht und Einflüsse aus der freien Atmosphäre denkbar. Letztlich sollte das Ziel sein, eine Methode zu entwickeln, um die Parameter der Monin-Obukhov Theorie über dem Meer bestimmen und insbesondere auch ihre Grenzen angeben zu können. Die mit Hilfe dieses Projektes gewonnenen hochwertigen Messdaten von Impuls- und Wärmefluss haben eine wichtige Voraussetzung für diese zukünftige Forschung geschaffen.

12 Literaturverzeichnis

- Businger, J.A., Wyngaard, J.C., Isumi, Y., Bradley, E.F., Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 28, pp 181-189, 1971
- Foken, T., *Angewandte Meteorologie*, Springer Verlag, Berlin, 2003
- Gill Instruments Limited, *Datenblatt, R3-50 Ultrasonic Research Anemometer*, 2001
- GL, Germanischer Lloyd Windenergie GmbH, <http://www.fino-offshore.de>, 2004
- Højstrup, J., Vertical extrapolation of offshore windprofiles. in: E.L. Petersen, P. Hjulær Jensen, K. Rave, P. Helm, H. Ehmann (eds.), *Wind energy for the next millennium. Proceedings of the European wind energy conference EWEC '99 (Nice 1999)*, James and James, London, 1999. pp. 1220-1223, 1999
- Högström, U.: 'Nondimensional wind and temperature profiles' *Boundary-Layer Meteorol.* 42, 55-78, 1988
- Kaimal, J. C., Finnigan, J. J., *Atmospheric Boundary Layer Flows*, Oxford University Press, New York, 1994
- Lange, B. and J. Højstrup: Evaluation of the wind-resource estimation program WASP for offshore applications. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89, 271-291 (2001).
- Lange, B., R. J. Barthelmie and J. Højstrup: *Description of the Rødsand field measurement. Risø-R-1268*. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2001
- Lange, B., H. K. Johnson, S. Larsen, J. Højstrup, H. Kofoed-Hansen, M. J. Yelland: On detection of a wave age dependency for the sea surface roughness. *Journal of Physical Oceanography* Vol. 34, pp. 1441-1458, 2004
- Lange B, Larsen S, Højstrup J, Barthelmie R., The influence of thermal effects on the wind speed profile of the coastal marine boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology* Vol. 112, pp. 587-617, 2004a
- Lange, B., S. Larsen, J. Højstrup, R. Barthelmie, Importance of thermal effects and sea surface roughness for offshore wind resource assessment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Vol. 92 no. 11, pp. 959-998, 2004b
- Neumann, T. et al, Erste Betriebserfahrungen mit der FINO1-Forschungsplattform in der Nordsee, *DEWI Magazin*, Nr. 24, 27-34, 2004
- o.A.: *Strategie der Bundesregierung zur Windenergienutzung auf See*, BMU, 2002
- Rakebrandt-Gräßner, P.: Forschungsplattform in der Nordsee (FINO). *Tagungsband zum 2. Symposium Offshore-Windenergie*, Universität Hannover, 9.9.2002, 2002
- Stabe, U., Langner, D., *Messung und Simulation systematischer Fehler des Ultraschallanemometers und deren Auswirkungen auf statistische Größen*, Diplomarbeit, Universität Oldenburg, 1997
- Stull, R. B., *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, Niederlande, 1988
- Tautz, S.: *Thermal Effects in the Atmospheric Boundary Layer above the North Sea*, Diplomarbeit, Universität Oldenburg, ForWind Report 2004-01, 2004
- Wilczak, J.M., Oncley, S.P., Stage, S.A., Sonic Anemometer Tilt Correction Algorithms, *Boundary Layer Meteorology*, Vol 99., pp 127-150, 2000

Anhang

Anhang I: Veröffentlichungen

- Poster, vorgestellt auf der Konferenz '1st General Assembly of the European Geophysical Union' im April 2004 in Nizza
- Tautz, S., B. Lange, D. Heinemann: On the importance of flow distortion correction of ultrasonic anemometers for flux measurements in the marine surface layer., Geophys. Res. Abstr. 6 (2004) published on CD
- Tautz, S., B. Lange, D. Heinemann: Correction of the heat and momentum flux measurements with the ultrasonic anemometers at the FINO I offshore meteorological mast for flow distortion and mounting effects. DEWEK 2004 (in print)
- Lange, B.: Comparison of wind conditions of offshore wind farm sites in the Baltic and North Sea. DEWEK 2004 (in print)

Anhang II: 'Wind Tunnel Investigation of Ultrasonic Anemometers (R3-50)'

Anhang III: 'Quality Control of FINO 1 Data for the BAGO Project'

On the Importance of Flow Distortion Correction of Ultrasonic Anemometers for Flux Measurements in the Marine Surface Layer

S. Tautz, B. Lange, D. Heinemann

ForWind – Center for Wind Energy Research, Institute of Physics, University of Oldenburg, Germany, (saskia.tautz@mail.uni-oldenburg.de)

Abstract

Accurate flux measurements are commonly derived from sonic anemometer measurements with the eddy-correlation method. Calibration of these instruments for flow distortions is of crucial importance when high accuracy flux measurements are needed, e.g. for the validation of flux-profile relations in the marine surface layer.

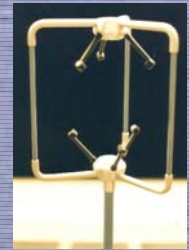
Three Gill 1210R3 ultrasonic anemometers are employed at different heights at the offshore measurement platform FINO I, 45 km north of Borkum in the North Sea. Prior to installation, the anemometers were tested in the wind tunnel of the University of Oldenburg. An empirical correction method for the three-dimensional wind vector has been developed. The correction procedure is tested with first example data from the FINO I platform.

Wind Tunnel Measurements



The University of Oldenburg closed circuit wind tunnel with an open test section of $1.8 \times 1.0 \times 0.8 \text{ m}^3$ has been used.

The response of the three sonic anemometers was tested for selected tilt angles ranging from -15 to 15 degrees, azimuth angles from 0 to 360 degrees and wind speeds from 0 to 15 m/s . Four Pitot tubes were used as reference signal.



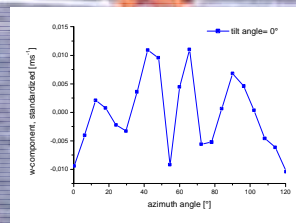
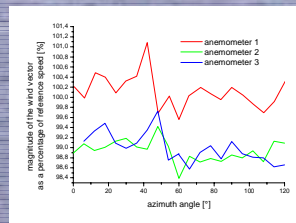
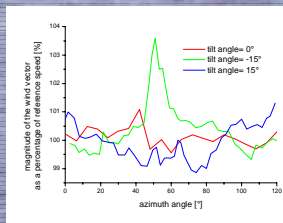
The anemometers are supplied with a calibration for the horizontal wind speed in purely horizontal flow by the manufacturer.

This corrects the direction dependent flow-distortion well. Small deviations were found for flow passing close to the struts.

For tilted flow larger deviations from the manufacturers calibration for the horizontal component were found.

However, deviations in the overall response of the three anemometers of up to 1.4% were found.

For the vertical wind speed no calibration is supplied, here deviations are found for horizontal as well as tilted flow.

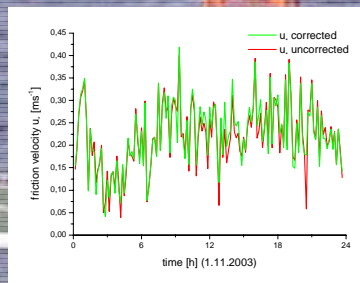
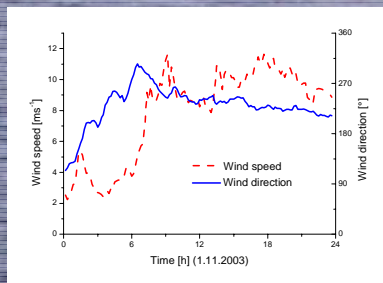


Example: Uncorrected and Corrected Measurements

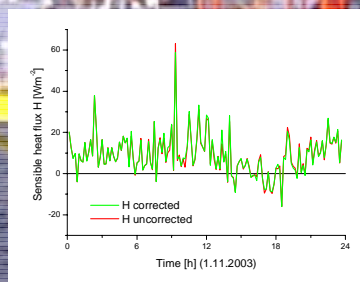
Test data from the FINO I field measurement with and without applying the correction method have been evaluated and compared. One day of measurements of an ultrasonic anemometer at a height of 60 m have been used. The sampling rate was 10 Hz .

The preliminary calculations of the heat flux H and the friction velocity u_* show rather small changes in H , while stronger corrections can be found for u_* , where especially low peaks are affected.

For the mean values of H and u_* the changes are found to be 2.1% and 1.9% , respectively. The standard deviation for u_* is slightly reduced.



| | mean | stddev |
|-------------------|---------------------------|-----------|
| H corrected | 9.20 Wm^{-2} | 9.87 |
| H uncorrected | 9.11 Wm^{-2} | 9.83 |
| difference | 0.09 Wm^{-2} | 1.15 |
| u_* corrected | 0.22257 ms^{-1} | 0.07272 |
| u_* uncorrected | 0.21885 ms^{-1} | 0.07385 |
| difference | 0.00372 ms^{-1} | 0.02015 |



Correction Method

To reduce the number of wind tunnel measurements needed for the calibration, a simplified method based on lookup tables for an azimuth and tilt angle dependent calibration has been developed:

- For small tilt angles – as expected for offshore measurements – a linear dependency of the calibration factor on the flow distortion seems justified

- Apart from tilted mounting of the anemometer, which is treated separately, the flow distortion is assumed to be periodic with the 120 degree symmetry of the probe head

- It has been shown that the wind speed dependence of the flow distortion is approximately linear

Conclusion

Systematic errors similar at all three anemometers as well as errors which are specific for each individual instrument were found in wind tunnel measurements, which show the need for re-calibration, especially for the vertical component.

An azimuth and tilt angle dependent calibration method has been developed, which employs a limited number of wind tunnel measurements.

The method has been tested with first data from the FINO I field measurement.

Evaluation of these data has just started, but first example data show significant changes in heat flux and friction velocity measurements due to the calibration. However, the influence of the flow distortion seems to be smaller for this offshore location than for measurements over land.

Acknowledgements

This work has partly been funded by the „Deutsche Bundestiftung Umwelt“ within the BAGO-project.

The measurements at FINO I are conducted by the German Wind Energy Institute (DEWI).

The test setup in the wind tunnel has been supplied by Deutsche WindGuard GmbH.



ON THE IMPORTANCE OF FLOW DISTORTION CORRECTION OF ULTRASONIC ANEMOMETERS FOR FLUX MEASUREMENTS IN THE MARINE SURFACE LAYER

S. Tautz, B. Lange, D. Heinemann

ForWind - Center for Wind Energy Research, Institute of Physics, University of Oldenburg,
Germany, (saskia.tautz@mail.uni-oldenburg.de)

Accurate flux measurements play a decisive role in the atmospheric sciences, e. g. in climate modelling and air-sea interaction. They are commonly derived from sonic anemometer measurements with the eddy-correlation method. Various methods for the reduction of measurement errors due to flow distortion and tilting were introduced in the last decades. This is of crucial importance when high accuracy flux measurements are needed, e.g. for the validation of flux-profile relations in the marine surface layer.

Three ultrasonic anemometers are employed at different heights at the offshore measurement platform FINO I north of Borkum in the North Sea. Prior to installation, the anemometers were calibrated in a wind tunnel and an empirical correction procedure for the three-dimensional wind vector has been developed. Systematic errors similar at all three anemometers as well as errors which are specific for each individual instrument are found. For the horizontal wind components it is found that the manufacturer calibration can be improved. Additionally, a correction of vertical wind speed has to be applied. In addition to flow distortion errors, possible errors due to non vertical mounting have to be considered. While at field measurements a tilt correction method has to be applied, a simple method has been derived to determine the tilt error at wind tunnel measurements.

The correction procedure is used with example data from the FINO I platform to investigate the importance of the flow distortion correction. Comparisons of fluxes calculated with uncorrected and corrected data show the improvement in the flux calculation. Also, flux measurements from three different heights will be compared with each other.

Correction of the Heat and Momentum Flux Measurements with the Ultrasonic Anemometers at the FINO I Offshore Meteorological Mast for Flow Distortion and Mounting Effects

Saskia Tautz, Bernhard Lange, Detlev Heinemann
ForWind - Center for Wind Energy Research, Oldenburg University, 26111 Oldenburg, Germany
email: saskia.tautz@forwind.de, Tel. +49-441-36116736, Fax +49-441-36116739

Summary

Three ultrasonic anemometers, were investigated in the Oldenburg wind tunnel, prior to installation on the measurement platform FINO I. The calibration was found to be insufficient for flux measurements and was corrected and enhanced. A method depending only on few measurements was developed for this. The correction was tested with wind tunnel and field data. Additionally, the method of planar fit was applied for tilt correction and a trend removal was conducted for the measured values. Improvements of the measurements and in the calculation of fluxes could be shown.

1 Introduction

The structure of the atmospheric boundary layer is largely determined by the vertical fluxes of momentum, heat and moisture between the surface and the free atmosphere. They are directly connected to the vertical profiles of wind speed, temperature and humidity. For offshore wind power utilisation, the vertical wind speed profile is of paramount importance, since it determines the wind conditions at a site.

Accurate measurements of momentum and heat flux are commonly derived from sonic anemometer measurements with the eddy-correlation method. Calibration of these instruments for flow distortion and mounting errors is of crucial importance when highly accurate flux measurements are needed.

Three Gill 1210R3 ultrasonic anemometers are installed at different heights at the offshore measurement platform FINO I, 45 km north of Borkum in the North Sea.

Prior to installation, the response of the three sonic anemometers was tested in the wind tunnel of the University of Oldenburg. A correction method for an azimuth and tilt angle dependent calibration has been developed, which employs a limited number of wind tunnel measurements. With this method, the calibration for horizontal flow, which is supplied by the manufacturer, can be improved and extended to a three-dimensional correction.

2 Wind Tunnel Investigation

The aim of the wind tunnel investigation was to check the factory installed calibration for validity, especially accounting for the uncorrected vertical component. For a detailed description see Tautz (2004), Lange and Tautz (2004).

2.1 Measurement Instruments and Experimental Setup

The ultrasonic anemometers used in this work are from Gill Instruments Ltd., model 1210R3-50, serial numbers #255, #273 and #274. Their overall height is 0.75 m. The probe head is symmetrical, the three supporting struts are located at 0°, 120° and 240°. Specifications are given in Table 1.

Table 1: Specifications of the Gill R3-50, from Gill (2001).

| | |
|---------------------------------|--------------------|
| Sonic Model | Gill 1210R3-50 |
| Ultrasonic Sampling Rate | 50 Hz |
| Wind Speed Range and Resolution | 0-45 m/s, 0.01 m/s |
| Wind Speed Accuracy | $< \pm 1\%$ RMS |
| Wind Direction and Resolution | 0-360°, 1° |
| Wind Direction Accuracy | $< \pm 1^\circ$ |
| Temperature Range | -40° bis +60° C |
| Accuracy Range | < 32 m/s |



Figure 1: Experimental setup in the Oldenburg wind tunnel

The measurements were done in the wind tunnel at the University of Oldenburg. The wind tunnel has an open measurement volume of $1.8 \times 1.0 \times 0.8$ m³ and a closed circulatory system. For more detailed information about the wind tunnel see Stabe and Langner (1997).

The experimental setup is shown in Fig. 1. The ultrasonic anemometer is mounted on a swivel arm in the open measurement volume, with its north direction pointing in the direction of the wind. The mounting allows a full rotation (360°) in the horizontal plane to change the wind direction. Variation of the tilt angle is possible with the swivel arm, allowing angles from -35° to 35° . Four pitot tubes, used for obtaining the reference wind speed, are mounted at the opening of the wind tunnel.

2.2 Measurement Results

Dependencies on wind direction, wind speed and tilt angle were investigated. Systematic errors were found for all ultrasonic anemometers.

Additionally two of the instruments showed a specific overall deviation of 1-1.5 % of the reference wind speed, throughout every spatial configuration (see Fig. 2).

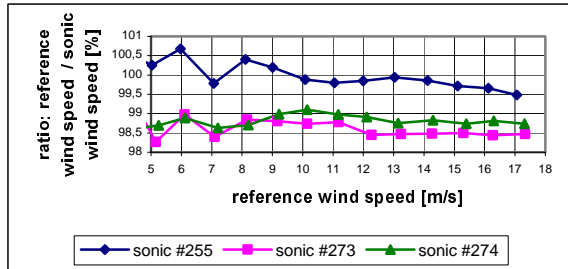


Figure 2: Ratio of reference wind speed and measured wind speed for all three ultrasonic anemometers.

For a variation of the wind direction, a 120° symmetry consistent with the 120° symmetry of the probe head was found in the deviations of the measured wind speed compared to the reference wind speed (see Figure 3). This was found for the horizontal and the vertical components. Around the supporting struts, strong deviations of up to 4% of the reference wind speed were found.

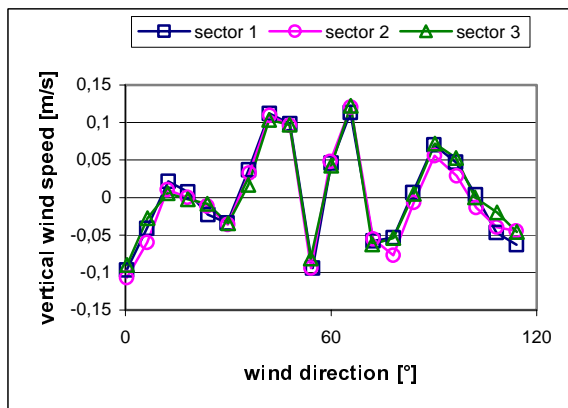


Figure 3: Vertical component versus wind direction, for a wind speed of 10 m/s, all three sectors.

The dependence on tilt angles with different algebraic signs is not symmetric, as can be seen in Figure 4.

For a positive tilt angle the measured values fall off in comparison to the reference wind speed. Two small peaks around the strut can be found. For a negative tilt angle a strong peak is found in front of the strut. The deviations around the struts increase with increasing tilt angle for both algebraic signs. For tilt angles with different magnitude and identical algebraic signs, the response of the ultrasonic anemometer is linear in between.

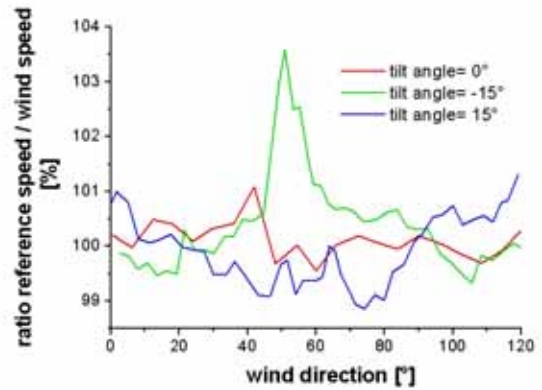


Figure 4: Ratio of reference wind speed and sonic wind speed versus wind direction, different tilt angles.

The vertical component showed deviations of about 0.15 m/s for a tilt angle of 0° at a wind speed of 10 m/s (see Figure 3). Around the struts the deviations were strongest as well.

The influence of the wind speed was found to be linear, as can be seen in Figure 5.

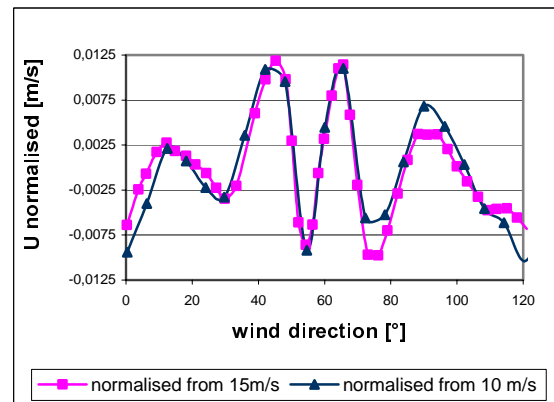


Figure 5: Normalised wind speed, previously 10m/s (squares) and 15m/s (triangles).

3 Derivation of Fluxes

3.1 Correction Method for Flow Distortion

An empirical correction method was developed, using the data acquired in the wind tunnel measurements. This correction makes use of the symmetries found for wind direction and the dependence on the tilt angle. Additionally the linear dependence on the wind speed was utilized. Thus the correction is in need of very few measurements. Of these measurement values lookup tables are build, in which correction values appropriate for each spatial configuration are listed. The measured wind speed is normalized before the correction value is applied.

3.2 Planar Fit

For field measurements, additional effects have to be considered. Inaccuracies in the exact vertical

orientation of the instrument are difficult to avoid in the field. They can have an important effect on the result of the flux measurements. The planar fit method (see Wilczak 2001) has been used to correct for any tilt in the mounting of the instrument. This method transforms the measured values in a mean streamline coordinate system, hence putting the mean vertical component orthogonal to the streamlines.

3.3 Trend Removal

Other effects influencing the measurements are data trends. An increase in wind speed leads to a deviation from the mean value of a measurement interval, which is not produced by turbulence. Thus these parts of the deviation from the mean have to be avoided. Therefore, a trend is calculated for each 10 min time interval via linear regression and subtracted from the measurement values, before the fluxes are calculated with the eddy-covariance method.

3.4 Fluxes

After these corrections, the fluxes can be calculated. Of further importance are the sensible heat flux and the momentum flux, which are defined in the following. With the covariance of temperature and vertical wind speed $\overline{w'T'}$, the sensible heat flux can be calculated:

$$H = \rho c_p \overline{w'T'}$$

where ρ is the air density and c_p the specific temperature for moist air at a constant pressure. From the covariance of the horizontal and vertical wind speed components $\overline{u'w'}$ and $\overline{v'w'}$ the momentum flux τ can be derived:

$$\tau = -\rho \sqrt{\overline{u'w'}^2 + \overline{v'w'}^2}$$

4 Flux Measurements of FINO I

The correction method for the flow distortion is used with data from the FINO I offshore meteorological mast to investigate the importance of the flow distortion correction. Data from November 2003 for the measurement heights of 40 m and 60 m has been used.

At first, the developed correction for flow distortion itself was tested. A ratio of the uncorrected and the corrected wind speed plotted against the wind direction shows the expected 120° periodicity of the correction (see Figure 6), which was already found in the wind tunnel measurements. Deviations from the 120° periodicity are due to the corrections from planar fit and detrending.

Comparisons of fluxes calculated with uncorrected and corrected data show the effect of the calibration on the flux calculation.

Table 2 shows the change of the mean values of one month of data.

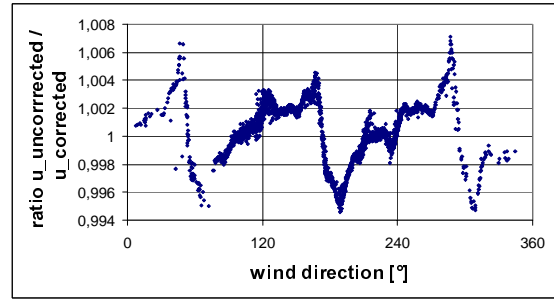


Figure 6: Ratio of the uncorrected and the corrected measured wind speed versus the wind direction. The 120° periodicity of the correction can be seen.

Table 2: Corrected and uncorrected measurements from FINO I, November 2003.

| | 40m change [%] | 60m change [%] |
|----------------|-------------------|-------------------|
| U | -1.2 | 1.6 |
| u* | -0.5 | -1.2 |
| H | -6.4 | -6.8 |
| z/L (z=height) | -10.4 | -1.5 |

The changes for the sensible heat flux H show a relatively large magnitude caused by the influencing vertical component. Because the applied correction results in the largest relative changes for the vertical component, this large change is not surprising. The changes for u^* are smaller, including also the corrections for the horizontal components, in addition to the vertical component.

Wind speed U changes differently for each height, increasing the wind speed at 40m and decreasing it at 60m. This is an effect of the different overall deviation of the wind speed. The changes of the stability parameters 40/L and 60/L reflect the change of H and u^* from which it is calculated.

As a measure of the correction quality the parameter Δ is introduced.

$$\left| \frac{U_{reference}}{U_{sonic,uncorrected}} - 1 \right| - \left| \frac{U_{reference}}{U_{sonic,corrected}} - 1 \right| = \Delta$$

Δ basically consists of the ratios of reference and measured wind speed. These ratios show how well the wind speeds agree. A ratio of one is reached for two identical wind speeds. Therefore the magnitude of the difference between the wind speed ratios and one should decrease after a correction is applied, because the wind speed should be closer to the reference wind speed after that. Thus the difference between the magnitudes for an uncorrected measurement and a corrected measurement should be positive, resulting from the decreased deviation from the optimal ratio one.

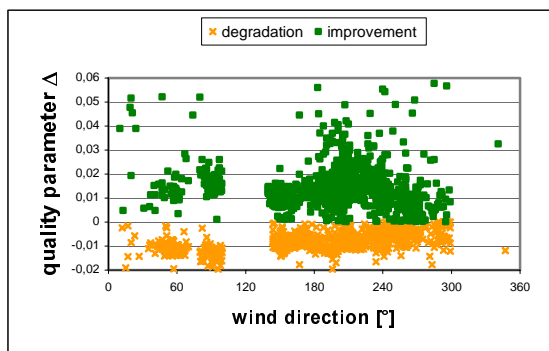


Figure 7: Correction quality parameter Δ versus wind direction. Orange indicates degradations, green improvements.

A positive value for Δ therefore indicates an improvement because of the correction, while a negative value for Δ would indicate a degradation resulting from the correction. Figure 7 shows the calculated quality parameter Δ versus the wind direction. The range in which the mast shadowing influences has been taken out of consideration. Although also degradations are found, these are smaller than the improvements, which especially occur for the position of a strut at approximately 200° (The instruments are not north aligned on the platform). Overall the measurement quality increases.

Also the standard deviation could be decreased with the application of the correction function, leading to less scatter, especially around the struts. This is shown in Figure 8 for the standard deviation of the friction velocity. This figure shows the difference of the standard deviation of the friction velocity for uncorrected and corrected measurements plotted versus the wind direction. Only wind direction intervals with more than 100 measurement values were accounted for. A peak can be seen for wind directions for which a strut is interfering. It is therefore likely that the deviations in each sector result not only from different meteorological situations but also from the disturbing influence of the strut.

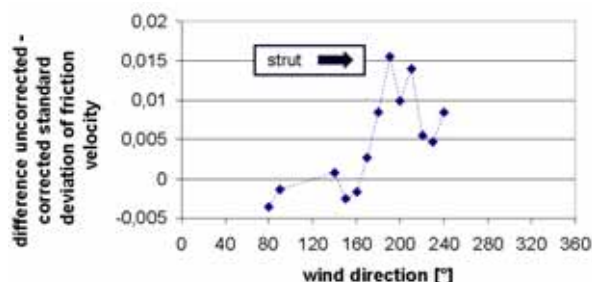


Figure 8: Difference of corrected and uncorrected standard deviation of the friction velocity versus wind direction.

5 Conclusions

The factory-installed calibration of the ultrasonic anemometers were tested in the wind tunnel of the

University of Oldenburg. Systematic errors similar for all three ultrasonic anemometers as well as errors which are specific for each individual instrument were found. Around the struts, the measured wind speed can deviate up to 4 % from the reference wind speed. Additionally, the uncorrected vertical component proves to be problematic, erroneous vertical wind speeds of up to 0.1 m/s for a reference speed of around 10 m/s were found.

For flux calculations, an improvement of the calibration is needed. This applies not only to the instruments used, but shows that the factory-installed calibration for the ultrasonic anemometers should generally be treated with care, if used for flux measurements.

A correction method for the calibration of the ultrasonic anemometers has been developed, based on the wind tunnel measurements. The correction is dependent on wind direction and tilt angle and makes use of symmetries and linearities found in the behaviour of the instrument in the flow. Therefore the correction employs only a limited number of wind tunnel measurements.

The correction was applied to measurement data from the FINO I offshore measurement platform. Additionally the method of planar fit has been used to account for misalignment of the instrument in the field. Data trends have been removed from the measured values, to assure that only turbulent parts were used for the flux calculations.

Effects of the correction of the mean monthly values are for example a change of wind speed of over 1%, while the change of the heat flux is even higher than 6%.

Improvements in the calculation of fluxes could be shown. The scatter of the fluxes decreased and improvements in the measurements of the wind speed are shown.

Acknowledgements:

This work has partly been funded by the „Deutsche Bundestiftung Umwelt“ within the BAGO-project (Az: 21223) and by the European Commission (ANEMOS – project).

The measurements at FINO 1 are conducted by the German Wind Energy Institute (DEWI).

The test setup in the wind tunnel has been supplied by Deutsche WindGuard GmbH.

References:

- [1] Gill Instruments Limited: "R3-50 Ultrasonic Research Anemometer", Datasheet, 2001
- [2] S. Tautz: Thermal Effects in the Atmospheric Boundary Layer above the North Sea, Master Thesis, Oldenburg, 2004
- [3] U. Stabe, D. Langner: Messung und Simulation systematischer Fehler des Ultraschallanemometers und deren Auswirkungen auf statistische Größen, Master Thesis, University of Oldenburg, Oldenburg, 1997
- [4] J.M. Wilczak, S.P. Onceley, S.A. Stage: Sonic Anemometer Tilt Correction Algorithms, *Boundary Layer Meteorology*, Vol 99., pp 127-150, 2000
- [5] B. Lange, S. Tautz, BAGO Abschlussbericht, Oldenburg, 2004 (in print)

COMPARISON OF WIND CONDITIONS OF OFFSHORE WIND FARM SITES IN THE BALTIC AND NORTH SEA

Bernhard Lange

ForWind - Center for Wind Energy Research, University of Oldenburg, 26111 Oldenburg, Germany

Summary

Field measurement data from the Rødsand measurement program in the Baltic Sea and from the FINO I platform in the North Sea are used to characterize and compare the different wind conditions for the Baltic and North Sea. Rødsand is surrounded by land in 10 km to 100 km distance, while the FINO I platform is located in the open North Sea with a minimum distance to the coast (fetch) of 45 km.

Cup anemometer measurements at different heights are used to derive the wind speed profiles at both locations. The data are corrected for the influence of the mast flow distortion. The atmospheric stability is determined with the eddy-correlation method from ultrasonic anemometer measurements. Mean profiles as well as profiles for different stability conditions are compared. The measured profiles are compared with standard Monin-Obukhov theory.

A difference in the steepness of the mean profiles is found, with larger wind shear present at Rødsand. For conditions with neutral stratification both profiles show deviations from a logarithmic form. The mean profiles are also compared with the profile calculated with the wind resource estimation program WAsP, which was found to agree well with the FINO I data, but not with the Rødsand measurement. At the Rødsand site it is known that thermal effects are responsible for a systematic deviation of the vertical wind profile from standard Monin-Obukhov theory for near neutral and stable conditions. This was not found at the FINO I site.

1 Introduction

For the planning and design of offshore wind farms and turbines, detailed knowledge of the offshore wind conditions is of crucial importance. Compared to sites on land, where both the meteorological knowledge and the experience of the wind industry are large, relatively little is known about the conditions faced by turbines in the marine environment.

Offshore, the influence of the sea surface leads to important changes in the near surface wind conditions, while the forcing of the wind due to pressure gradients does not change abruptly between land and water. The most obvious effects in the marine boundary layer are due to the sea surface roughness and thermal properties of water.

At the Rødsand site it has been found that for wind resource calculations the dependence of sea surface roughness on wind and waves is less important compared to thermal effects [1]. Also, thermal effects are responsible for a systematic deviation of the vertical wind speed profile from standard Monin-Obukhov theory, which is found for near neutral and stable conditions. This is believed to be caused by the inhomogeneity of the flow due to the coastline. It has been shown that the effect has important implications for wind resource assessment and turbine design [2].

Data from the newly installed measurement site FINO I in the North Sea are used in this study to investigate if this effect is also found there. In the next section the measurements are briefly characterised and in section 3 the data processing is described. Standard Monin-Obukhov theory is briefly recalled in section 4 before the mean vertical wind speed profiles of both sites are compared with each

other and with theoretical expectations in section 5. The dependence of the wind speed gradients at the two sites on atmospheric stability is discussed in section 6 and compared with Monin-Obukhov theory. Conclusions are drawn in the final section.

2 Measurements

2.1 FINO 1

The FINO measurement platform [3], [4] is located 45km north of the island Borkum in the North Sea (see Figure 1). The height of the measurement mast is 100m. Seven cup anemometers are installed at heights of 30m to 100m on booms mounted in south-east direction of the mast. One cup anemometer is mounted at the top of the mast in 100m height. Three ultrasonic anemometers are present at heights of 40m, 60m, and 80m on north-westerly oriented booms. Additional meteorological measurements consist of wind direction, air temperature, moisture, air pressure and solar irradiation. The oceanographic measurements include waves, wave height, water current and physical properties of the sea water. Data from November 2003 to May 2004 have been



Figure 1: Locations of the measurement sites

used in this study. The data set contains about 14.000 records of 10-minute mean values.

2.2 Rødsand

The field measurement program Rødsand [5] has been established in 1996 as part of a Danish study of wind conditions for proposed offshore wind farms. The 50 m high meteorological mast is situated about 11 km south of the island Lolland in Denmark (see Figure 1). It is instrumented with cup anemometers at three heights, an ultrasonic anemometer, wind vane, temperature sensors, wave and current measurements.

The data set used here consists of about 3.400 records of 30-minute mean values, collected in the time period from March 1998 to January 2000.

3 Data correction and derived quantities

3.1 Correction of mast flow distortion

For wind profile analysis, cup anemometer measurements are used. These are corrected for flow distortion effects of mast and booms with a method developed by Højstrup [6]. Records from situations with direct mast shade are omitted. For Rødsand, the parameters of the correction method have been derived from measurements at a similar mast at the Vindeby site [7]. At FINO I, a comparison of top and boom mounted cup anemometers as well as a comparison of cup and sonic anemometers at different sites of the mast are used [8]. Figure 2 shows the layout of the FINO I mast with the two booms. The measured ratios of cup and sonic anemometers at 40m height at the FINO I mast are compared with the correction function in Figure 3. The correction method uses a linear correction as first approximation. An offset between correction function and data can be seen, which stems from an offset between cup and sonic anemometer measurements.

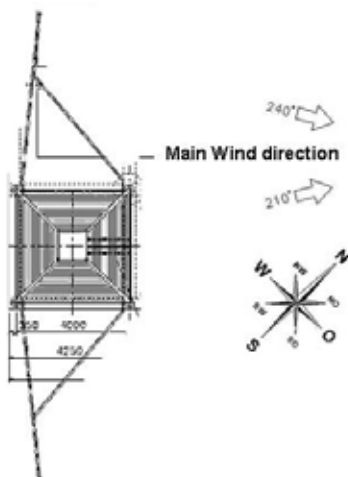


Figure 2: Layout of the measurement mast at FINO I (from www.fino-offshore.de)

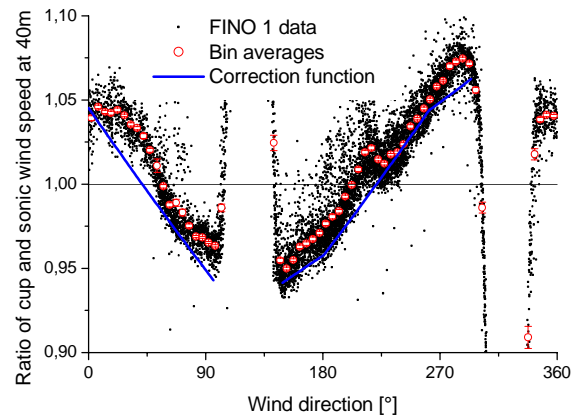


Figure 3: Measured ratios of cup and sonic anemometer wind speeds at 40m height at the FINO I mast; also shown is the correction function

3.2 Flux measurements

Ultrasonic anemometer measurements are utilized to derive fluxes and determine the atmospheric stability. At FINO I, a 3-dimensional calibration is applied to reduce the measurement error of the ultrasonic anemometers [9]. The planar fit method [10] is used for tilt correction and linear regression for trend removal before momentum and heat fluxes are calculated with the eddy-correlation method. The Obukhov length L is derived from these fluxes [11].

4 Monin-Obukhov Theory

The wind speed profile in the atmospheric surface layer is commonly described by Monin-Obukhov theory. In homogenous and stationary flow conditions, it predicts a log-linear profile:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \Psi_m\left(\frac{z}{L}\right) \right] \quad (1)$$

The wind speed u at height z is determined by friction velocity u_* , aerodynamic roughness length z_0 and Monin-Obukhov length L . κ denotes the von Karman constant (taken as 0.4) and Ψ_m is a universal stability function. The Businger-Dyer formulation [12] of the stability function with parameters of the reanalysis by Högström [13] are used.

If the wind speed is known at one height, the vertical wind speed profile is determined by two parameters: the surface roughness z_0 and the Obukhov length L . In the following, a constant roughness of $z_0=0.0002\text{m}$ and the Obukhov-length calculated from the ultrasonic anemometer at 40m height are used.

5 Vertical wind speed profiles

5.1 Measured mean profiles

The cup anemometer wind speeds are averaged for the whole data period. They are plotted versus height in Figure 4. The wind speeds have been normalized with the wind speed measured at 50m height, to allow comparison between the FINO I and Rødsand

data sets despite their different mean wind speeds. Also shown is the wind speed profile calculated with the wind resource estimation program WAsP for an offshore site. In WAsP, the values for roughness and stability are constant and hence the vertical wind speed profile does not depend on the site if it is far enough from land. Already for the Rødsand site the difference in the profile is negligible.

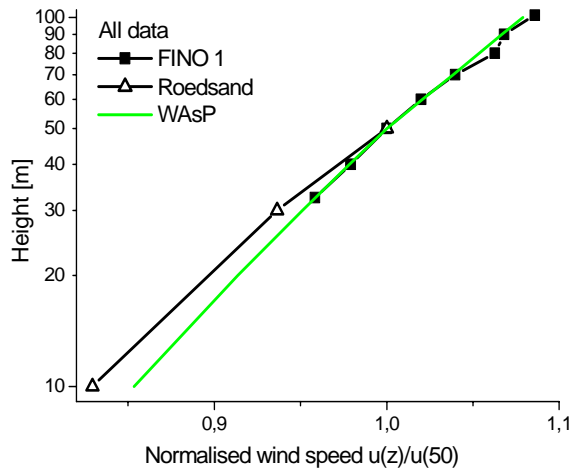


Figure 4: Mean vertical wind speed profiles measured with the cup anemometers at the FINO I and Rødsand sites, normalized with the wind speed measured at 50m height; also shown is the prediction of the WAsP model

The wind speed increase with height (wind shear) is larger at the Rødsand site compared to the FINO I measurement. At Rødsand, wind speed measurements from heights above 70m show larger wind shear than expected, especially the 80m and 100m measurements. It has to be investigated if this is due to a change in the profile at higher heights or due to calibration or correction inaccuracies. The WAsP model agrees astonishingly well with the measured profile at FINO I, but underestimates the wind shear at Rødsand. However, the data sets averaged here are not representative of a long term wind climate at the sites, and the comparison with a climatological model like WAsP has to be treated with care.

5.2 Stability dependent profiles

To investigate the wind speed profiles more closely, the data are segregated into unstable ($-2 < 10m/L < -0.02$), near neutral ($-0.02 < 10m/L < 0.02$) and stable ($0.02 < 10m/L < 0.05$) situations. The result is shown in Figure 5. As expected, the stable data show a larger and the unstable data a smaller wind shear compared to near neutral conditions. At both sites, the form of the profile at near neutral conditions deviates from a logarithmic profile. Instead, the profiles show a slight curvature to the right, which would usually be expected for slightly stable conditions. The difference in wind shear between the two sites found in the mean profiles (see Figure 4) can be seen in all three stability classes.

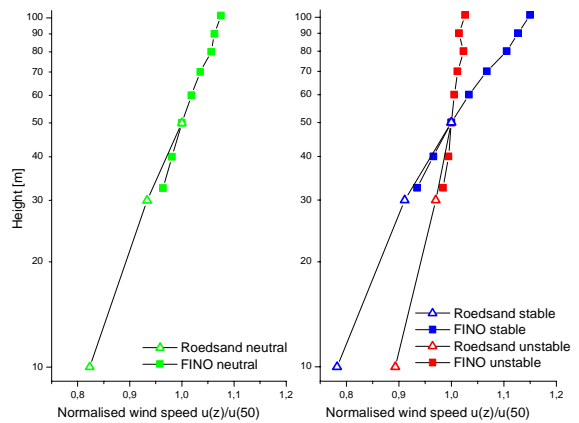


Figure 5: As Figure 4, but data segregated into different stability classes

6 Wind speed gradients

A more detailed comparison of the measured wind shear with the predictions of Monin-Obukhov theory is made by plotting the measured wind speed ratio at two heights versus stability parameter $10m/L$. The heights of 50m and 30m are chosen, since they are available both at FINO I and Rødsand. Only records with wind speeds above 5 ms^{-1} have been used to avoid increased scatter.

Figure 6 shows the measured data of the FINO I station, their bin averages and the prediction of Monin-Obukhov theory. A large scatter can be seen in the measurement data. This is caused by two effects:

- Instationary flow situations, where a relation between wind shear and stability can not be expected.
- Large sampling variability of covariance measurements at a relatively high height and with an averaging period of only 10 minutes.

It can be seen that the measurements show systematically lower wind shear than the theory for unstable conditions, while for stable stratification the agreement is better.

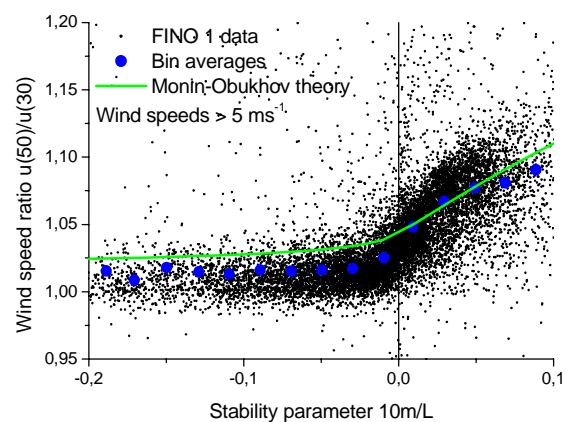


Figure 6: Measured wind speed ratio (wind shear) between the wind speeds at 50m and 30m height versus stability parameter $10m/L$ for the FINO I site

In Figure 7 the stability dependent wind speed ratios of both stations are compared. Only bin averages and the theoretical prediction are shown. At very unstable conditions both measurements agree with each other in showing smaller wind shear values than theoretically expected. At slightly unstable and stable conditions a marked difference between the two sites is visible. The Rødsand data show a clearly and almost constantly higher wind shear for near neutral and stable conditions compared to the FINO I measurement and compared to Monin-Obukhov theory.

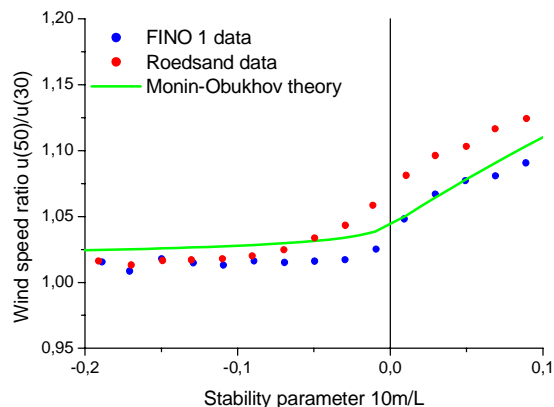


Figure 7: As Figure 6, but bin averaged measurements from both FINO I and Rødsand

7 Conclusion

First measurement data from the station FINO 1 in the North Sea have been analyzed and compared to results from the station Rødsand in the Baltic Sea.

The comparison reveals differences in the wind conditions between both sites. At Rødsand, deviations from Monin-Obukhov theory for non-neutral and stable atmospheric stratification are known. They have been attributed to effects of the land-sea discontinuity, which changes the flow at the Rødsand site, where distances to land (fetch) are between 10km and 100km. This is probably also the cause for the large mean wind shear found at Rødsand compared to FINO 1 and to WAsP.

At the FINO 1 site, where the fetch is generally much larger, similar effects were not found in the present data set. This supports the explanation, that the deviations found at Rødsand are caused by the land-sea discontinuity. However, further investigations with a larger data set are needed to confirm this finding.

Acknowledgement

This work has partly been funded by the DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) within the BAGO project (Az. 21223). FINO 1 is funded by the BMU (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety) and is managed by Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH. The meteorological measurements at FINO 1 are conducted by the German Wind Energy Institute (DEWI). The measurements at Rødsand have been

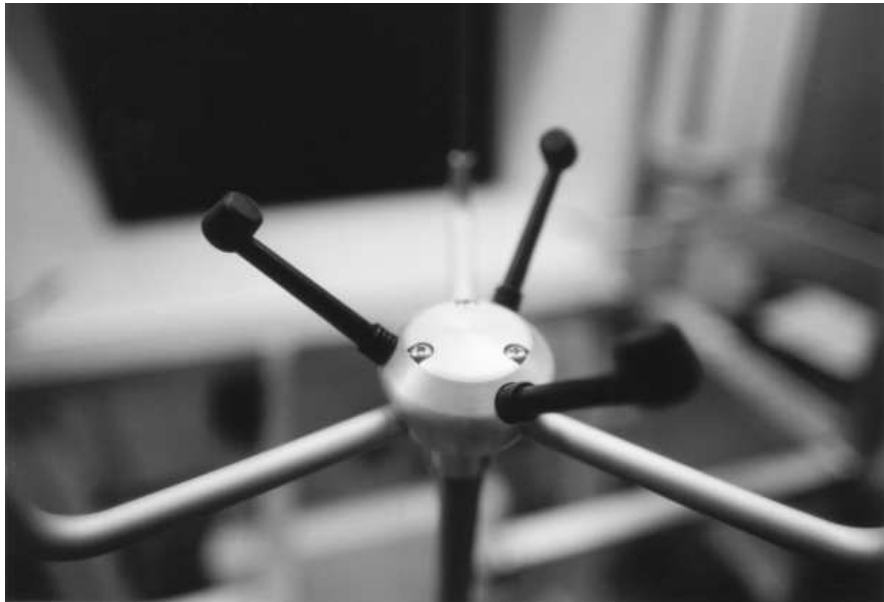
made by Risø National Laboratory, Denmark, and funded by the EU-JOULE program, the Danish Energy Ministry's UVE program and SEAS (now Energi E2). The cooperation with Thomas Neumann (DEWI) and Rebecca Barthelmie (Risø) is especially acknowledged.

References

- [1] B. Lange, S. Larsen, J. Højstrup, R. Barthelmie, The influence of thermal effects on the wind speed profile of the coastal marine boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology* **112** (2004) 587-617
- [2] B. Lange, S. Larsen, J. Højstrup, R. Barthelmie, Importance of thermal effects and sea surface roughness for offshore wind resource assessment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **92** **11** (2004) 959-998
- [3] P. Rakebrandt-Gräßner, T. Neumann, The German Research Platform in the North Sea. *OWEMES 2003*, Naples, Italy, 2003, published on CD
- [4] T. Neumann, K. Nolopp, K. Herklotz, Erste Betriebserfahrungen mit der FINO1-Forschungsplattform in der Nordsee. *DEWI Magazin* **24** (2004) 27-34
- [5] B. Lange, R.J. Barthelmie, J. Højstrup, *Description of the Rødsand field measurement*. Risø-R-1268, Risø National Laboratory, DK-4000 Roskilde, Denmark, 2001
- [6] J. Højstrup, Vertical extrapolation of offshore wind profiles. *1999 European Wind Energy Conference*, Nice, France, 1999, 1220-1223
- [7] B. Lange, H.K. Johnson, S. Larsen, J. Højstrup, H. Kofoed-Hansen, M.J. Yelland, On detection of a wave age dependency for the sea surface roughness. *J. Phys. Oceanogr.* **34** (2004) 1441-1458
- [8] B. Lange, S. Tautz, *Bestimmung von Wärme- und Impulsfluß in der marinen atmosphärischen Grenzschicht für die Offshore-Windenergienutzung (BAGO) - DRAFT*. ForWind Bericht 2004-02, University of Oldenburg, Oldenburg, 2004
- [9] S. Tautz, *Thermal Effects in the Atmospheric Boundary Layer above the North Sea*. Diplomarbeit (MSc thesis), University of Oldenburg, Oldenburg, 2004
- [10] J.M. Wilczak, S.P. Oncley, S.A. Stage, Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology* **99** (2001) 127-150
- [11] S. Tautz, B. Lange, D. Heinemann, Correction of the heat and momentum flux measurements with the ultrasonic anemometers at the FINO I offshore meteorological mast for flow distortion and mounting effects. *German Wind Energy Conference DEWEK 2004*, Wilhelmshaven, Germany, 2004, published on CD
- [12] J.A. Businger, J.C. Wyngaard, Y. Izumi, E.F. Bradley, Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *Journal of the Atmospheric Sciences* **28** (1971) 181-189
- [13] U. Högström, Non-Dimensional Wind And Temperature Profiles In The Atmospheric Surface Layer: A Re-Evaluation. *Boundary-Layer Meteorology* **42** (1988) 55-78

Wind Tunnel Investigation of Ultrasonic Anemometers (R3-50)

Saskia Tautz and Bernhard Lange



ForWind - Center for Wind Energy Research
University of Oldenburg, Germany

Oldenburg, September 2004

Contents

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 3 |
| 1.1 | Flow Distortion in the Instrument | 3 |
| 1.2 | Correction of Mounting Errors | 4 |
| 1.2.1 | Planar Fit | 5 |
| 1.3 | Outline | 6 |
| 2 | Wind Tunnel Investigation of Ultrasonic Anemometers (Gill R3-50) | 7 |
| 2.1 | Introduction | 7 |
| 2.2 | Experimental Setup | 7 |
| 2.2.1 | The Ultrasonic Anemometer | 7 |
| 2.2.2 | Experimental Setup | 9 |
| 2.2.3 | Offset Measurement of the Pitot Pressure Sensors | 11 |
| 2.2.4 | Data Collection | 12 |
| 2.3 | Pitot Tube: Measurement of Wind Speed | 13 |
| 2.4 | Fluctuations of Pitot Tube Data at Certain Wind Speeds | 14 |
| 2.5 | Measurement Uncertainty | 16 |
| 2.5.1 | Accuracy of Pitot Tubes | 16 |
| 2.5.2 | Homogeneity of Wind Tunnel | 17 |
| 2.5.3 | Mounting Errors of Sonic | 17 |
| 2.5.4 | Uncertainties at Low Wind Speeds | 18 |
| 2.6 | Results | 19 |
| 2.6.1 | Wind Speed Dependent Response | 19 |
| 2.6.2 | Azimuth Angle Dependent Response: Horizontal Component | 19 |
| 2.6.3 | Azimuth Dependent Response: Vertical Component | 21 |
| 2.6.4 | Elevation Angle Dependent Response: All Components | 21 |
| 2.7 | Conclusions | 21 |
| 2.7.1 | Overall Calibration Factor | 21 |
| 2.7.2 | Symmetries and Linear Behaviour | 22 |
| 2.7.3 | Deviations | 25 |
| 2.8 | Outlook | 26 |
| 3 | Calibration of the Ultrasonic Anemometers | 30 |
| 3.1 | Introduction | 30 |
| 3.2 | Description of the Correction Method | 30 |
| 3.3 | Detrending | 31 |
| 3.4 | Determination of the Lookup Tables from Wind Tunnel Measurements | 31 |
| 3.4.1 | Tilt Correction of Wind Tunnel Data | 32 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.4.2 | Lookup Table for Horizontal Wind Speed | 33 |
| 3.4.3 | Lookup Table for Wind Direction (=Azimuth Angle) . . . | 34 |
| 3.4.4 | Lookup Table for Vertical Wind Speed | 34 |
| 3.5 | Testing of the Calibration Procedure | 35 |
| 3.6 | Conclusion | 36 |
| 4 | Comparison of Corrected and Uncorrected Field Data | 37 |
| 4.1 | Conclusion | 39 |
| 5 | Conclusions | 39 |

1 Introduction

Ultrasonic anemometer (further referred to as "sonic") are wind speed measurement instruments, capable of measuring with a resolution of up to 50 Hz for modern instruments. This is very useful for high resolution flux measurements. Sonics are able to measure the three-dimensional wind vector and the temperature with one instrument as well.

An accurate calibration of sonics is very important. The supporting structure and the transducer pairs of the sonic alter the air flow and hence flaw the measurement. Fig. 1 gives a close look at a probe head and the disturbing elements. A measurement made with an uncalibrated sonic is shown by fig. 2. The symmetry of the probe head with the three struts positioned in 120 degree steps clearly shows. Deviations up to 10 % from the actual wind speed are found. This indicates the need for correction of the raw sonic data.

1.1 Flow Distortion in the Instrument

In the course of ultrasonic anemometer development, several studies in the possibilities of calibration were made.

Wiesner (2001) and Wyngaard/Zhang (1985) focused on the disturbing influence of the transducer design. The sensors of the sonics used in this work, which will be described in section 2.2.1, are streamline-shaped. They showed that the so called transducer shadowing effect caused by streamline-shaped transducers is very small in comparison to the flow distortion made by the whole sonic. Thus their effect can be neglected.

Other studies deal with the disturbance caused by the sonic itself. A method used by Grelle and Lindroth (1994) seems to work quite well in all three spatial directions. They use a representation of the distorted component of the wind vector by a linear combination of the undistorted wind components and specific coefficients as developed by Rotach (1991). These linear combinations build a system of equations, which in matrix notation has a coefficient matrix. To calculate these matrix coefficients, a system of linear equations using theoretical and measured wind components has to be solved.

Others (for example BUBBLE (2004)) used a specific correction matrix, directly based on measurement data from a calibration measurement in a wind tunnel, compared to a reference measurement, usually recorded with pitot tubes. This method is similar to the one Gill uses (see section 2.2.1.2), but features a wider range of spatial configurations.

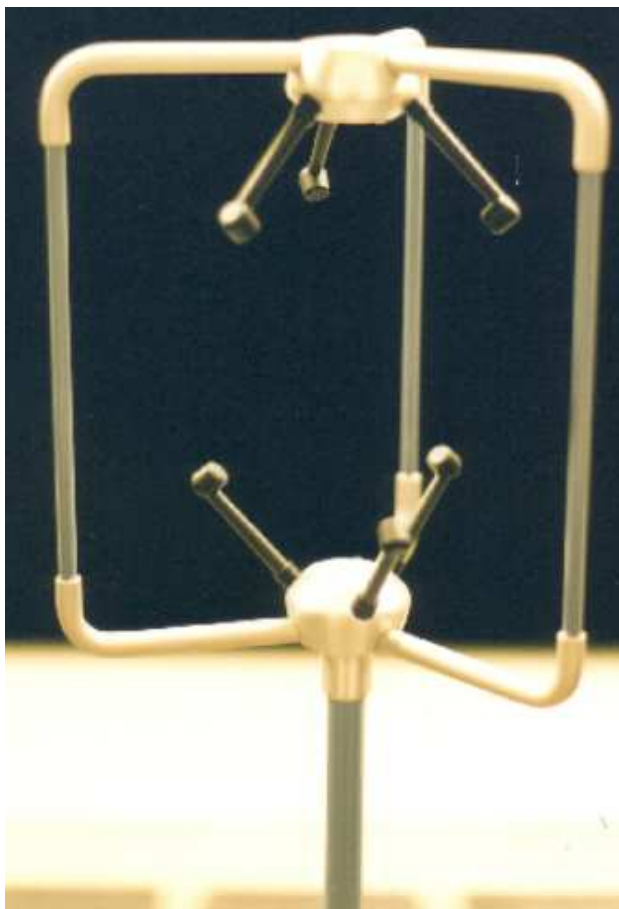


Figure 1: Probe head of the employed ultrasonic anemometers. Position of the transducer pairs and the supporting struts can be easily seen.

1.2 Correction of Mounting Errors

Some methods especially consider possible errors through tilting of the sonic. For a long time the disturbed flow field for wind speeds with a vertical component was corrected by a so called "tilt correction" which uses a coordinate transformation to adjust the measured values.

Based on the discovery that the "tilt correction" method was incorrect (see Wyngaard (1981)), new ways to represent the disturbed wind flux were found by him, and an alternative calibration method was evolved by Rotach (1991). Wilczak (2000) compares three different techniques for a tilt correction, resulting in the conclusion that the method of "Planar Fit", which is explained later on, is preferable, if working on a flat surface, which is given at offshore locations.

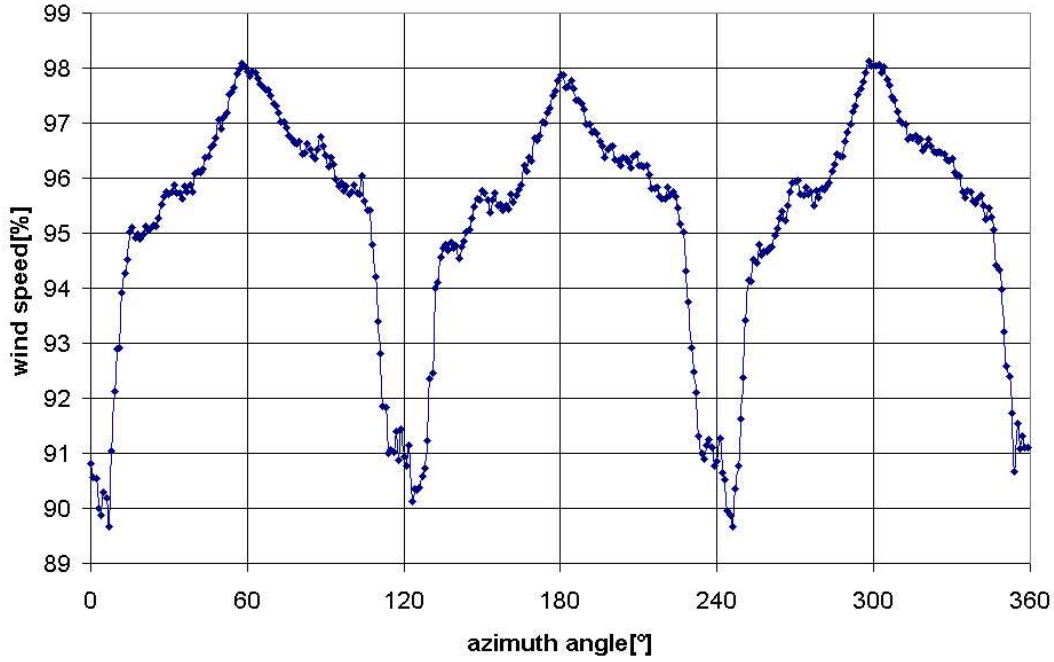


Figure 2: Measured wind speed as a percentage of the reference wind speed over azimuth angle. Uncorrected measurement values.

Gash and Dolman (2003) developed an enhancement for an already calibrated sonic, for elevation angles larger than 20 degrees.

Most of these methods require quite an amount of measurement data to be applied. Grelle and Lindroth measured a full rotation under elevation angles from -10 to 10 degrees for a wind speed of 2 to 8 m/s. In the BUBBLE project, a full rotation under eleven different elevation angles between -25 and 25 degrees was performed at wind speeds from 2 to 8 m/s.

1.2.1 Planar Fit

This method uses a different approach for the tilt correction of an sonic anemometer. Basically the mean streamline field is compared to the mean sonics measurements. For a tilted sonic, the mean streamline values \vec{u}_p can be obtained by multiplying the measured values \vec{u}_m with a rotary matrix \mathbf{P} , which transforms \vec{u}_m into the streamline coordinate system. A possible measurement offset \vec{c} of the sonic has to be considered.

$$\vec{u}_p = \mathbf{P}(\vec{u}_m - \vec{c}) \quad (1)$$

The mean wind components are thus:

$$\bar{u}_p = p_{11}(\bar{u}_m - c_1) + p_{12}(\bar{v}_m - c_2) + p_{13}(\bar{w}_m - c_3) \quad (2)$$

$$\bar{v}_p = p_{21}(\bar{u}_m - c_1) + p_{22}(\bar{v}_m - c_2) + p_{23}(\bar{w}_m - c_3) \quad (3)$$

$$\bar{w}_p = p_{31}(\bar{u}_m - c_1) + p_{32}(\bar{v}_m - c_2) + p_{33}(\bar{w}_m - c_3) \quad (4)$$

Because in the mean streamline coordinate system the vertical component \bar{w}_p has to be zero, we can conclude that:

$$\bar{w}_m = c_3 + \frac{p_{31}}{p_{33}}\bar{u}_m - \frac{p_{32}}{p_{33}}\bar{v}_m = b_0 + b_1\bar{u}_m + b_2\bar{v}_m \quad (5)$$

Mean values of some length of measurement interval (10 min in this work) are taken and via multiple regression the parameters b_0 , b_1 and b_2 are calculated. All components of \mathbf{P} can be derived from these parameters, because of relations between the turning angles and the p coefficients as well as geometrical relations between the p and b coefficients. Detailed formula is given by Wilczak (2000). Once the rotary matrix has been built, the measurement values can be transformed, and turned in mean wind direction, with a second rotation matrix \mathbf{M} :

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

where $\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{v}_p}{\bar{u}_p} \right)$

1.3 Outline

In this work, the calibration of three ultrasonic anemometers was tested in the Oldenburg wind tunnel. It was found that the calibration was partly erroneous and incomplete. A three dimensional calibration method has been developed that takes in account the dependency of the flow distortion for azimuth and elevation angle, as well as for the wind speed. Certain symmetries and linearities of this dependencies could be utilised.

The wind tunnel measurements are described carefully in the section 2, to give an idea about the problems that are encountered if proceeding quality checks of pre-calibrated ultrasonic anemometers. The basic behaviour of an ultrasonic anemometer in a laminar flow and the importance of the neglected vertical component are shown as well. In section 3 four the enhancement of the calibration is described, showing the advantages that can be used to optimize such a procedure. Section 4 provides a comparison between uncorrected and corrected field data.

2 Wind Tunnel Investigation of Ultrasonic Anemometers (Gill R3-50)

2.1 Introduction

Because the calibration of an ultrasonic anemometer is crucial, even sonics that are already provided with a factory-installed calibration still have to be investigated carefully, to ensure the quality and validity of this calibration.

Three sonics that are about to be employed on the measurement platform FINO I in the northern sea, are investigated in the wind tunnel before installation. The aim is to detect and correct possible errors in the factory-installed calibration. The main focus is on the fact that the factory installed calibration of the sonic was developed only for the horizontal components and no tilting was considered. Deviations caused by a vertical tilt should be observed carefully.

Because of the time schedule for installation on the platform, only very limited time was available for the wind tunnel measurements. Therefore a calibration method was developed, which needed only few measurements.

The variables important for an investigation are the angle of attack (azimuth angle ϕ), the tilting angle (elevation angle θ) and the wind speed (U). These variables can be varied in the wind tunnel test setup and contribute to the behaviour of the sonic.

Variation of these variables in a resolution of 1 degree and 1 m/s steps leads to nearly half a million measurements for the characterization of one sonic. Even with an automated measurement process, this is impractical and it would be preferable if the number of measurements needed could be decreased. Therefore possible symmetries and linear behaviour of the sonic for some of the influencing variables have to be found. This would not only be important for the efficiency of the test measurements, but also for a possible correction of the calibration.

2.2 Experimental Setup

2.2.1 The Ultrasonic Anemometer

Description of the Ultrasonic Anemometer

The sonics used in this work are from Gill Instruments Ltd., model 1210R3-50, SN 255, 273 and 274. They are referred to as #255, #273 and #274 in the following. Their overall height is 0.75 m. The probe head is symmetrical, the three supporting struts are found at 120° steps. A blueprint is shown in fig. 3. Specifications are given in table 1.

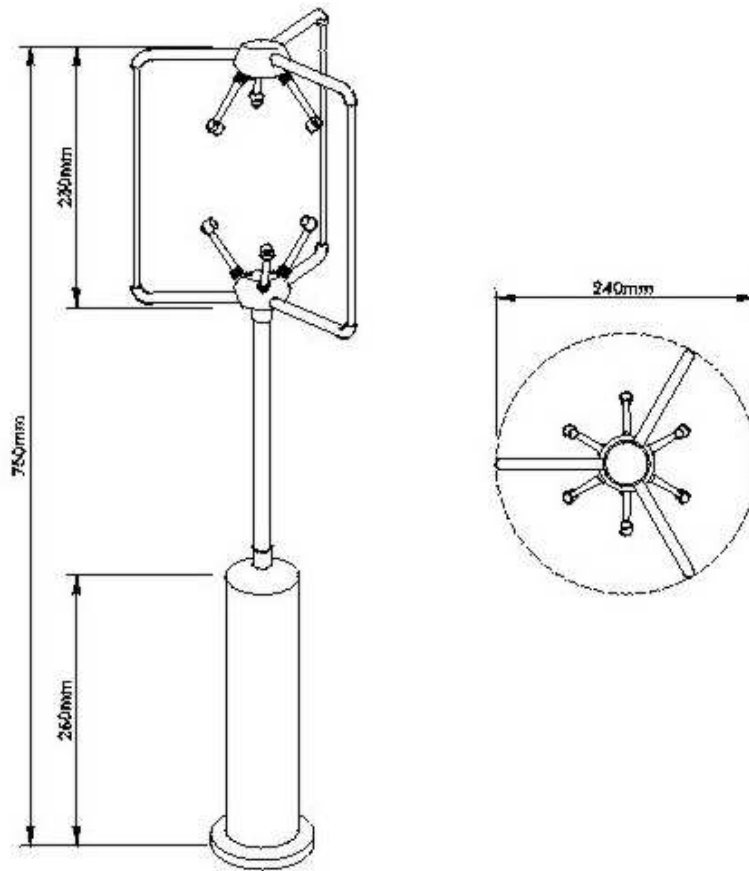


Figure 3: Blueprint of the sonic, side and top view. Picture from Gill Instruments Ltd.

Calibration of the Gill R3

To calibrate their sonics, Gill uses a purely empirical method. Each sonic is put into a wind tunnel, and for a full rotation at a constant wind speed of 7 m/s the output of the sonic is measured in one degree steps. Only horizontal components are accounted for. These measurement values are compared to the reference speed of the wind tunnel. Deviations are listed in a table for each azimuth angle. This table is used to apply the corresponding correction factor to the measurement value for each azimuth angle. This correction applies only to an elevation angle of zero degree for the sonic, and additionally not for the vertical component. Besides, the deviations are assumed not to change with changing wind speed. Fig. 4 shows a measurement of wind speed over wind direction with an applied calibration. Although it is much better than the uncalibrated wind speed over wind direction

| | |
|---------------------------------|---|
| Sonic Model | Gill 1210R3-50 |
| Ultrasonic Sampling Rate | 50 Hz |
| Wind Speed Range and Resolution | 0-45 m/s, 0.01 m/s |
| Wind Speed Accuracy | $< \pm 1\%$ RMS |
| Wind Direction and Resolution | 0-360°, 1° |
| Wind Direction Accuracy | $< \pm 1^\circ$ |
| Temperature Range | -40° to +60° |
| Accuracy Range | wind speed < 32 m/s elevation angle $< \pm 20^\circ$ |

Table 1: Specifications of the Gill R3-50, taken from the datasheet provided by Gill Instruments Ltd. (2001)

shown in fig. 2, it still has flaws.

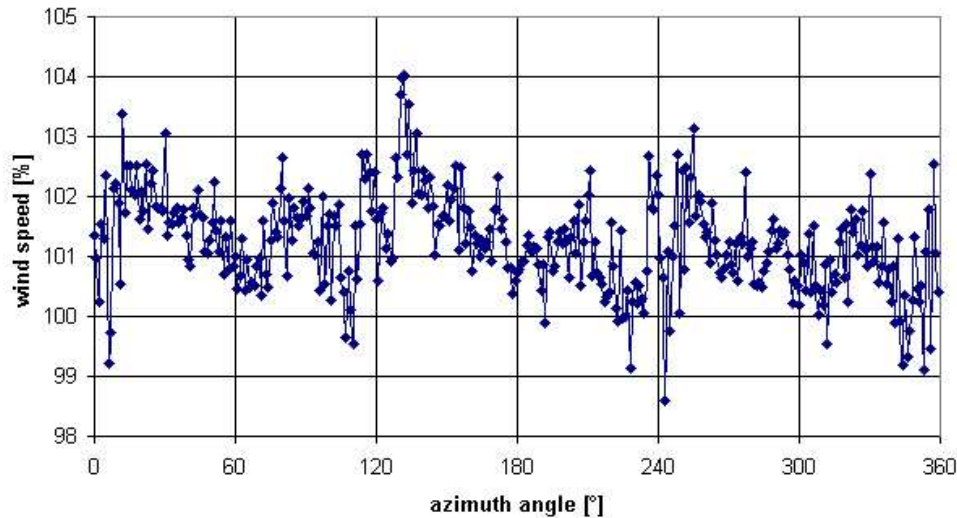


Figure 4: Measured wind speed as a percentage of the reference wind speed over azimuth angle. Measurement values corrected by Gill.

2.2.2 Experimental Setup

The measurements were proceeded in the Oldenburg wind tunnel. The wind tunnel has an open measurement volume and a closed circulatory system. The measuring volume is $1.8 \times 1,0 \times 0,8 \text{ m}^3$. A sketch of the wind tunnel is shown in fig. 5. For more detailed information about the wind tunnel see Stabe and Langner

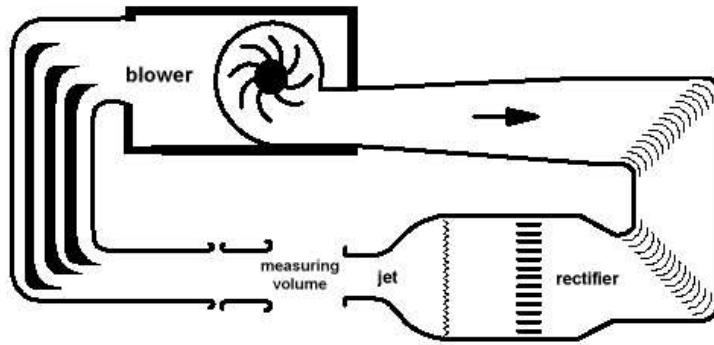


Figure 5: Sketch of wind tunnel used for the measurements, taken from an internal paper of the Institute for Technical and Applied Physics

(1997) and an internal paper from the Institute for Technical and Applied Physics. The experimental setup is shown in fig. 6.

The sonic is mounted on a swivel arm in the open measurement volume, with its north direction pointing away from the wind. The mounting allows a full rotation (360 degrees) in the horizontal plane to change the azimuth angle. Variation of the elevation angle is possible through the swivel arm, allowing tilting angles from -35° to 35° . Four pitot tubes, used for obtaining a reference signal, are mounted at the opening of the wind tunnel. Their pressure signals are converted into voltage signals by electric pressure sensors. The measurement values are registered with a data logger (Ammonit, model P414), which collects other experimental data as well. Sonic and data logger are connected to a PC via a serial port. The logging frequency is 1 Hz for the data logger, 20 Hz for the sonic 255 and 273 and 10 Hz for sonic 274. The data of the sonic are recorded by a software provided by the manufacturer. Certain options for logging can be selected in this software. The following options were used in this work:

- Report Mode: UVW CAL (calibrated measurement - the factory installed calibration was used)
- Selected Average: the logged data is an average of 5 (sonic 255 and 273) or 10 (sonic 274) by the sonic registered measured values.
- Axis Alignment: SPAR (u-component is aligned to north alignment).

The experimental setup used here was built by Deutsche WindGuard GmbH.

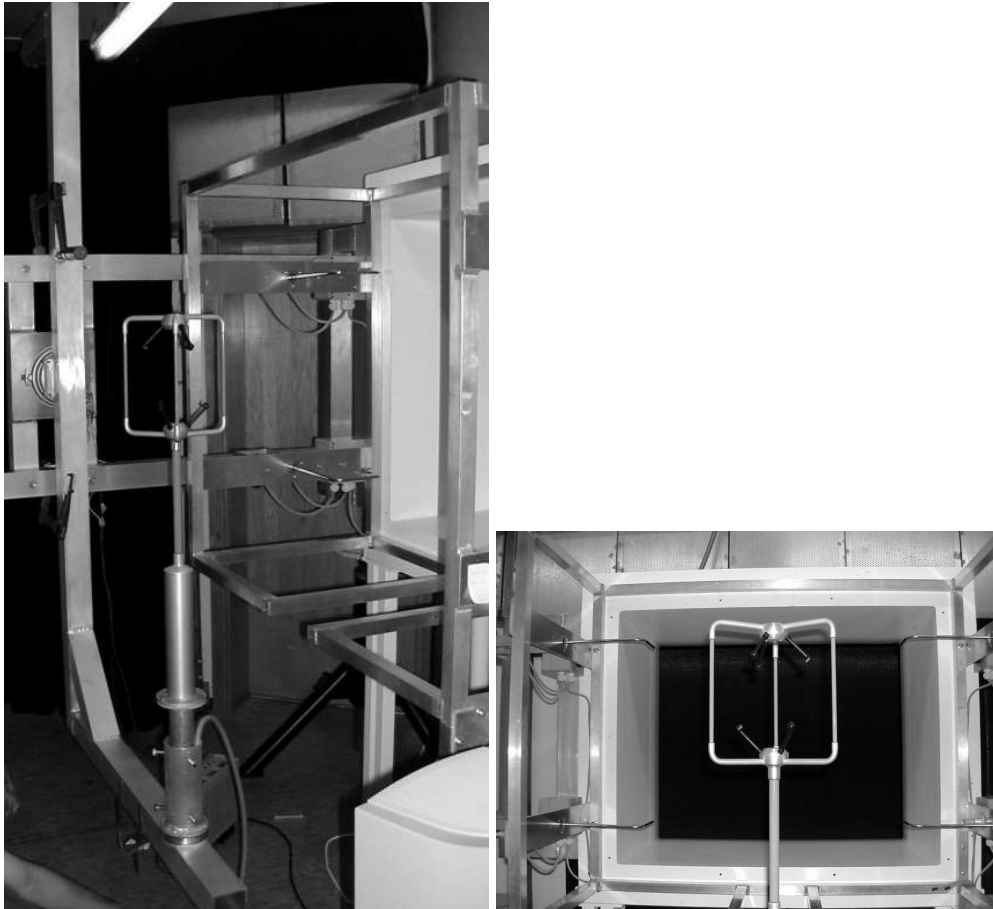


Figure 6: Test setup of the sonic in the wind tunnel. To the left mounting of the sonic on the swivel arm, to the right details of the position of the sonic head and the pitot tubes in the wind tunnel.

2.2.3 Offset Measurement of the Pitot Pressure Sensors

The electronic pressure sensors have a temperature and air pressure dependent offset. Therefore ahead of every measurement an offset measurement is conducted, in order to determine the correct offset for each pressure sensor.

For such an offset measurement, the pitot tubes are covered with protective jackets and the wind tunnel is shut down. The offset for the corresponding pressure sensor value is taken from the mean value of each pitot tube measurement.

Pitot tube: Quality of Offset Measurement

The quality of a offset measurement is determined before it is applied. For this the standard deviation of the series of measurements for each pitot tube is considered.

A stable measurement is indicated by a standard deviation below 2.5 hPa. Larger standard deviations lead to differences in wind speed of over 0.1 m/s. Pitot tubes with data showing a standard deviation above 2.5 hPa, are simply taken out of the analysis, because tests have shown that a correction of the deviating tubes is not easily obtained.

2.2.4 Data Collection

After determination of the pressure sensor offset the desired wind speed is adjusted in the wind tunnel with the sonic still in north alignment. In this position, the flow distortion of the instrument is smallest. Then azimuth and elevation angle of the sonic are set to the according values. When the airflow has stabilized again, the measurement of the sonic data begins. The measurement lasts at least for 30 seconds and is logged directly on the computer. Pitot tube measurements are collected with the data logger. They are downloaded at the end of a measurement series. For the assignment of sonic measurement to the corresponding time period in the data logger file, an indicating signal is used. This is switched on during the measurement period and logged in the data logger as well.

To reconstruct the 3-dimensional wind field, all spatial directions have to be measured. Due to the limited time available for the calibration, only certain selected space angles are measured, from which one can reconstruct a behaviour for the wind flow in all spatial directions.

A complete horizontal rotation (variation of azimuth angle ϕ) with an elevation angle of zero degree is taken at a wind speed of 10 m/s for every sonic. Additionally, certain sectors of the sonic were measured with wind speeds of 5, 10 and 15 m/s and elevation angles varying from -15° to 15° . If only a part of the horizontal plane was measured, the measurements always featured a strut in the middle of the horizontal sector.

For elevation angles, which varied from -35° to $+35^\circ$, two different azimuth angles were used: 0° and 60° (strut facing wind flow).

Because flow behaviour around the struts seem to be the sensitive part in calibration, measurements were focused on the azimuth angles around them. Higher resolution was used there mostly.

Some series of measurement only consider certain sectors in the horizontal plane of the sonic. In fig. 7 the used partition of the horizontal plane is shown. In the internal coordination system of the sonic a negative elevation angle indicates a flow from above, a positive elevation angle indicates flow from below the sonic, see also fig. 8.

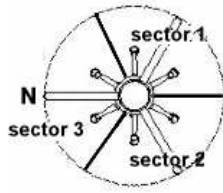


Figure 7: Partition of the horizontal plane, N=north alignment

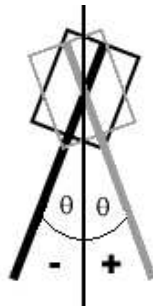


Figure 8: Elevation angle direction of the anemometer

Wind speed is represented by the magnitude of the wind vector. In section 2.6 the measurement results are shown. To easily indicate deviations to the expected values, sonic data is displayed as a percentage of the average value of the pitot tubes. If the different sectors of a sonic are measured, the data is plotted sector-wise on top of each other. This representation is chosen, due to the rotational symmetry of the sonic, azimuth angles from 120°-240° and 240°-360° correspond to azimuth angles from 0°-120°, as is shown in section 2.7.2.

2.3 Pitot Tube: Measurement of Wind Speed

As mentioned, the pitot tubes are used as a reference signal for the measurement data of the sonics. Hence it is necessary to find a way to calculate wind speed from the measured air pressure. Wind speed and air pressure relate as follows:

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (7)$$

where p is air pressure and ρ is air density.

Air pressure is calculated from each pitot tube measurement, with respect to the

acquired offset values and setup specific values given by personal communication with Dieter Westermann:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= (\text{measured value} - \text{offset}) \cdot 15.622 \cdot 0.0049066 \\
 p_2 &= (\text{measured value} - \text{offset}) \cdot 15.620 \cdot 0.0049059 \\
 p_3 &= (\text{measured value} - \text{offset}) \cdot 15.618 \cdot 0.0049068 \\
 p_4 &= (\text{measured value} - \text{offset}) \cdot 15.619 \cdot 0.0049069
 \end{aligned}$$

The air density is calculated from several meteorological data collected by the data logger:

$$\rho = \frac{k_1 \cdot p_{air} + \phi \cdot (k_2 \cdot T + k_3)}{T + T_0} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 k_1 &= 0,34844 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{°C/hPa} \\
 p_{air} &= \text{airpressure[hPa]} \\
 \phi &= \text{relative humidity [\%]} \\
 k_2 &= -0,00252 \text{ kg/m}^3 \\
 k_3 &= 0,020582 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{°C} \\
 T &= \text{temperature [°C]} \\
 T_0 &= 273,15 \text{°C}
 \end{aligned}$$

The coefficients k_1 to k_3 are taken from the Deutscher Kalibrierungsdienst (2002).

These parameters are gained as mean values from 30 seconds of measurement. A final correction factor is applied to the mean value of the four pitot measurements. This factor accounts for the change in wind speed because of the expansion of the airflow in the open section of the wind tunnel, as well as the blockage effect the probe head itself causes in the airflow. The correction factor was provided by personal communication with Dieter Westermann (2003).

$$v = (v_1 + v_2 + v_3 + v_4)/4 \cdot 0.9935 \quad (9)$$

As a quality control measure, the four pitot tube measurements are compared with each other. If one series of measurements deviates from the others, e.g. does not fit into a range of 0.05 m/s with the other measurements, it is taken out of consideration.

2.4 Fluctuations of Pitot Tube Data at Certain Wind Speeds

Looking at the data of the individual pitot tubes at varying wind speeds reveals a noticeable behavior of the first two pitot tubes in a certain speed range as seen

in fig 9. For wind speeds from 7 to 10 m/s, the series of measurements shows a periodic oscillation, with a frequency of approx. 0,33 Hz (see fig.10). The frequency subsides with increasing wind speed. The strongest oscillation is observed between 8 and 10 m/s, at 7 m/s the oscillation is still perceivable in the standard deviation, while for 11 m/s no difference in the standard deviations for the data of all four pitot tubes can be seen.

With increasing wind speed, all pitot tubes record strongly fluctuating data, but

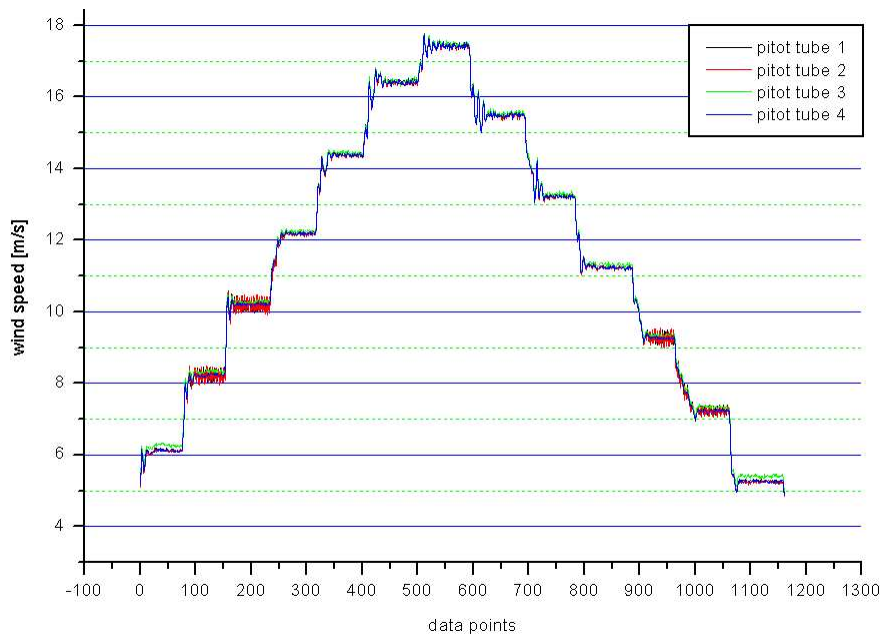


Figure 9: Plot of wind speed versus time for different wind speeds, oscillation of the pitot tube data can clearly be seen for wind speeds from 7-10 m/s

only for the range from 7 to 10 m/s the data of the first two pitot tubes features the described prominent deviation. At other wind speeds the fluctuation is not periodical.

However the mean value measured by the pitot tubes is not altered. Deviations of the mean value are only about 0,01 m/s from the mean value of the data of all pitot tubes. Therefore the observed effect does not alter the collected data significantly. A possible explanation for these phenomena is that the pitot tubes possess a natural frequency of approx. 30 Hz, the sampling with 10 Hz leads to undersampling, which results in an altered signal with possibly the detected frequency. Tests have shown that the effect disappears if the oscillation of the pitot tubes is prevented (personal communication with Dieter Westermann (2003)).

It should be mentioned that the position of the pressure sensor influences the peri-

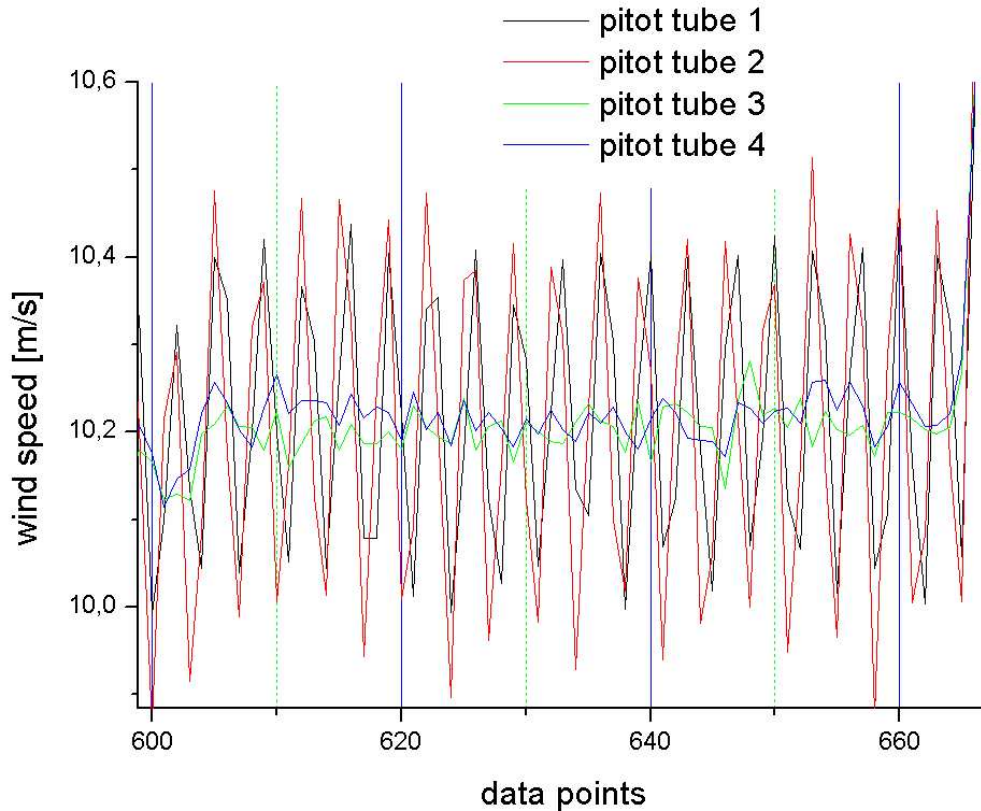


Figure 10: Wind speed versus time for a wind speed of 10 m/s, pitot tubes one and two show a periodic oscillation

odical oscillation as well. It is possible that electrical disturbances play their part in producing this effect.

2.5 Measurement Uncertainty

It is in the nature of measurements that they can not be absolutely accurate. Some possible uncertainties, which have to be considered, are listed here.

2.5.1 Accuracy of Pitot Tubes

Because the pitot tube measurements are going to be used as a reference, the measurement data gained has to be accurate. As mentioned in section 2.3, the reference wind speed is calculated from the measured air pressure and air density (see equation (7)). Because the air density is influenced by temperature, air humidity and air pressure, uncertainties in these parameters have to be considered as

well. Via error propagation the uncertainty of the wind speed calculation shows to be as follows:

$$\Delta u = \sqrt{\left(\left(\frac{\partial u}{\partial(\Delta p)}\right) \cdot \Delta p\right)^2 + \left(\left(\frac{\partial u}{\partial \rho}\right) \cdot \Delta \rho\right)^2}$$

$$\Delta \rho = \sqrt{\left(\left(\frac{\partial \rho}{\partial(p)}\right) \cdot \Delta p\right)^2 + \left(\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right) \cdot \Delta T\right)^2 + \left(\left(\frac{\partial \rho}{\partial \phi}\right) \cdot \Delta \phi\right)^2}$$

The partial derivations can be calculated from equations (7) and (8). For an accuracy of 1 degree/hPa/% in the temperature/air density/air humidity measurements, an accuracy of 0.2 % occurs for the measurement of wind speed. These accuracies are realistic for these wind tunnel measurements, resulting in a satisfying accuracy for a reference measurement.

2.5.2 Homogeneity of Wind Tunnel

The air flow produced in the wind tunnel is only valid as a reference wind speed if it is laminar and homogeneous. The homogeneity and hence the quality of the Oldenburg wind tunnel has been verified in measurements made by the Institute for Technical and Applied Physics (ITAP), see Stabe and Langner (1997) for further details. Both deviations from the mean wind speed and turbulence intensity have been measured. Both results are listed in tables 2 and 3.

A laminar core of the flow is found, depending in size on the distance to the opening. The head of the sonic and the pitot tubes are placed in the laminar core of the flow field, so the pitot tubes can be used as a reference signal.

| opening of the wind tunnel [m] | max. deviation [%] | size of core[m ²] |
|--------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 0.14 | 0.2 | 0.95 x 0.75 |
| 0.5 | 0.2 | 0.95 x 0.65 |
| 1 | 0.2 | 0.85 x 0.55 |
| 1.5 | 0.3 | 0.75 x 0.5 |

Table 2: Deviations of mean wind speed in the wind tunnel from Stabe and Langner (1997).

2.5.3 Mounting Errors of Sonic

Although mounting of a sonic on the swivel arm - or any other supporting structure for that matter - is conducted with great accuracy, there is still a possibility, that the mounting leaves the sonic not truly vertical or shifted in respect to the north

| opening of the wind tunnel [m] | max. turbulence intensity [%] | size of core[m ²] |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0.145 | 1.2 | 0.95 x 0.65 |
| 0.5 | 1.3 | 0.80 x 0.53 |
| 1 | 1.3 | 0.65 x 0.35 |
| 1.5 | 1.6 | 0.30 x 0.25 |

Table 3: Turbulence intensity of the wind tunnel from Stabe and Langner (1997)

alignment. While a shift in the north alignment can be corrected and is easily seen if one compares the adjusted and measured wind direction of the sonic in a wind tunnel, a tilted sonic must be treated carefully because although its tilt is not easily seen from measurement values, it changes them considerably.

It must be distinguished between a sonic tilted to a vertical axis of rotation and a tilted axis of rotation.

For a sonic which is tilted with regard to the vertical axis of rotation, the deviations expected in all three components are a sine functions. A maximum occurs when the tilt of the sonic amplifies the vertical wind speed, while 180 degrees later, when the tilt attenuates the vertical wind speed (where it can be most clearly seen because of the relatively small value of the vertical component) as the other components as well. Because of the rotation of the sonic, the deviation does not behave linearly between the maxima and minima. One has just to recall the derivation of the sine and cosine function via a vector rotating in the unit circle.

If the axis of rotation itself is tilted instead, a steady offset for the wind speed is expected in all three components, because the axis of rotation and therefore the sensors of the sonic stay in a constant angle to the wind field and the true vertical axis of rotation.

Section 4.4.1 deals with the corrections applied to correct the mounting error in the wind tunnel measurement. In section 2.2.3.2 the correction of this effect in the field measurement is described.

2.5.4 Uncertainties at Low Wind Speeds

As shown in fig. 11, measurements below a wind speed of 5 m/s are very imprecise. This results from the measurement range of the pressure sensors and the dependence of wind speed and air pressure. These measurements are neglected in the following study. Above 5 m/s reliable measurements can be made.

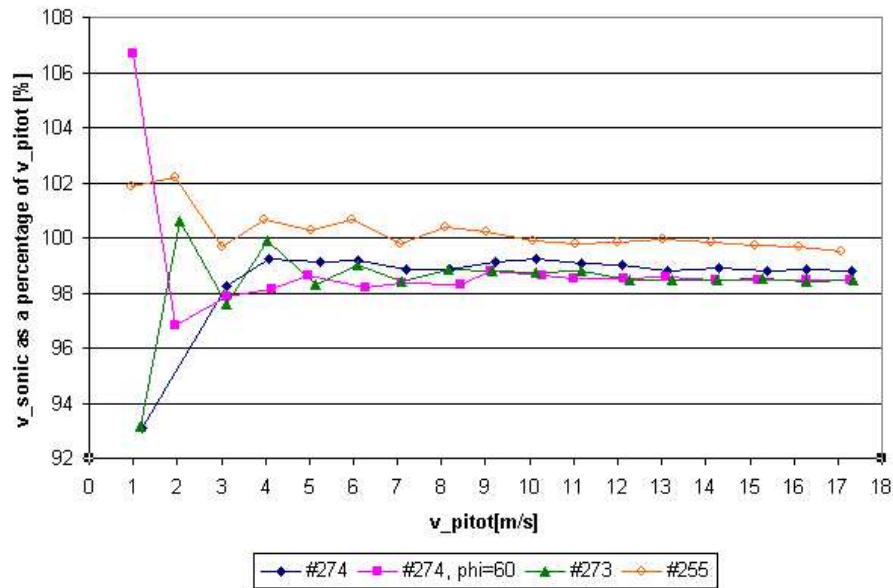


Figure 11: Wind speeds of all sonics as a percentage of the wind speed measured by the pitot tubes, for wind speeds from 1 to 17 m/s. For wind speeds below 5 m/s the accuracy of the measurements is very bad.

2.6 Results

2.6.1 Wind Speed Dependent Response

Wind speeds from 5 to 17 m/s are measured with sonic and pitot tubes in the wind tunnel, a plot of these measurements is shown in fig.12. In tab. 4 the difference between the reference wind speed and the wind speed measured by the sonics are shown. As can be seen, the measured wind speed exceeds the allowed deviation of 1% of the actual wind speed for the sonics #273 and #274.

2.6.2 Azimuth Angle Dependent Response: Horizontal Component

No Elevation Angle

For wind speeds of 5, 10 and 15 m/s either a full horizontal rotation or a rotation from 0 to 120 degrees is conducted.

Fig. 13 shows the response of a sonic for a full horizontal rotation at 10 m/s for sonic #255 as example. The behaviour of the other two sonics is similar. A strong peak around 12 degrees in front of each strut characterizes the response of all sonics. The ratio between the wind speed measured by the pitot tubes and the sonics

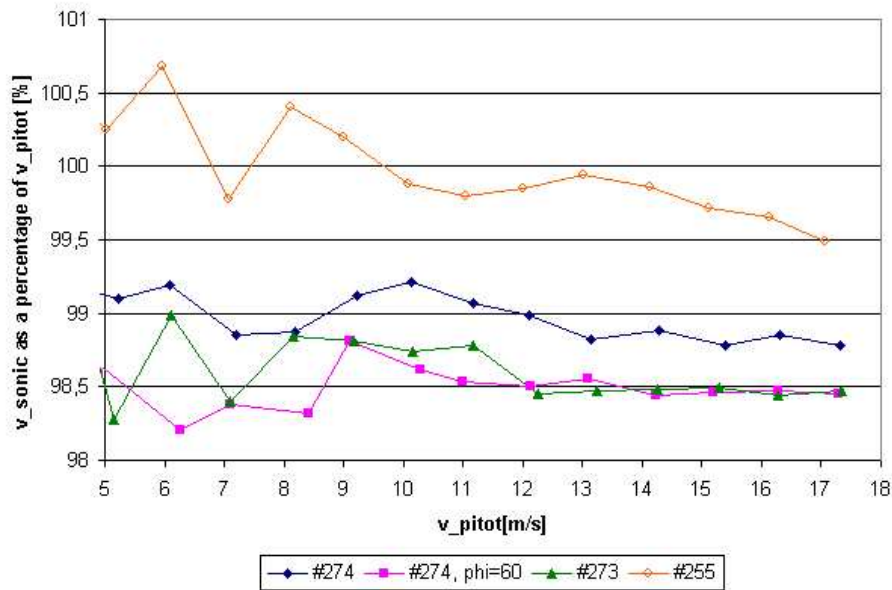


Figure 12: Wind speeds of all sonics as a percentage of the wind speed measured by the pitot tubes versus reference wind speed, for wind speeds from 5 to 17 m/s.

lies in a range of a 0.5 % deviation for the other azimuth angles (taken the offset of sonic #273 and # 274 in account).

Positive elevation angle

For a elevation angle of 10 and 15 degrees the sonic is rotated for 360 or 120 degrees.

In a range of $\pm 30^\circ$ around each strut, the sonic data falls off in comparison to the pitot data. The progression of this deviation is characterized by two peaks, between which a minimum lies.

Fig. 14 shows measurements made with sonic #273 as example. The same behaviour can also be seen in measurements made with sonic #255 and #274. Comparisons at elevation angles of 10 and 15 degrees show from sonic #273 that the elevation grows with growing elevation angle. See also section 2.6.4.

Negative Elevation Angle

Negative elevation angles of -5° , -10° and -15° are used to observe the response of the sonics for a rotation of 360° or from 0° to 120° .

The data generally features a strong deviation in the range of 10° ahead of each strut. It seems that the deviation increases with ascending wind speed and tilt, though there are differences between the sonics. Fig. 15 shows data for sonic

| sonic | horizontal alignment | difference: sonic / pitot tubes [%] average value |
|-------|----------------------|---|
| #255 | 0° | 0.48 |
| #273 | 0° | 1.41 |
| #274 | 0° | 1.05 |
| #274 | 60° | 1.51 |

Table 4: Sonic measured wind speed as a percentage of pitot tube measured, for wind speeds from 5 to 17 m/s.

#255, which is exemplary for the experienced response.

2.6.3 Azimuth Dependent Response: Vertical Component

Because the vertical component is totally uncorrected from the manufacturer, a special interest lies in the behaviour of this component. Every single measurement shows the same behaviour, an example is shown in fig. 16. Deviations of about 0.1 m/s are found for a vertical component when the elevation angle is zero e.g. no vertical component should be existent. At a wind speed of approx. 15 m/s this would lead to a deviation of approx. 0.15 m/s. For the wind speed a linear behaviour can be assumed, as will be shown in section 2.7.2.

2.6.4 Elevation Angle Dependent Response: All Components

For a constant wind speed of 5, 10 or 15 m/s elevation angles from -35° to 35° are adjusted.

In configurations with an azimuth angle of zero degrees, deviations exceeding 1 % of the reference speed only exist for large positive elevation angles, beyond 20 degrees. For an azimuth angle of 60 degrees, stronger deviations are found, for elevation angles smaller than -15 degrees and bigger than 20 degrees. Fig. 17 shows the response of sonic #255. On the whole, only for elevation angles having a magnitude of 15 and more degrees significant deviations are registered, these deviations increase with an azimuth angle near 60 degrees.

2.7 Conclusions

2.7.1 Overall Calibration Factor

As presented in section 2.6.1, where the wind speed dependent response of the sonics is shown, it can be seen that the measured wind speed for the sonic #273 and #274 differs for more than 1% of the wind speed measured by the pitot tubes.

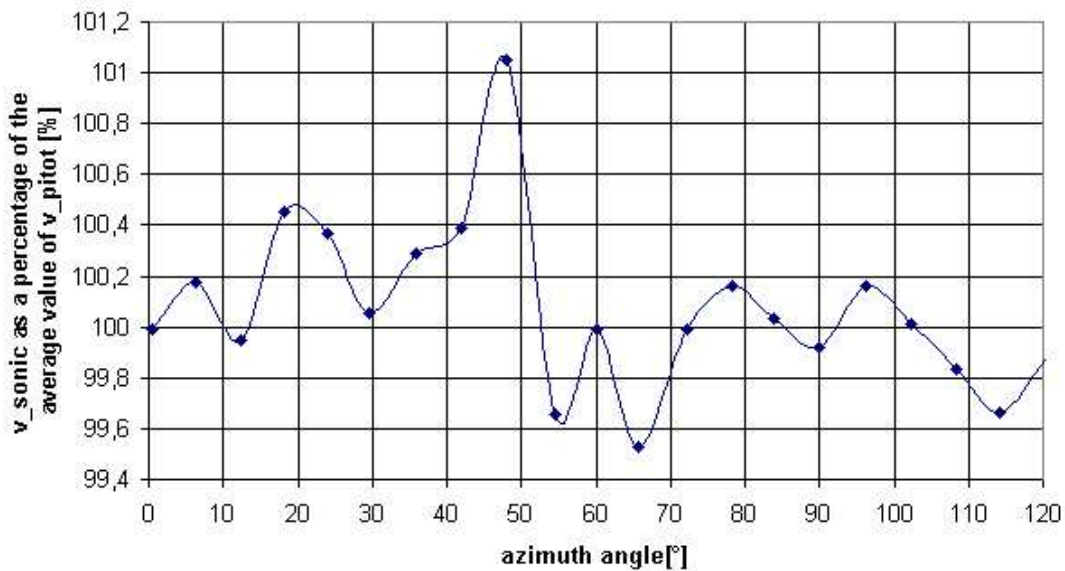


Figure 13: Sonic #255: wind speed as a percentage of the reference speed versus azimuth angle, no elevation angle.

These observations are consistent with other measurements.

As this exceeds the accuracy of wind speed given in the specifications of the sonics (see table 1) a correction should be applied to the two sonics.

In case of #273 the overall calibration factor is about 1.41% of the wind speed, for #274 it is 1.05 % far from a strut and 1.51 % near a strut. Although there seems to be a slight wind speed dependence in the overall calibration factor (see figure 4), no wind speed dependent overall calibration factor has been chosen, because not enough data is available to verify this dependence.

2.7.2 Symmetries and Linear Behaviour

Variation of Azimuth Angle

The symmetry of the probe head is reflected in a 120° periodic behaviour for the horizontal and vertical components and the magnitude of the wind vector as well, but for reasons of geometry not for the single u and v components which follow a sine respectively cosine function, one wavelength relating to a full rotation. The periodic behaviour is shown in fig. 18 for the magnitude of the wind vector. It can be seen that derivations between the different sectors are rather small. The most prominent features are a peak at approximately 48 degrees azimuth angle. These features are visible for all three sections.

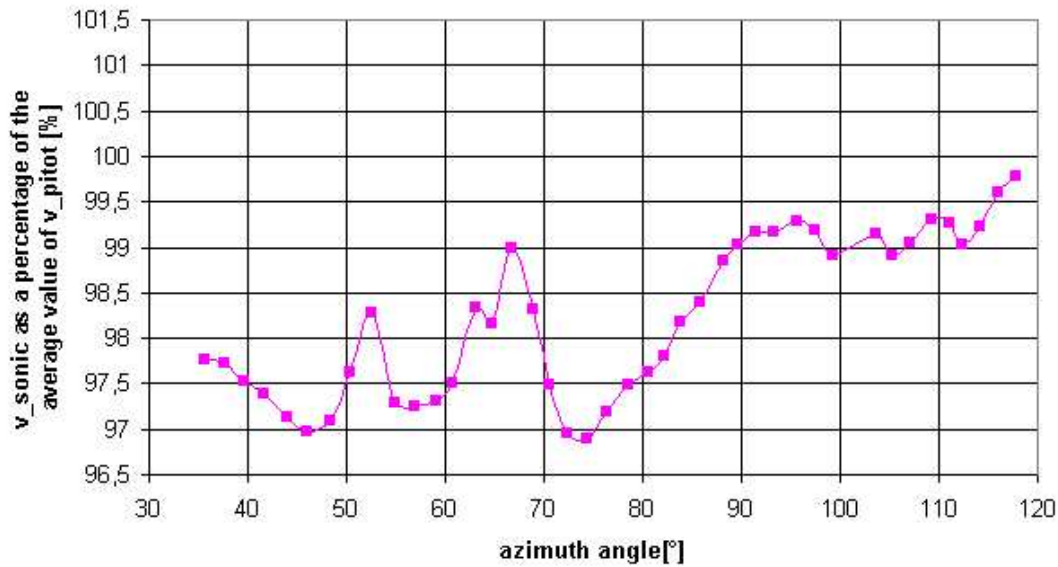


Figure 14: Sonic #273: wind speed as a percentage of the reference speed versus azimuth angle, positive elevation angle.

Variation of Elevation Angle

The variation of elevation angles is not symmetric, responses for positive and negative elevation angle differ totally, as can be seen in section 2.6.2.2 and 2.6.2.3. A possible reason for this is the different position of the sonic in the flow. For a positive elevation angle, the air flows directly over the supporting rod on which the probe head rests. Here the flow is constricted in front of the probe head and widens while passing it, resulting in a lower wind speed than without the disturbance. For a negative elevation angle, the air is constricted while passing the probe head, resulting in a higher wind speed. But a nearly linear behavior between neighbouring elevation angles might be concluded. For the vertical component, another effect can be observed. In fig. 19 it can be seen that the elevation angle seems to influence the position of the node of the data. It is shifted towards the position of the strut for positive elevations angles. Only for elevations angles which exceed ± 10 degrees, this behaviour is clearly shown. It is especially pronounced for an elevation angle of 15 degrees, where every sonics shows a clear shift to higher azimuth angles of the nodes in comparison to other elevation angles. Unfortunately, due to limited time available for the wind tunnel measurements, not enough measurements in this range were made to make a funded statement about a connection between node position and elevation angle.

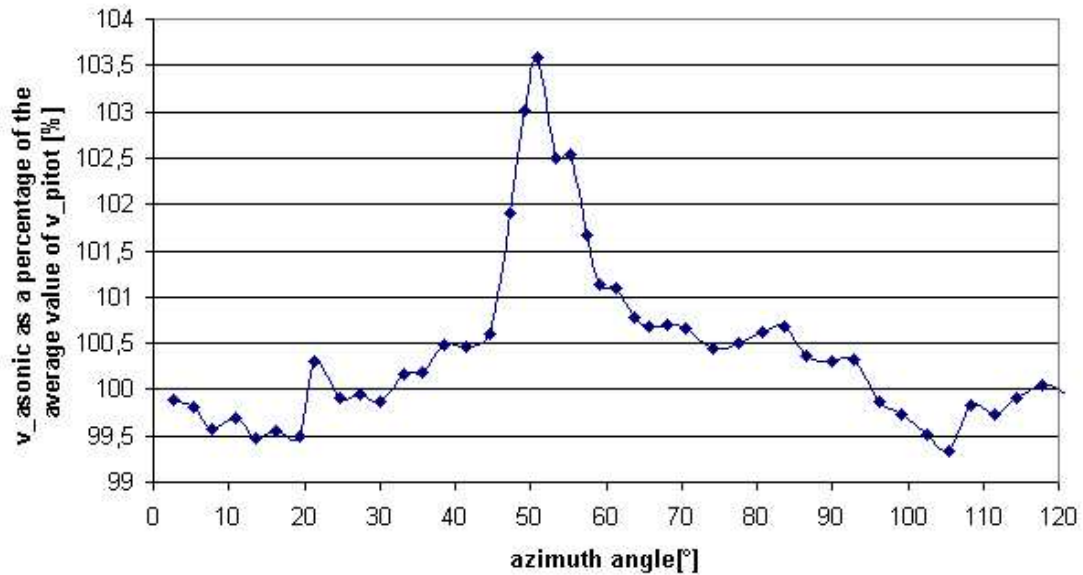


Figure 15: Sonic #255: wind speed as a percentage of the reference speed versus azimuth angle, negative elevation angle.

Dependence on Wind Speed

For a laminar flow, the dependence on wind speed is linear. But the flow distortion met here is far from laminar, thus the behaviour of the flow is hard to predict. The turbulent wind field and the wakes, building behind the supporting struts of the anemometer, cause a highly complex process, which can not be described in a linear way.

To investigate how wind speed influences, the vertical component is normalized with the reference wind speed compared for different wind speeds, at a fixed azimuth and elevation angle. The tilt corrected vertical component measured by the sonic is plotted over the reference speed measured by the pitot tubes. For azimuth angles of zero and 60 degrees, several wind speed measurements exist, as already presented in section 2.6.1.

For an azimuth angle of 60 degrees, the behavior resembles a nearly linear behaviour, the sonics response for #274 is shown in fig. 20, the sonics #273 and #255 show a similar behaviour.

Based on the measurements made, it is possible to derive an approximate behaviour of the wind speed that meets the observations made. Looking at the phys-

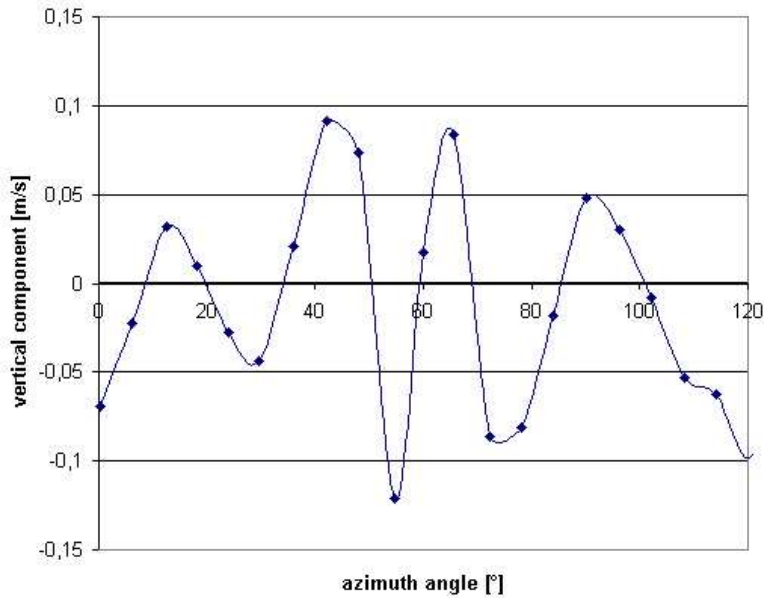


Figure 16: #255, vertical component versus azimuth angle for a wind speed of 10 m/s, no elevation angle

ical background describing these phenomena reveals a highly complex theory. No trivial theoretical solution can be found quickly, a sufficient analysis would exceed the scope of this work by far. Because empirical and theoretical methods to find a solution show to be problematic, at least an approximate description of the behavior observed is quite satisfying. The simplest solution is a linear influence of wind speed. For azimuth angles of strong deviation, this solution meets the observations made nearly perfectly as seen in fig. 20. If vertical components of different azimuth angles and wind speeds are normalised with the reference wind speed, the result is quite convincing, as can be seen in fig. 21.

2.7.3 Deviations

The results for all three sonics investigated are consistent. Comparisons between different series of measurements at points of similar configuration result in correspondence.

Deviations are found around the struts. For no or negative elevation angle, a strong peak ahead of the strut is found, which increases with growing elevation angle, seen if data in section 3.6.2.1 is compared to 3.6.2.3. For positive elevation angles, a symmetrical deviation is found around the strut, which does not depend so clearly on the magnitude of the elevation angle (compare 2.6.2.2).

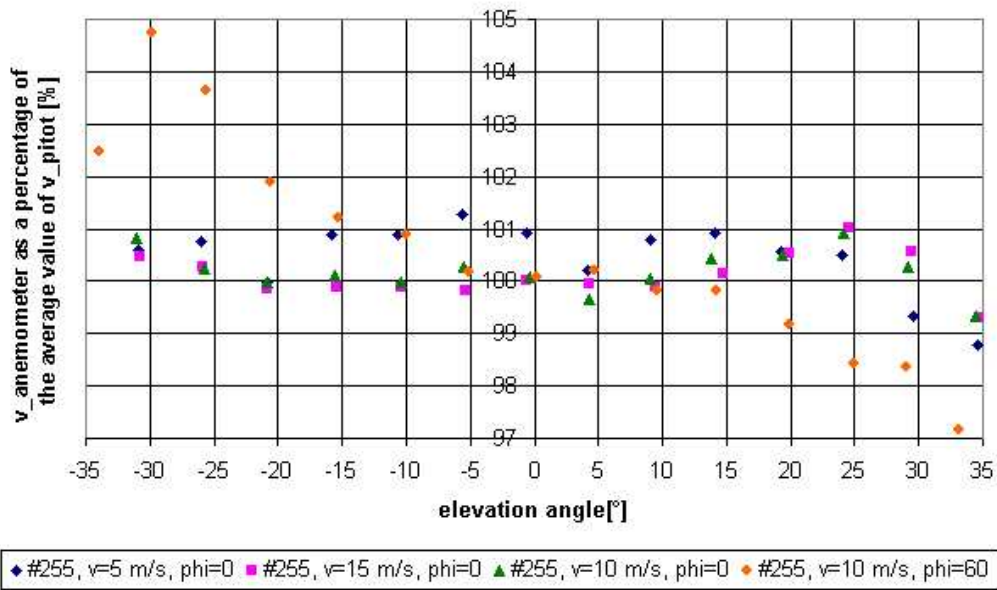


Figure 17: Sonic # 255: wind speed as a percentage of reference speed versus elevation angle, variation of elevation angle for different wind speeds.

The disturbing influence of the strut can also be seen in section 2.6.4, where the response shows a totally different behaviour for azimuth angles of 60 degrees. Although variation of the elevation angle shows no strong deviations for elevation angles of magnitude equal or smaller than 15 degrees, it can be observed in section 2.6.2.3 that even smaller elevations angles lead to an increasing deviation. The third dimension, which is not considered in the factory installed calibration, influences the calibrated measured data which makes a re-calibration necessary. Even for a 2-dimensional measurement constellation the deviations rise above the allowed 1% of the wind speed, since the perturbation caused by the struts is not completely corrected by the factory installed calibration. For the vertical wind speed it is seen that it has to be corrected as well.

2.8 Outlook

A few phenomena occurred, which were not discussed furthermore in this thesis, but might be of interest:

- The oscillation in the pitot tube data as described in section 2.4: Although the natural frequency seems to be the source of this phenomenon, still elec-

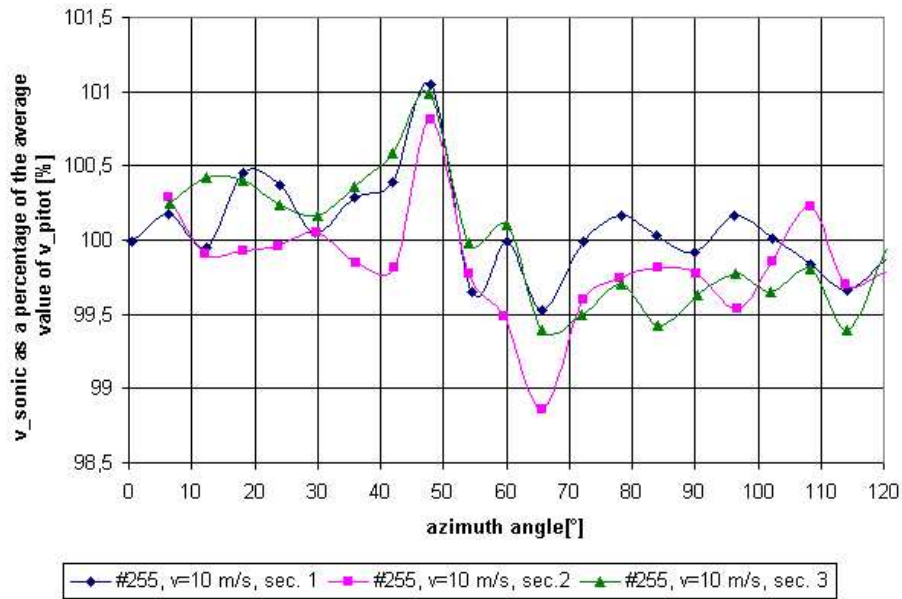


Figure 18: Sonic # 255: wind speed as a percentage of reference speed versus azimuth angle for all three sectors of the sonic, wind speed 10 m/s, no elevation angle.

trical effects were found to influence as well. It might be worth to investigate, whether electro-magnetic effects of the experimental setup influence in a disturbing way.

- A deviation of the adjusted azimuth angle and the azimuth angle measured by the sonic was found. Because the measured angle showed more homogeneous data, these values were used. Possibilities for this difference might be a slight misalignment of the anemometer in the setup, or imprecise adjustment of the azimuth angle in the measurements.
- The node shift of the vertical component observed for different elevation angles should be investigated more closely. A connection between these could provide helpful information for further correction of the sonic.
- Although the wind speed dependence could be assumed as linear as a first approximation, a more complex investigation should get closer to the actual behaviour.
- As a recommendation for future measurements: Multiple measurements should be conducted to minimize measurement errors. Additionally it is

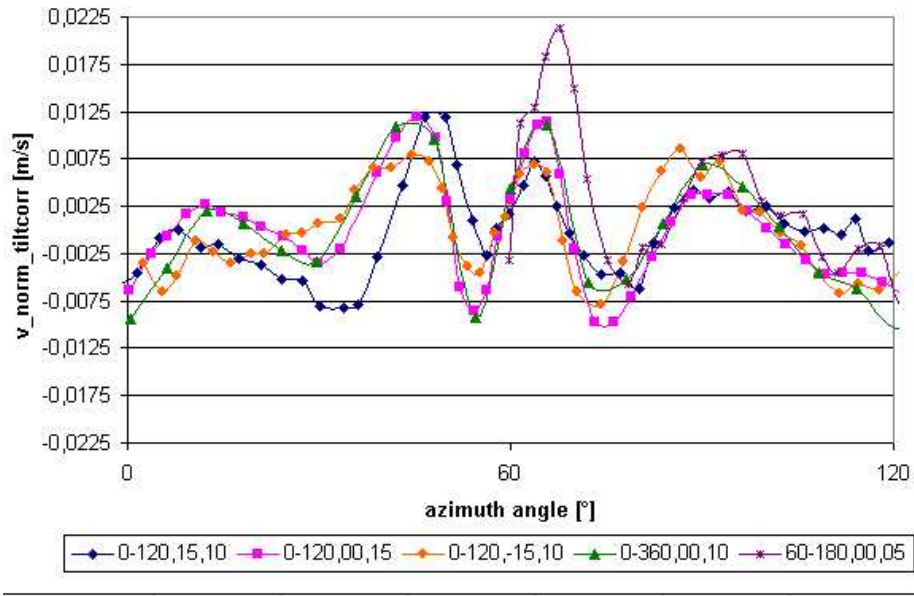


Figure 19: Sonic #255: tilt corrected and normalized vertical component versus azimuth angle for different wind speeds.

advantageous to use the same configuration for different sonics, and to measure the full scope of 120 degrees, with a fine resolution around the struts.

- Automation of the measurement setup improves the measurements a great deal.

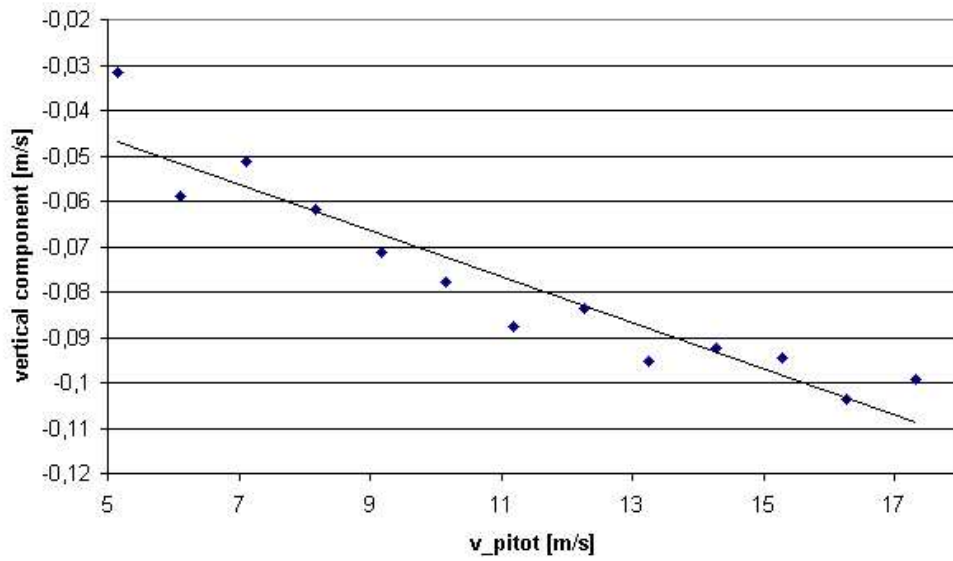


Figure 20: Sonic #274: vertical component versus v_{pitot} , azimuth angle of 60° , elevation angle of zero. The solid line shows a linear fit of the measurement data.

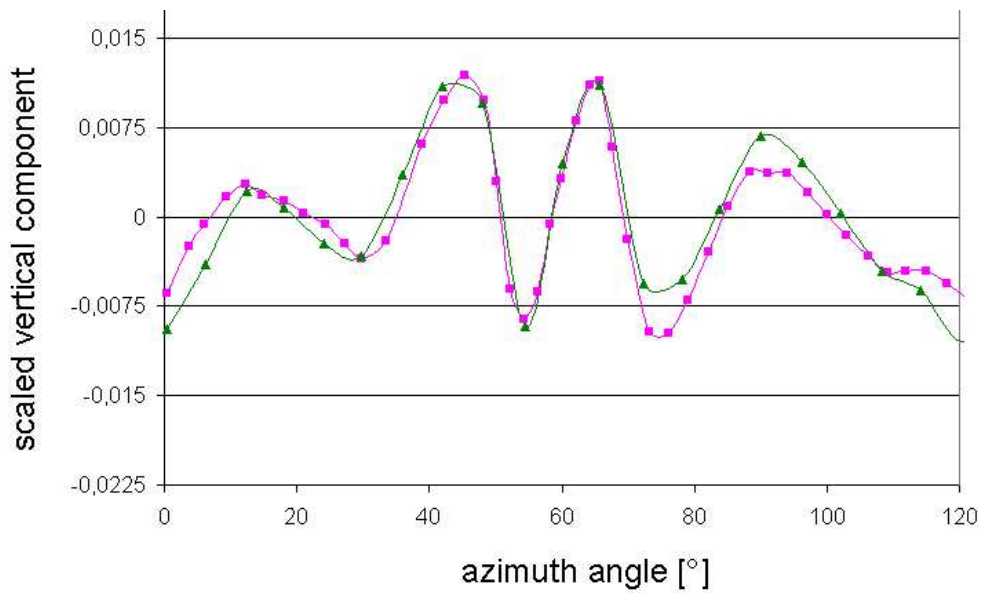


Figure 21: Sonic #255: normalized vertical component versus azimuth angle, no elevation angle, triangles were scaled from 10 m/s, squares from 15 m/s

3 Calibration of the Ultrasonic Anemometers

3.1 Introduction

It has been shown that a correction and extension of the factory installed calibration are necessary.

Because of time limitations extensive measurements were not possible, a calibration method was developed which requires less measurements. Additionally the method has to be based on measurements not on a physical description of the flow effects around the sonic.

3.2 Description of the Correction Method

The method used here are lookup tables, similar to the method Gill Instruments used, as described in section 2.2.1.2 Unlike Gill, the vertical component as well as elevation angles different from zero were accounted for.

For the tilt correction of the measurement data the method of Planar Fit was chosen, because of the advantages the method provides and because of the number of measurements from the measurement platform will be quite high. The correction of Gash and Polman for large elevation angles was not applied, but elevation angles larger than 20 degrees are very seldom.

For the correction of the flow distortion use was made of the 120 degree symmetry of the probe head for the spatial components, as well as the approximately linear behaviour for different wind speeds. For positive, negative and no elevation angles, different lookup tables are used (see chapter 2). So for each sonic exist nine lookup tables: a set of three for each positive, negative and no elevation angle. For each distinct elevation orientation, a correction table for horizontal and vertical components as well as the azimuth angle exist. The usage of the 120 degree symmetry reduces the measurements to one third for each azimuth dependent measurement, the linearity of wind speed makes it possible to use only one representative wind speed and for different elevation angles, only prominent configurations for a positive and negative elevation angle and a configuration for no elevation angle have to be used.

The lookup tables contain the correction factor which has to be applied to the normalized measurement value, according to the current azimuth angle and elevation angle.

The complete correction process is described in the following.

1. At first the three components (u,v,w) of the wind vector are corrected for tilt errors with the Planar Fit method.

2. The wind vector is turned into the main wind direction.
3. Detrending of the wind vectors three spatial components is conducted.
4. Then the wind vector is split up in its horizontal and vertical spatial components and the wind direction is derived, to make use of the 120 degrees symmetry of the probe head.
5. The appropriate correction values are looked up, and scaled to the correct wind speed.
6. The correction is applied to the measurement value.
7. After this correction, the two horizontal (u,v) components are derived from horizontal wind speed wind direction.
8. A fully corrected wind vector exists.

As can be seen, the whole correction process can be separated in three components: tilt correction, detrending and flow distortion correction.

3.3 Detrending

While the method of Planar Fit and flow distortion correction have already been discussed briefly, an important component the "detrending" has to be explained still:

Only the turbulent part of the measurement is of interest in flux measurements. But because a general rise of the wind speed does not contribute to fluxes, but adds to the difference between a measurement value and the mean value of a measurement interval. It must not be mistaken as a turbulent deviation. Therefore the general trend of the observed variable has to be considered: The trend of the measurement interval is calculated via linear regression. The trend is then subtracted from the measurement, leaving a measurement which deviations are purely turbulent.

3.4 Determination of the Lookup Tables from Wind Tunnel Measurements

The calibration depends, as the measurement itself, on three variables: azimuth angle, elevation angle and wind speed. For the wind speed a nearly linear behaviour could be shown, as well as it was shown that for positive and negative elevation angles different corrections are needed. The correction is linearly dependent on the magnitude of the elevation angle. Thus the three sets of look up

tables are for elevation angles of -15, 0 and +15 degrees. For elevation angles exceeding the magnitude of 15 degrees, the correction was not interpolated further, but the correction from the corresponding ± 15 degree elevation angle was used.

For each sonic, the set of three lookup tables for three different elevation angles is calculated for each of the following components: horizontal wind speed, vertical wind speed and wind direction (=azimuth angle).

Before these lookup tables can be derived from the wind tunnel measurement data, the data itself have to be tilt corrected.

3.4.1 Tilt Correction of Wind Tunnel Data

As described in chapter 2, a possible misalignment of the sonic calls for a correction. The data taken in the wind tunnel feature a sinusoidal behaviour for every measurement. This is especially obvious, if looking at the vertical component, because of the high deviations in comparison to the small vertical component. Therefore we can assume that the sonic is slightly tilted to a vertical axis of rotation. Differences of approximately one degree in the vertical angle lead to differences of 0,1-0,2 m/s in the vertical component. To correct this, the theoretically expected sine function is fitted on the measurement data for each sonic. The following function form is used within this fit:

$$y = a \cdot \sin(b \cdot x + c) + d \quad (10)$$

with specific coefficients a , c and d . The parameter b has the value of 0.01745 and represents the frequency of the sine function, corresponding to the wavelength of 2π , which equals a full rotation. The coefficient d considers the fact that a slight misalignment of the axis of rotation itself has also happened, resulting in a slight offset.

Fig. 22 shows the fit for sonic #255 as an example.

| anemometer | a | a-err | c | c-err | d | d-err |
|------------|-------|-------------|------|------------|-------|-------------|
| 255 | 0.093 | ± 0.012 | 3.54 | ± 0.12 | 0.064 | ± 0.008 |
| 273 | 0.070 | ± 0.012 | 5.58 | ± 0.11 | 0.011 | ± 0.008 |
| 274 | 0.098 | ± 0.011 | 5.65 | ± 0.12 | 0.008 | ± 0.008 |

Table 5: Sonic specific coefficients for the tilt correction function. The 2π periodicity of the fitting functions has been used, thus the difference to the coefficients given in fig. 22.

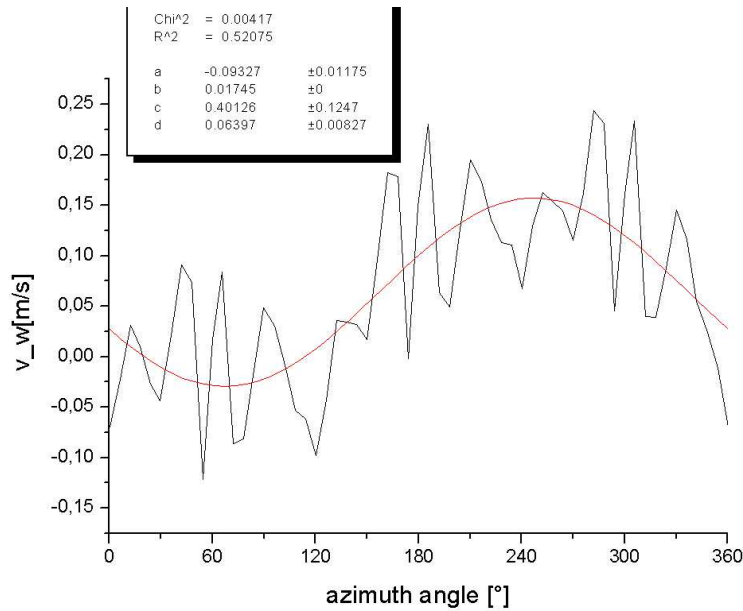


Figure 22: Sonic # 255: The vertical component and a fitting function plotted over the azimuth angle, for a measurement with no vertical angle at a wind speed of 10 m/s.

After subtracting these functions, the deviations in all three sectors of the sonic shown to be quite similar, all bearing the same offset from zero, see fig. 23. The coefficients found for the three sonics are shown in tab. 5. Although it can only be seen clearly for the vertical component, tilt correction must be applied to the other spatial directions as well, because they are also affected by the tilting.

After consideration of the tilt correction the lookup tables can be built. If for certain configurations two or more measurements were made, mean values of these measurements are used.

3.4.2 Lookup Table for Horizontal Wind Speed

The magnitude of the measured horizontal wind vector is compared to the reference horizontal wind speed for every azimuth angle and wind speed measured. For this, difference of the wind speed and the vertical component derived from the adjusted elevation angle is subtracted from the reference wind speed. The difference between the reference and the measured wind speed is normalized by the reference wind speed and after that used in the lookup table as a correction value for a normalized wind speed for that azimuth angle. To make use of the 120° degrees symmetry of the probe head, each azimuth angle beyond 120° is subtracted

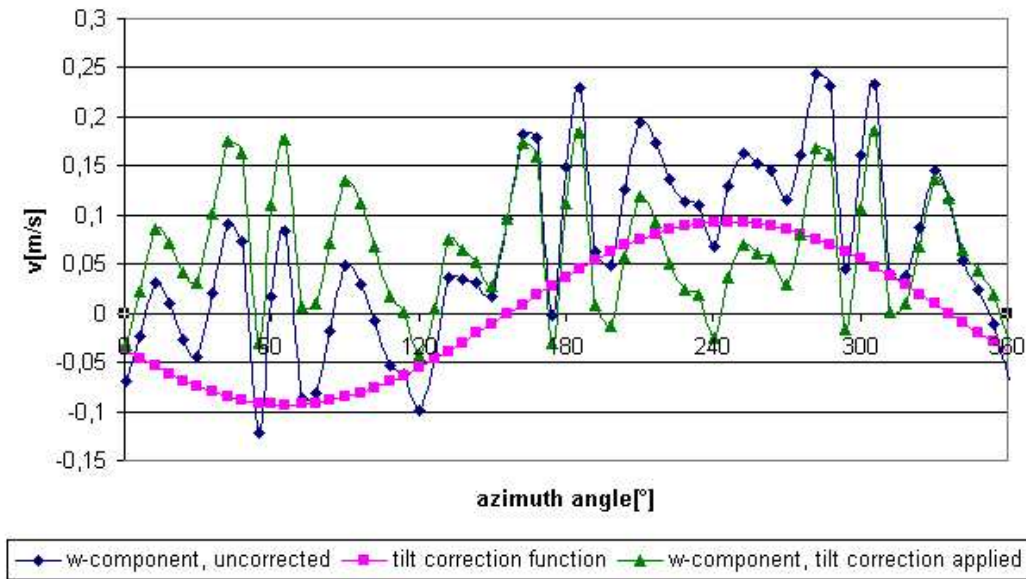


Figure 23: Sonic #255: The vertical component with and without tilt correction, for a measurement with no vertical angle, at a wind speed of 10 m/s. No offset applied for better visualization.

by 120° , respectively 240° if larger than 240° . This procedure also accounts for the steady offset found with sonics # 273 and #274, because the derivation from the reference speed is used.

If more measurements than one are made for a sector, the mean values of the values lying in the same one degree interval are used.

3.4.3 Lookup Table for Wind Direction (=Azimuth Angle)

Because the single horizontal components are calculated from horizontal wind speed and direction, and the measured azimuth angle shows differences to the adjusted one, correction of this variable is necessary as well. Differences of the measured azimuth angle (derived from the two uncorrected horizontal components) and the adjusted azimuth angle are listed in a lookup table. The sonic angle is corrected with these values.

3.4.4 Lookup Table for Vertical Wind Speed

Again, the difference between the reference and the measured wind speed is calculated and normalized with the reference wind speed. The reference wind speed

for the vertical component is derived from the geometrical relation between the reference wind speed and the adjusted elevation angle. The mean vertical wind speed is added or subtracted, emulating an elevation angle of zero degrees, to enable a better comparison between measurements of different elevation angles.

3.5 Testing of the Calibration Procedure

To test the calibration procedure, an additional measurement was made in the wind tunnel at a constant wind speed of 7.17 m/s with various elevation and azimuth angles. Tab. 6 shows the different configurations of azimuth and elevation angle.

| azimuth angle | elevation angle |
|---------------|-----------------|
| 17 | 00 |
| 17 | 05 |
| 17 | 10 |
| 55 | 10 |
| 55 | 23 |
| 100 | 23 |
| 180 | 23 |
| 180 | -7 |
| 280 | -7 |
| 280 | -21 |

Table 6: Spatial Configurations for the Test Measurement

After application of the calibration procedure, several improvements can be seen. The mean value of the wind vector decreases from 7.24 to 7.22 m/s, which reduces the overall deviation from 1 % to 0.7 %. Fig. 24 shows the difference of the corrected and the uncorrected wind speed. The different correction values used for different elevation angles can be seen very clearly.

The strongest improvement can be seen for the vertical component, where the mean value decreases from 0.08 m/s to 0.06 m/s. Fig. 25 shows the differences of a corrected and an uncorrected vertical component. The influence of the different tilt angles on the correction can be clearly seen as well. For a negative tilt angle the difference is heavily fluctuating. This is because the azimuth angle leads to a position in the lookup table with a very steep slope. Thus small variances for azimuth and elevation angles lead to strong differences in the applied correction value.

Generally, for a negative tilt angle, it would be expected to measure a too high vertical component, the procedure should lower the measured value, which it does. And for a positive tilt angle the expected rise of the measured vertical component

is found as well. As can be seen, the enhancement of the calibration corrects the measurements in a sensible way and improves the measurements quality.

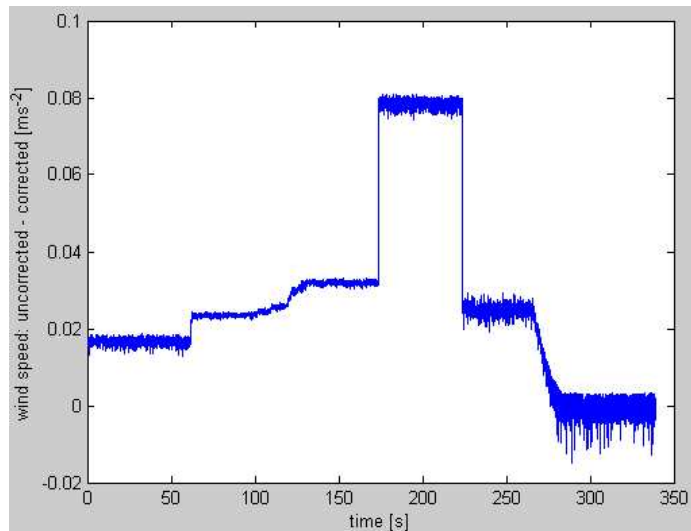


Figure 24: Sonic #255: Difference of the uncorrected and corrected wind speed over time.

3.6 Conclusion

- The correction is not perfect e.g. does not reach a 0% error, but for the magnitude reduces the error it had before and for the vertical component lowers it considerably as can be seen in section 3.5
- The calibration method is based on measurements made in a wind tunnel. Possible errors of this measurement are listed in chapter 2. Another problem might be the fact that the behaviour of the flow in the laminar conditioned laboratory can not be exactly transferred to the turbulent conditions met in field measurements. Generally the method can be used for every sonic given, if measurement time is available.

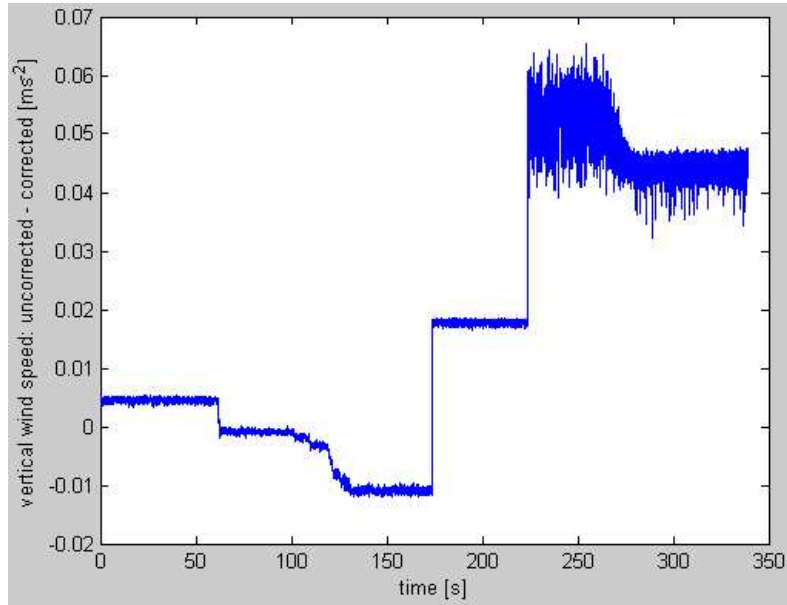


Figure 25: Sonic #255: Difference of the uncorrected and corrected vertical wind speed over time.

4 Comparison of Corrected and Uncorrected Field Data

For a first comparison, the monthly mean values from the corrected and the uncorrected measurements are shown in tab. 7. The changes for H are similar for both heights, the relatively large magnitude of change for H originating from the influence of the vertical component. Because the applied correction makes the largest relative changes for the vertical component, the large change is not surprising. The changes for u_* are rather similar as well, but for u_* has to be kept in mind that a 10 minutes average of the measurements was used to derive u_* , leading to a quite large sampling error.

U changes differently for each height, adding to the wind speed at 40m and lowering it at 60m. The magnitude of change is the same, the different algebraic signs might origin from slightly different wind directions, which can lead to very different correction values at steep slopes of the lookup table. The change of z/L is different for every height. The large difference could be because of the fact, that the sampling error of u_* grows considerably, when u_* is used in the third power, as for calculation of L .

For the frequency distributions of U , H , u_* and z/L , no significant trend can be

| 40m | corrected | <i>uncorrected</i> | change [%] |
|-----------------|-----------|--------------------|------------|
| $U [ms^{-2}]$ | 10.242 | <i>10.37054</i> | -1.24 |
| $u_* [ms^{-2}]$ | 0.32826 | <i>0.32991</i> | -0.5 |
| $H [Wm^2]$ | 11.60164 | <i>12.3916</i> | -6.37 |
| z/L | -0.35331 | <i>-0.39429</i> | -10.39 |
| 60m | corrected | <i>uncorrected</i> | change [%] |
| $U [ms^{-2}]$ | 10.63507 | <i>10.46695</i> | 1.61 |
| $u_* [ms^{-2}]$ | 0.35713 | <i>0.36144</i> | -1.19 |
| $H [Wm^2]$ | 12.48541 | <i>13.39198</i> | -6.77 |
| z/L | -0.50177 | <i>-0.50946</i> | -1.51 |

Table 7: Monthly mean values of U , u_* , H and z/L for heights of 40m and 60m, derived from corrected and uncorrected measurements, November 2003.

found, but the changes are visible, as pictured in fig. 26 for friction velocity and sensible heat flux.

If the difference of the uncorrected and corrected values is plotted versus the

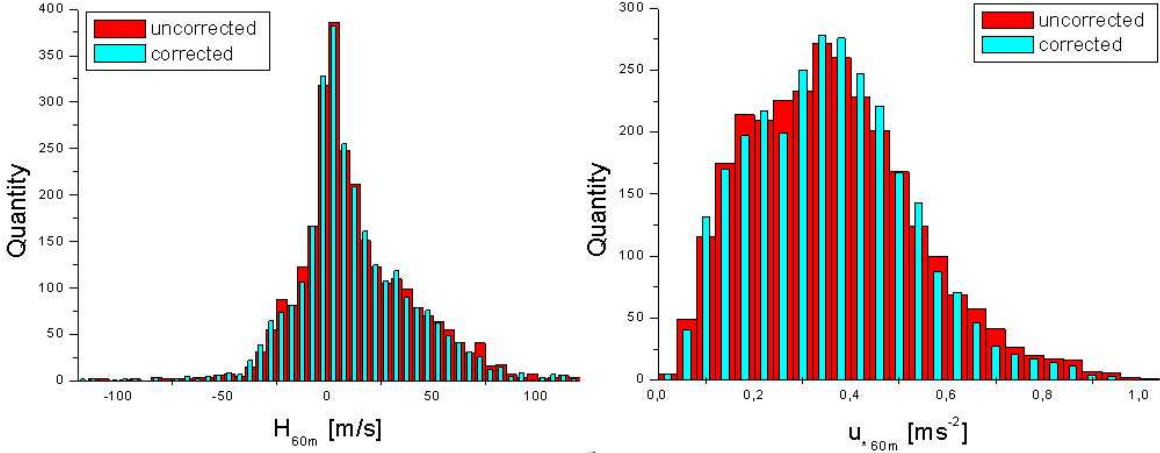


Figure 26: Frequency distributions for friction velocity and sensible heat flux at a height of 40m, corrected and uncorrected values, November 2003.

wind direction, one would expect to find a periodic behaviour for the difference, because the strongest correction applies around the struts. This is confirmed for the ratio between the uncorrected and corrected wind speed in fig. 27.

To visualize the effect of the changes applied, a plot of the uncorrected and the corrected wind speed is shown in fig. 28.

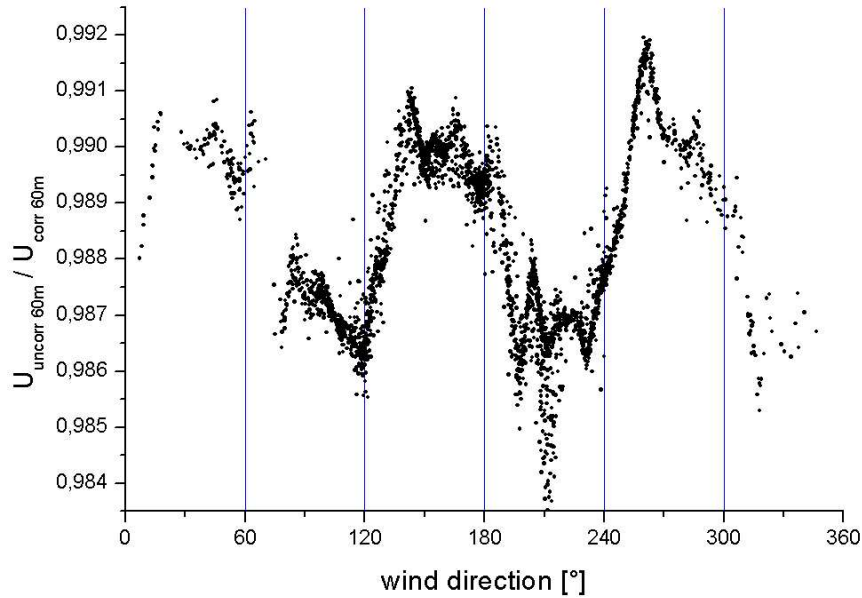


Figure 27: Ratio of uncorrected and corrected wind speed plotted versus the uncorrected wind direction, height of 60m, November 2003.

4.1 Conclusion

For the influence of the correction method, the correction changes become especially apparent for the heat flux, mainly because of the initial correction of the important vertical component. For the other quantities, the change because of correction is clearly visible as well.

5 Conclusions

The factory-installed calibration of the sonic anemometers was tested in the Oldenburg wind tunnel. Systematic errors similar at all three sonics as well as errors which are specific for each individual instrument were found in wind tunnel measurements. Around the struts, the measured wind speed can deviate up to 3 % from the reference wind speed. Additionally, the uncorrected vertical component proves to be problematic, erroneous vertical wind speeds of up to 0.1 m/s for a reference speed around 10 m/s were found. If the measurements should be used for flux calculations, an enhancement of the calibration is needed. This applies not only for the instruments used, but shows that the factory-installed calibration for the sonics should be treated with caution if used for flux measurements.

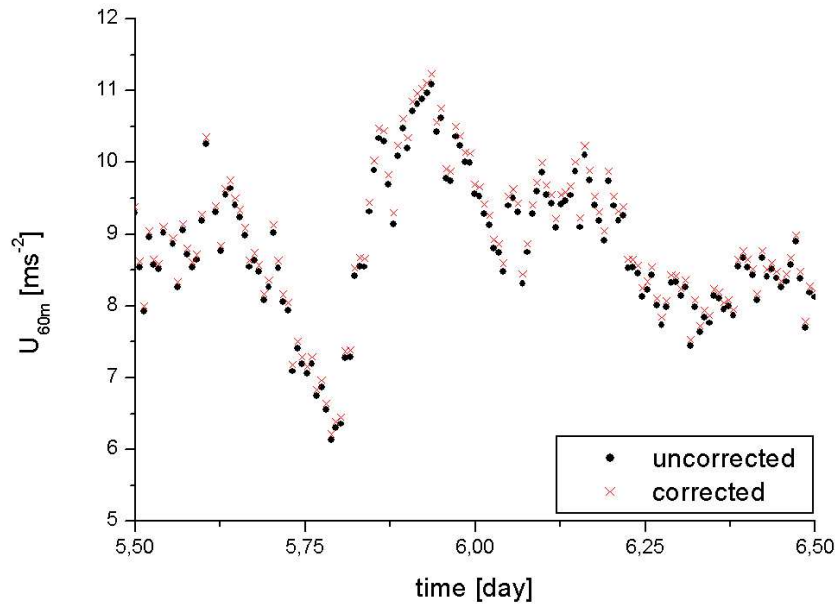


Figure 28: Uncorrected and corrected wind speed plotted versus time, height of 60m, November 2003.

A correction method for the calibration of the sonics has been developed, based on the measurements. The correction is azimuth and elevation angle dependent and makes use of symmetries and linearities found in the behaviour of the sonic in the flow. Therefore the correction employs a limited number of wind tunnel measurements, making it usable even if only short time is available for testing the sonic. The improvements could be shown, especially for the vertical component.

For the flux measurements, the effect of the corrected calibration was shown as well.

References

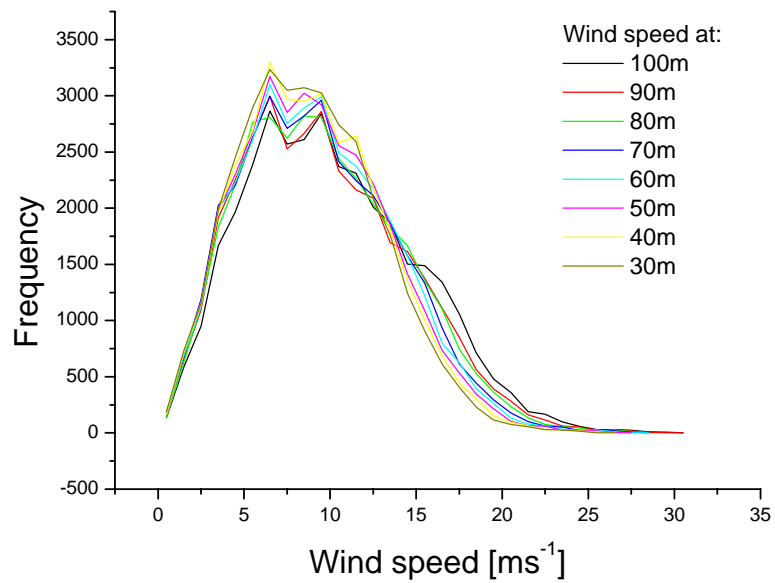
- [1] Institute for Technical and Applied Physics (ITAP): *Strömungsakustische Messungen im Windkanal*, Internal Report, University of Oldenburg
- [2] Deutscher Kalibrierungsdienst: *Leitfaden für Volumenbestimmung bei Referenzmessproben in medizinischen Referenzlaboratorien*, Teil 1, 2002

- [3] J.H.C. Gash, A. J. Dolman: *Sonic anemometer (co)sine response and flux measurement I. The potential for (co)sine error to affect sonic anemometer-based flux measurements*, Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 119, pp 195-207, 2003
- [4] Gill Instruments Limited: *"R3-50 Ultrasonic Research Anemometer"*, Datasheet, 2001
- [5] A. Grelle, A. Lindroth: *Flow Distortion by a Solent Sonic Anemometer: Wind Tunnel Calibration and its Assessment for Flux Measurements over Forest and Field*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 11, pp1529-1542, 1994
- [6] M.K. van der Molen, J.H.C. Gash, J. A. Elbers: *Sonic anemometer (co)sine response and flux measurement II. The effect of introducing an angle of attack dependent calibration.*, Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 122, pp 95-109, 2004
- [7] M.W. Rotach: *Turbulence within and above an urban canopy*, PhD Thesis, Zürich, 1991
- [8] U. Stabe, D. Langner: *Messung und Simulation systematischer Fehler des Ultraschallanemometers und deren Auswirkungen auf statistische Größen*, Diploma Thesis, Oldenburg, 1997
- [9] D. Westermann, Deutsche WindGuard GmbH: *personal communication*, 2003
- [10] J.M. Wilczak, S.P. Oncley, S.A. Stage: *Sonic Anemometer Tilt Correction Algorithms*, Boundary Layer Meteorology, Vol 99., pp 127-150, 2000
- [11] A. Wiesner, F. Fiedler, U. Corsmeier: *The Influence of the Sensor Design on Wind Measurements with Sonic Anemometer Systems*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 18, pp 1585-1608, 2001
- [12] J.C. Wyngaard: *The Effects of Probe-Induced Flow Distortion on Atmospheric Turbulence Measurements*, Journal of Applied Meteorology, Vol. 20, pp. 784-794, 1981
- [13] J.C. Wyngaard, S.F. Zhang: *Transducer-shadow effects on turbulence spectra measured by sonic anemometers*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol.2, pp 548-558, 1985

ForWind - Center for Wind Energy Research
University of Oldenburg, Germany

Quality Control of the FINO I Data for the BAGO-Project

Saskia Tautz and Bernhard Lange



Oldenburg, September 2004

Contents

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCTION | 3 |
| 2 | METEOROLOGICAL DATA | 3 |
| 2.1 | Time Series | 3 |
| 2.2 | Frequency Distributions | 4 |
| 2.2.1 | Wind Speed | 4 |
| 2.2.2 | Temperature | 5 |
| 2.2.3 | Humidity | 6 |
| 2.3 | Wind speed ratios of different sensors at different heights | 7 |
| 2.4 | Wind direction differences | 15 |
| 2.5 | Temperature differences | 21 |
| 2.6 | Humidity Differences | 26 |
| 3 | FAST DATA | 28 |
| 3.1 | Quality Control of the Sonic Wind Speed | 28 |
| 3.2 | Quality Control of the Sonic Wind Direction | 28 |
| 3.3 | Peaks | 29 |
| 4 | CONCLUSION | 31 |
| 4.1 | Meteorological Data | 31 |
| 4.2 | Ultrasonic Data | 31 |
| | REFERENCES | 32 |

1 Introduction

The measurement data from the FINO I measurement platform used in the BAGO project has been quality controlled. On the one hand, 10 minute mean values from cup anemometers, wind vanes, temperature sensors und humidity sensors are available, these data are called the meteorological data. On the other hand, measurement data with a measurement frequency of 10Hz are available from the ultrasonic anemometers. These data are called ultrasonic data.

Meteorological data from September 2003 to April 2004 have been used. For the test of the ultrasonic instrument, measurements from November 2003 have been used.

At first, the meteorological data is investigated. Time series plots have been inspected, frequency distributions have been derived and measurements of different heights have been compared to each other.

For the ultrasonic measurements, the data are compared to reference data from the meteorological data.

2 Meteorological data

2.1 Time Series

Plots of the whole time series from 1.9.03 to 1.5.04 have been made for the wind speeds measured by the cup anemometers, the wind directions measured by the wind vanes, the temperatures and the humidities. The time series plots have been visually inspected and erroneous or suspicious time periods found are listed in Table 1, other interesting events found are listed in Table 2.

Table 1: Erroneous or suspicious time periods in the slow data from September 2003 to April 2004

| Time period | Quantities | Remarks |
|---------------------------------------|-------------------------|---|
| 1.9.-2.10.03 12:00 | Wind vane 50 m | Wrong calibration, sign error |
| 1.9.-2.10.03 12:00 | Hygrometer at 90m | no measurement |
| 1.9.03 - 1.5.04 (all) | Wind vane at 70 and 50m | records below about 50° and above about 310° have been omitted and interpolated between (often across 180°, e.g. 10.-11.9.03) |
| 1.10.03 00:00 - 2.10.03 12:00 | All | missing data have been interpolated! |
| 22.12.03 ca 11:00 - 23.12.03 ca 01:00 | All | missing data have been interpolated! |

It has to be noted that the direction measurements at 70m and 50m are of very restricted usability. For the two wind vanes at 50 and 70 m height, the data channels used are not intended for direction measurements (personal communication: T. Neumann, DEWI, 2004).

Values above about 310° and below about 50° are wrong, but due to the interpolation used, also values between 50° and 310° might be wrong from the interpolation. A selection of erroneous values and cleaning of the time series is only possible for the uninterpolated time series.

The values of the measurements have been checked for values obviously out of range. A range of 0-35 m/s for wind speeds 0-360° for wind directions, -5-25°C for temperatures and 30-105% for humidities have been used. No record exceeded these ranges.

Table 2: List of interesting findings in the time lines for slow data, September. 2003 - April 2004

| Date | Finding |
|--------------------------|--|
| 22.9.03 ca. 20:00 | 4-5°C drop in T in 10 min. with drop in wind speed |
| 13.-17.12. | large variation in all quantities |
| 4.1.04 | Wind speed at 100m much larger than others. Wind direction change of almost 180° |
| 13.-14.1.04 | Temperature at 70m markedly lower than temperature at 30m for high wind speeds |
| 16.-18.3.04, 16.-17.4.04 | wind direction shift with height in strongly stable conditions |

2.2 Frequency Distributions

2.2.1 Wind Speed

The Frequency Distributions for wind speed are similar to the Weibull-Distribution. The fit is not perfect, but the measurement interval is only 5 month long, a longer measurement time with more seasonal differences for the wind speed might improve the fit. Around 10 m/s and above the amount of measurement values is too small for a good fit with the Weibull-Distribution, as one can see in Figure 1

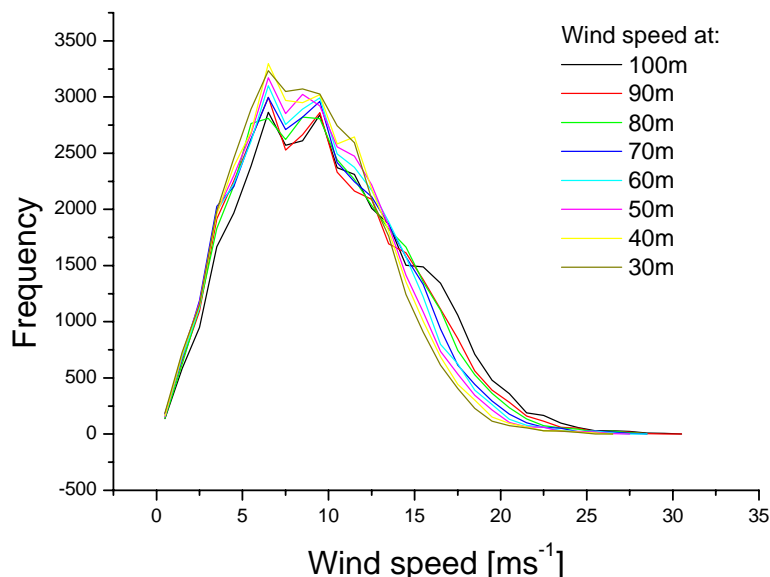


Figure 1 : Frequency distributions of wind speeds at different heights

For the frequency distribution of wind direction, a dominance of directions between 180° and 265° can be found. The wind vanes at 50 m and 70m show strongly deviating

behaviour at about 310° and 60°. For 310° the mast shadowing influences additionally to the wrong interpolation of these two data channels, see Figure 2.

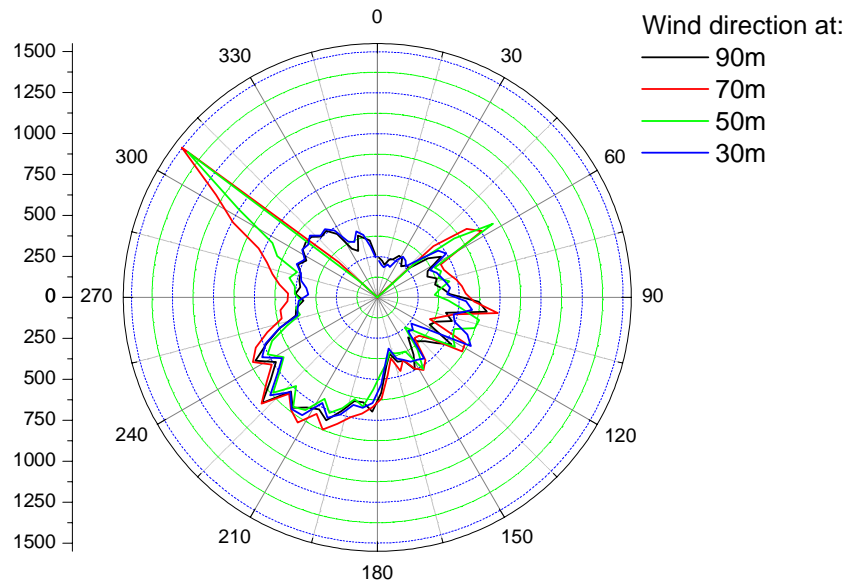


Figure 2: Frequency distribution of all measured wind directions. Plotted in polar coordinates.

2.2.2 Temperature

The frequency distribution for temperature reveals temperatures between -2.5 and 22.5° C. The peak lies between 5 and 10° C, see Figure 3. For the summer, higher temperatures and hence a shift in the frequency distribution are expected.

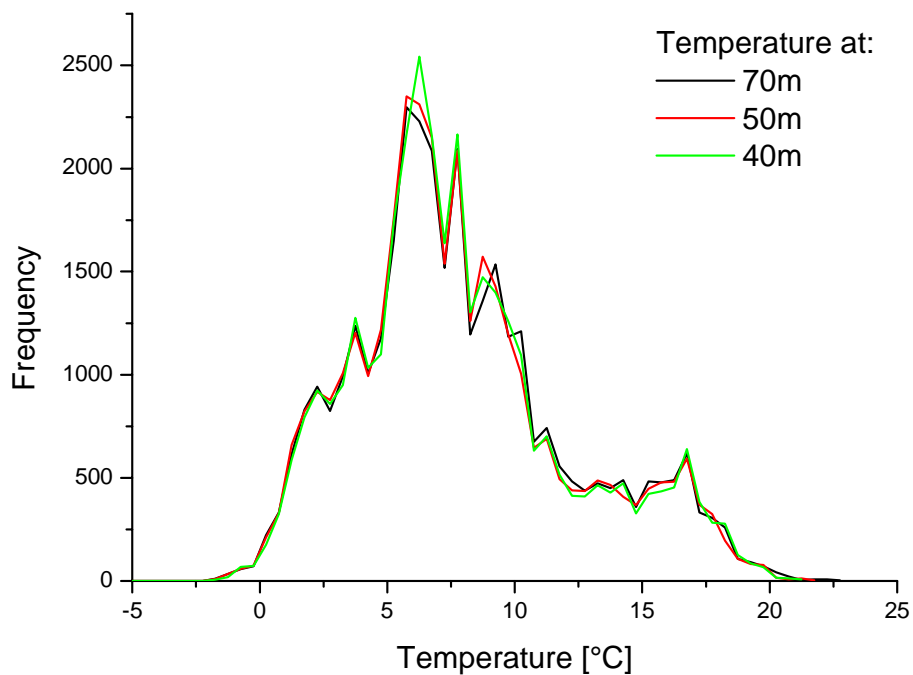


Figure 3: Frequency distribution of temperature measurements at two different heights.

2.2.3 Humidity

Figure 4 shows that the relative humidity is rather high, most of the time over 60%. Smaller heights (30m compared to 90 m) are more humid, as expected.

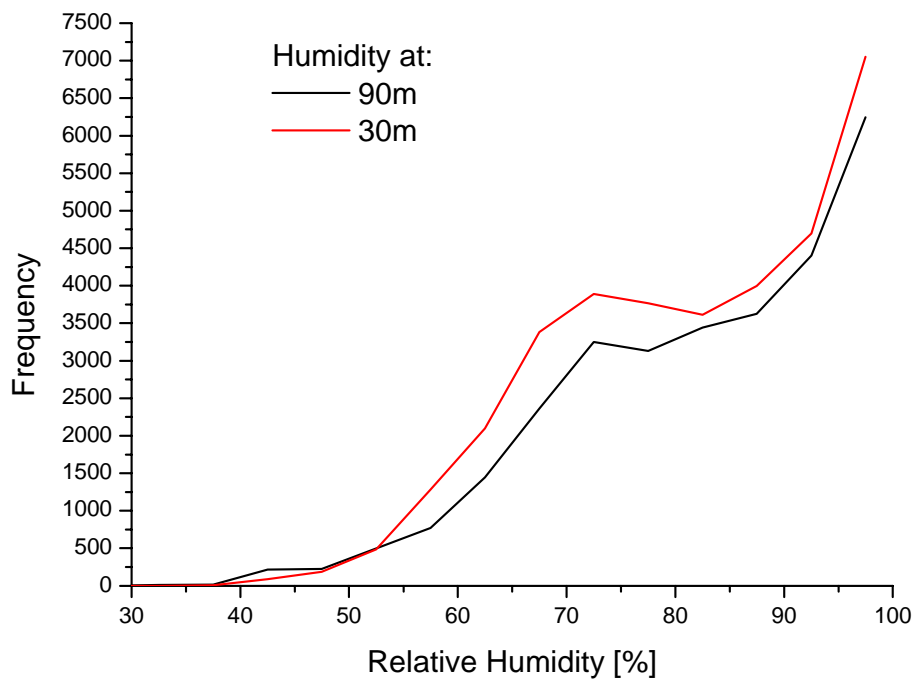


Figure 4: Frequency distribution of humidity at two different heights.

2.3 Wind speed ratios of different sensors at different heights

Wind speed measurements from different measurement heights are plotted versus each other. For the cup anemometers at 100m and 90m height, the scatter plot shows two distinct trends (see Figure 5). The stronger one shows the expected ratio of 1:1, the other reveals a smaller slope of 0.7. The reason is the influence of the mast shadow on the anemometer at 90m height, while the top anemometer at 100m height is unaffected.

The other measurements heights show consistent slopes of 1, with scattering due to mast shadowing. The scattering decreases with decreasing height (see Figure 7, Figure 9, Figure 11, Figure 13, Figure 15 and Figure 17)

Then the ratios of two neighbouring wind speed measurements are plotted in Figure 6, Figure 8, Figure 10, Figure 12, Figure 14, Figure 16 and Figure 18. The data gap at ratio 1 is a result of the discretisation of the wind speed data.

The wind speed ratios for the anemometer at 100m and 90m again behave differently. The disturbance of the mast only affects the anemometer at 90m, but small disturbances at about 90°, 180°, 270° and 360° wind direction are found, which probably origin from the lighting rods on the platform and can be seen in Figure 6.

The magnitude of the mast shadow differs for each height. No systematic in- or decrease could be found. The shape of the disturbance caused by the mast changes. The scattering is higher at smaller heights.

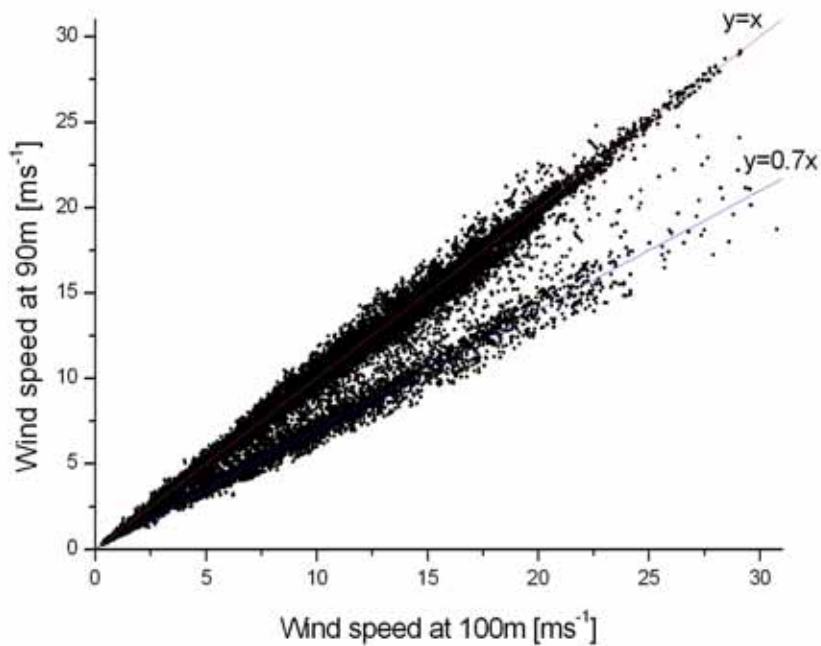


Figure 5: Wind speed at 90 m versus wind speed at 100m. Measurements made by cup anemometers.

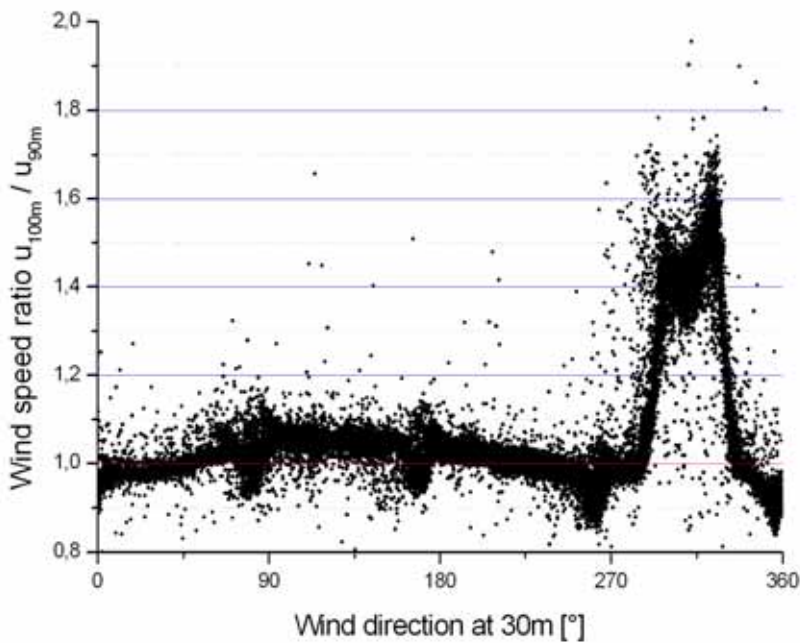


Figure 6: Wind speed ratio of cup anemometer measurements at 100m and 90m versus the wind direction at 30m.

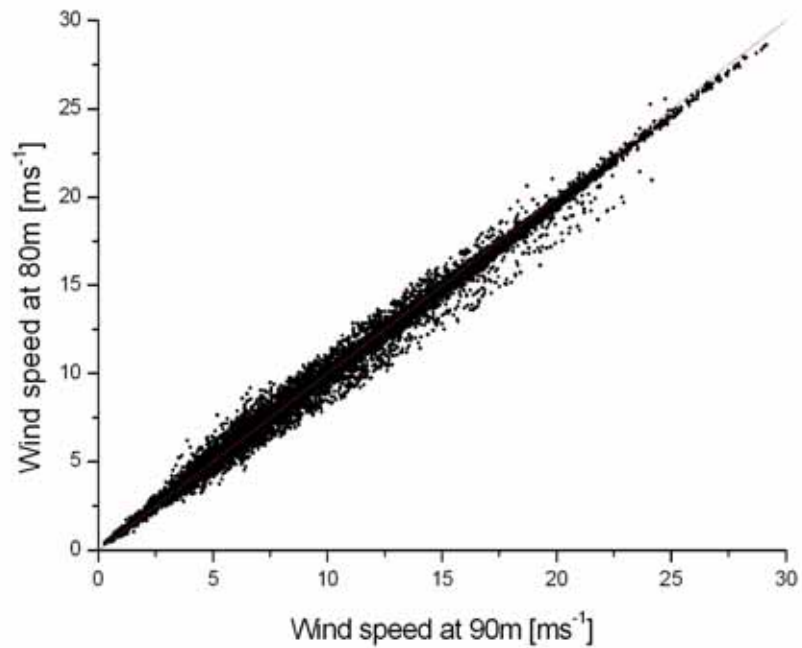


Figure 7: Wind speed at 80 m versus wind speed at 90m. Measurements made by cup anemometers.

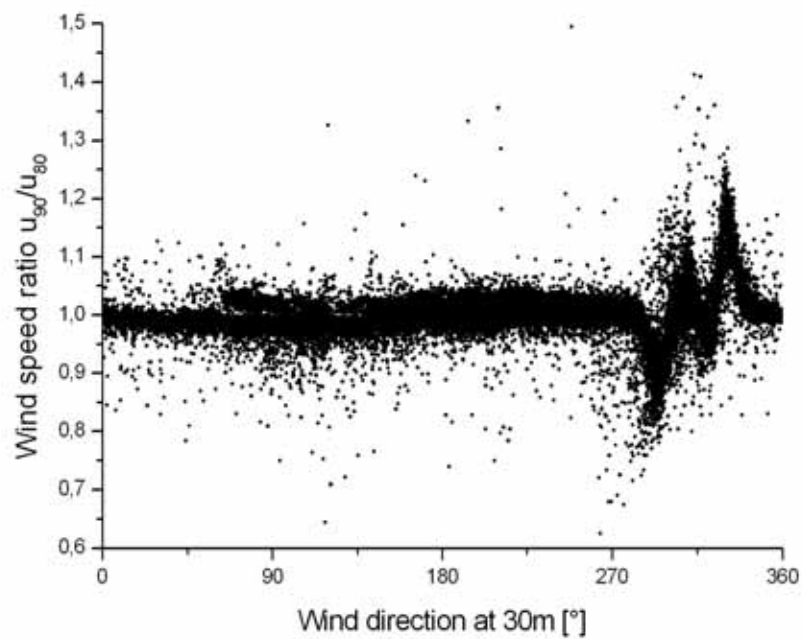


Figure 8: Wind speed ratio of cup anemometer measurements at 100m and 90m versus the wind direction at 30m.

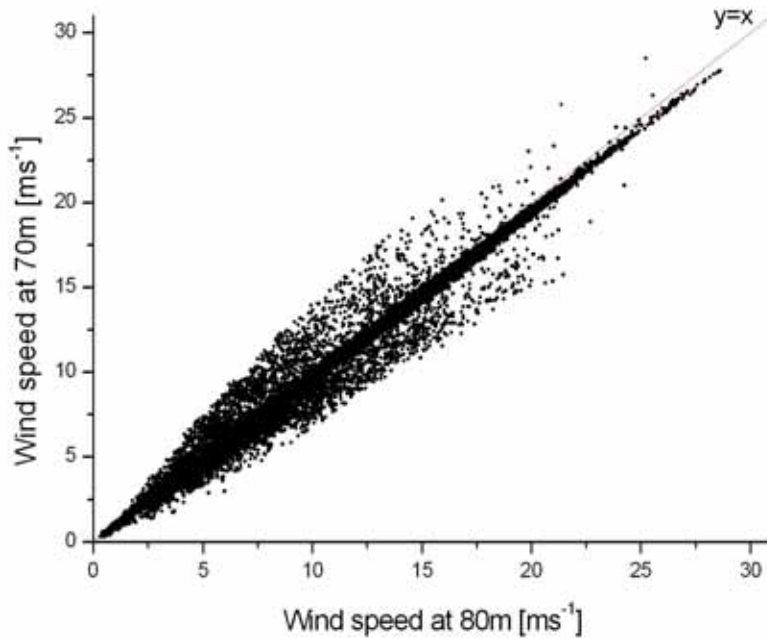


Figure 9: Wind speed at 70 m versus wind speed at 80m. Measurements made by cup anemometers.

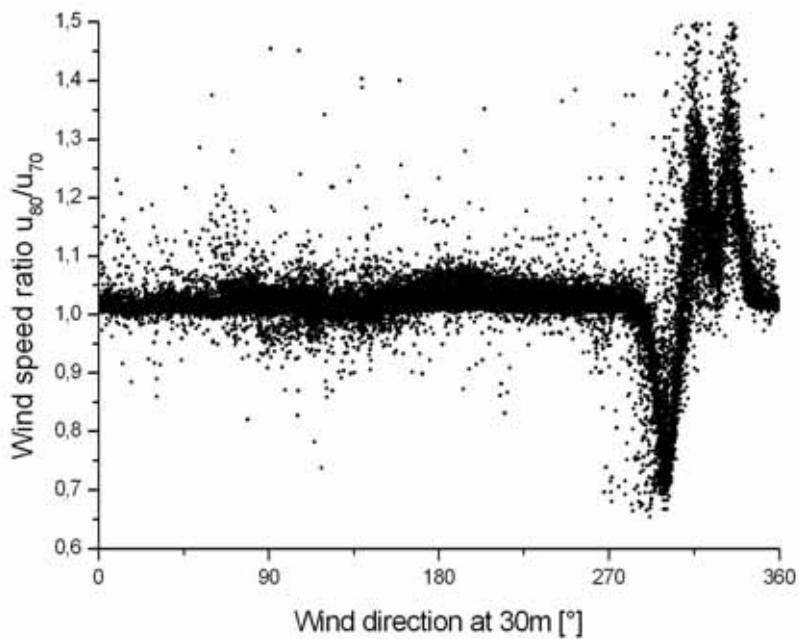


Figure 10: Wind speed ratio of cup anemometer measurements at 80m and 70m versus the wind direction at 30m.

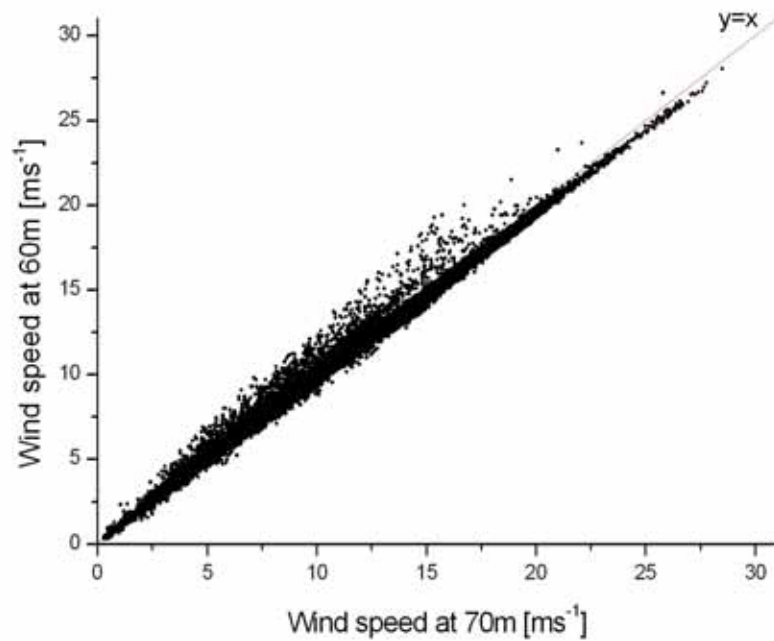


Figure 11: Wind speed at 60 m versus wind speed at 70m. Measurements made by cup anemometers.

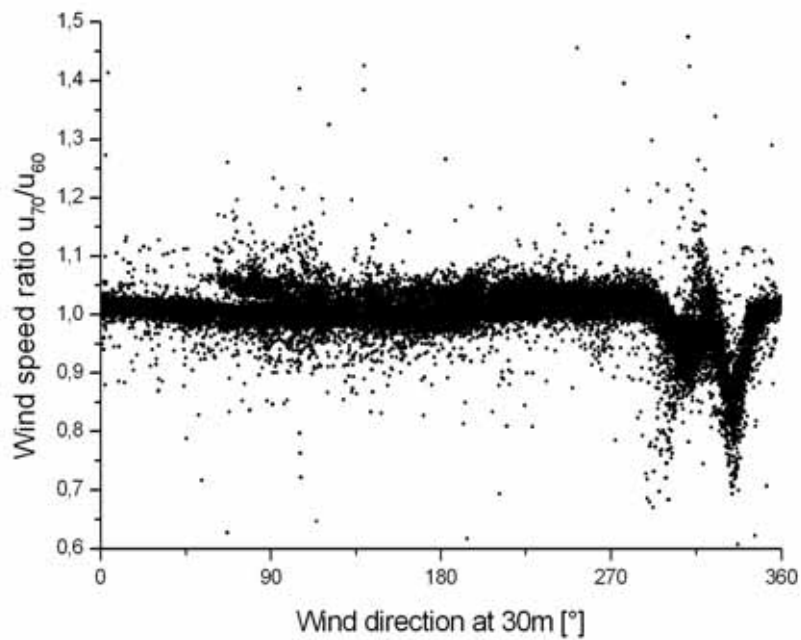


Figure 12: Wind speed ratio of cup anemometer measurements at 70m and 60m versus the wind direction at 30m.

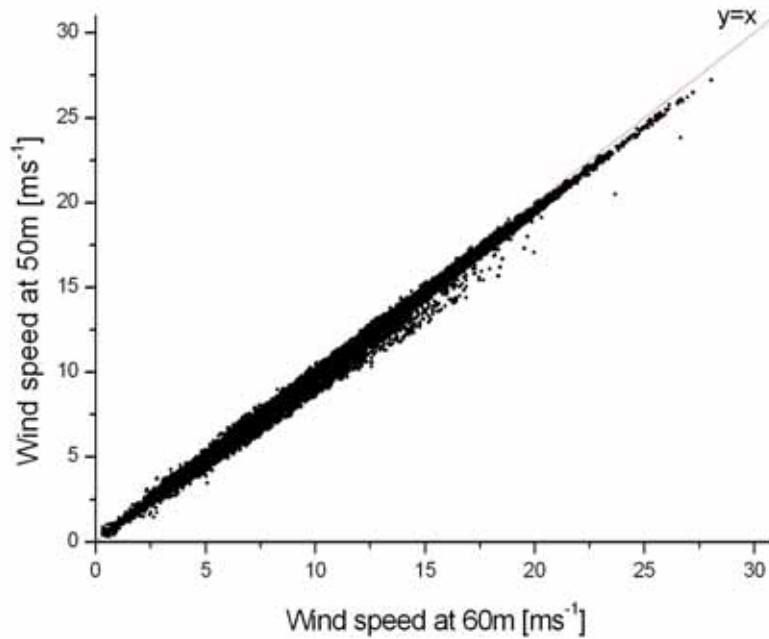


Figure 13: Wind speed at 50 m versus wind speed at 60m. Measurements made by cup anemometers.

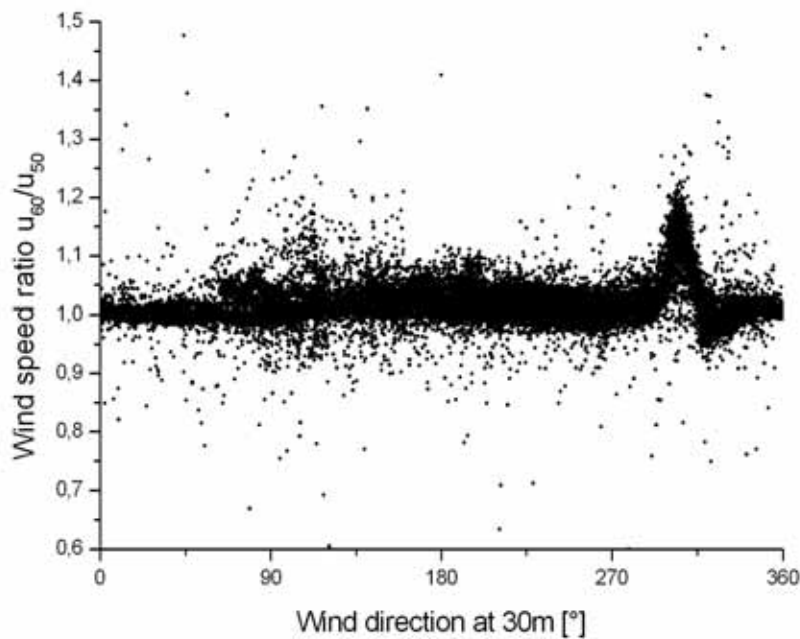


Figure 14: Wind speed ratio of cup anemometer measurements at 60m and 50m versus the wind direction at 30m.

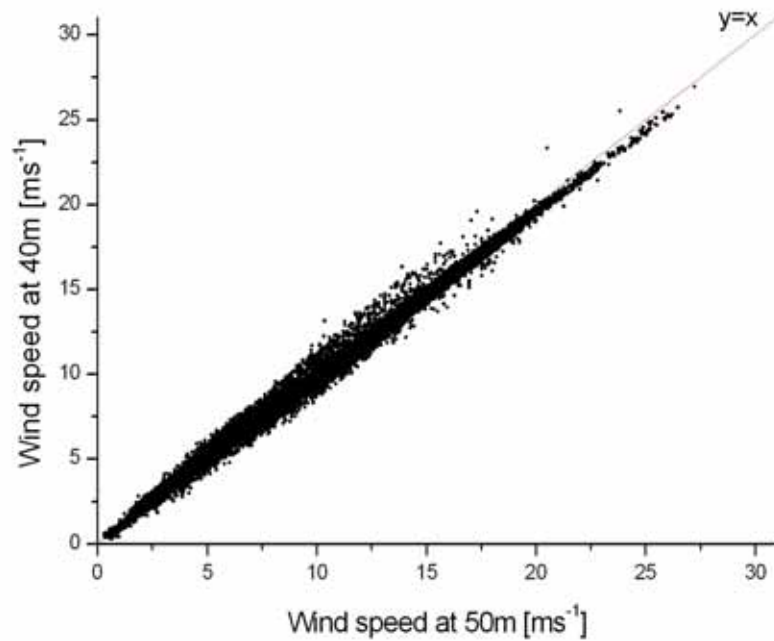


Figure 15: Wind speed at 40 m versus wind speed at 50m. Measurements made by cup anemometers.

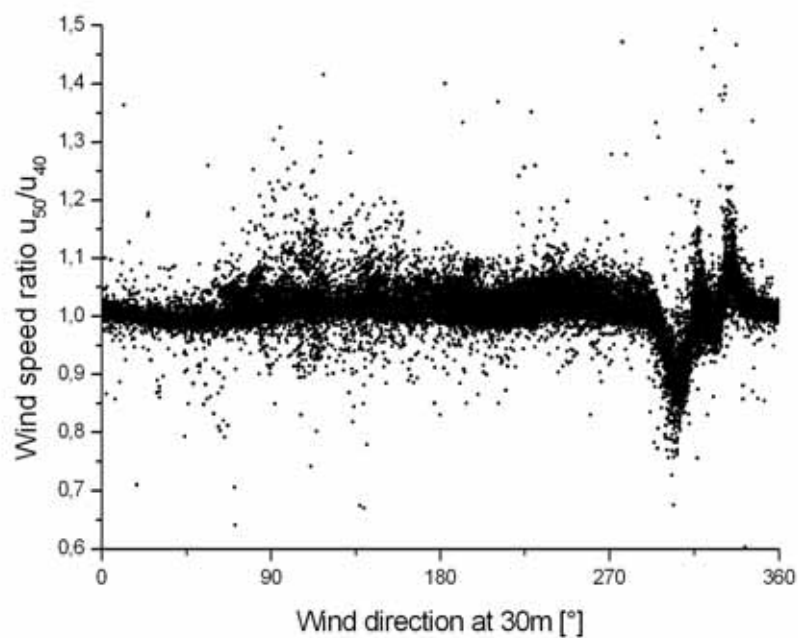


Figure 16: Wind speed ratio of cup anemometer measurements at 50m and 40m versus the wind direction at 30m.

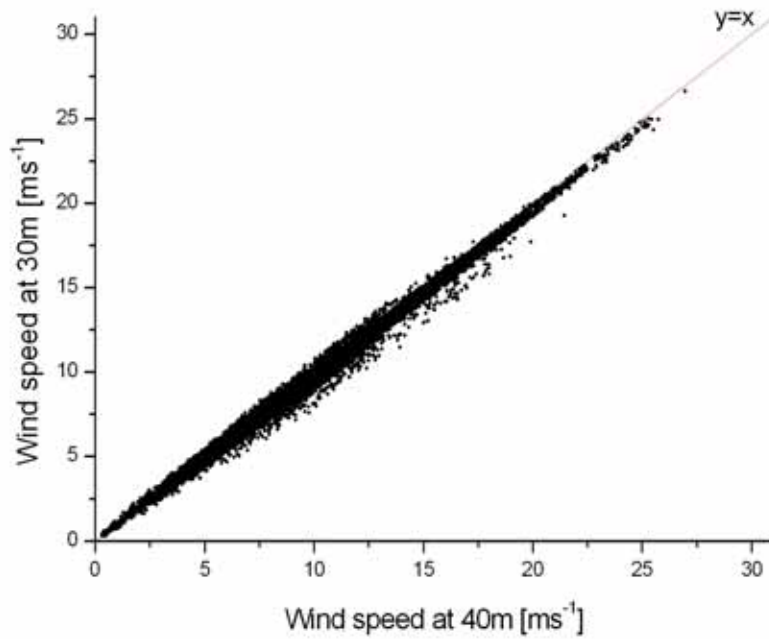


Figure 17: Wind speed at 30 m versus wind speed at 40m. Measurements made by cup anemometers.

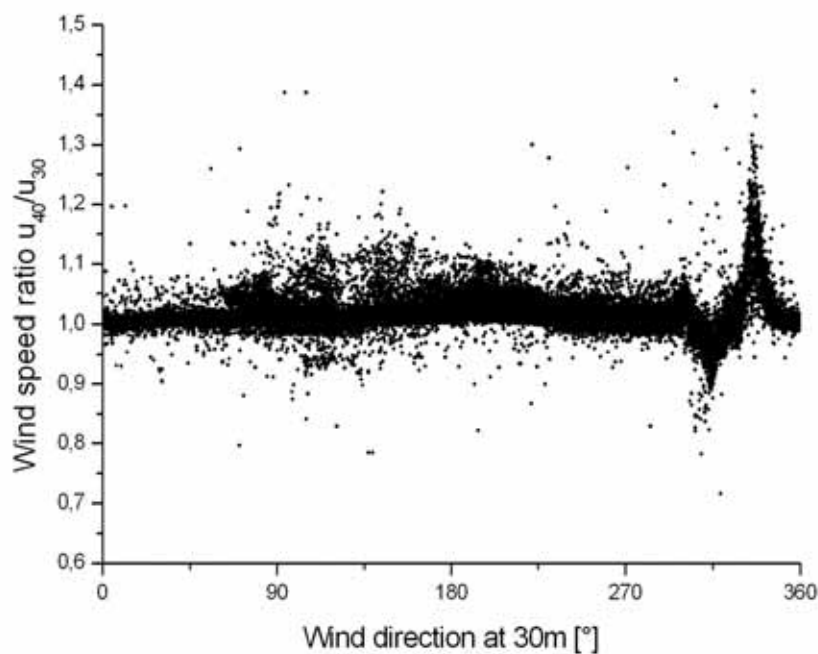


Figure 18: Wind speed ratio of cup anemometer measurements at 40m and 30m versus the wind direction at 30m.

2.4 Wind direction differences

Wind vanes at 90 and 30 m are discretised in 1° steps in November. A full account of the discretisations found is given in Table 3.

Table 3: Discretisation of wind direction measurements.

| wind vane | Record number | Measurement time [yyyymmddhhmm] | Discretisation |
|--------------------|---------------|------------------------------------|---|
| Wind direction 30m | -646 | -200309051140 | 1° |
| | 647-4220 | 200309051150- 200309300720 | 0.1° |
| | 4221-4535 | 200309300730- 200310021150 | error value |
| | 4536-15634 | 200310021200- 200312180340 | 1° |
| | 15635- | 200312180350- | 0.1° , sometimes 2 digits shown |
| Wind direction 50m | -4535 | -200310021150 | error value |
| | 4536- | 200310021200 | first $1/3^\circ$, later 0.01° |
| Wind direction 70m | all | | 2 digits |
| Wind direction 90m | -15632 | -200312180320 | 1° |
| | 15633- | 200312180320- | 0.1° , sometimes 2 digits shown |

In Figure 20 to Figure 22 the measured wind direction at 90m is compared to the wind direction at 30m. The difference between these two is large, mainly between -4° and $+4^\circ$ with additional large scattering. The mast shade can be seen clearly. For smaller wind speeds, the difference increases. The large deviations of up to 40° seem to be real, as the time series of 26/27.04.04 shows. The positive and negative differences are not symmetric. Larger negative differences are found for the time period with the 1° discretisation.

If the measured wind direction at 90 m is compared to the wind direction measured at 70m (see Figure 23 and Figure 25), the differences found are rather large as well. The difference lies mainly between -4 and $+2$ degrees, but scattering show differences of up to 20° . A direction dependent calibration error shows clearly for the comparison of wind direction at 90 and 70 m.

As mentioned, the influence of the measurement mast can be clearly seen in all intercomparisons of wind direction data. At directions 70° - 140° the directions differ for the different sensor combinations.

Slopes found for the comparisons are not consistent for different heights. Direction dependent differences (slopes in direction difference versus direction plots) with opposite directions were found for 70/50m and 50/30m.

For some time periods, large differences between the direction measurements have been found, which might indicate calibration problems (see Table 4).

Table 4: Time periods with direction measurement problems

| | |
|-----------------------|---|
| Record number | |
| 32000-35000 | Large difference between all directions in the period about are found |
| 5000-12000 | direction at 90m larger than at 70m |
| 5000-12000 | direction at 70m smaller than at 50m |
| discretisation period | calibration problem |

Another problematic behaviour is seen for three of the wind vanes. If differences between the measured angles are calculated, one expects to find a constant offset, or a constant behaviour for identical circumstances. But what really is found, are non-distinct shifting angles for the wind direction, shown in Figure 19. These shifts are about one to four degrees and do not depend on wind speed, date or wind direction (although the effect only occurs for certain azimuth angles). It is seen that only the wind vane at 30 m shows a consistent behaviour for all configurations.

This does also manifest, if wind vane direction measurements are compared to sonic direction measurements (see ultrasonic data).

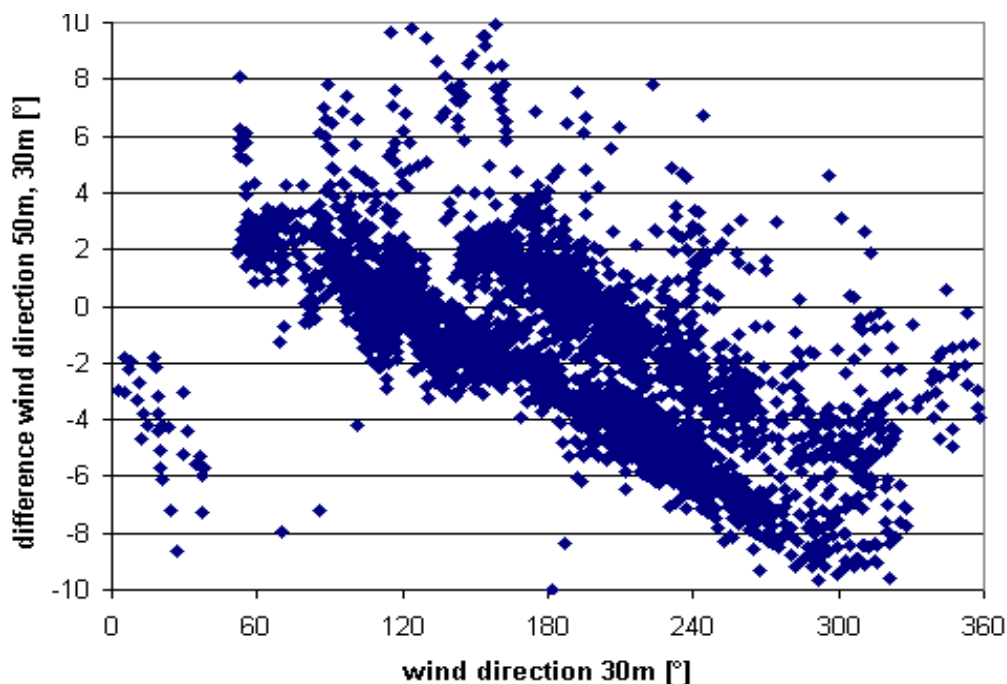


Figure 19: Difference of the wind direction measured by the wind vanes at 30m and 50m versus the wind direction measured by the wind vane at 30m.

The wind direction measurement at 30m height seems to be most reliable. The measurements at 50m and 70m can not be used at present, the measurement at 90m seems to have a calibration problem at the beginning.

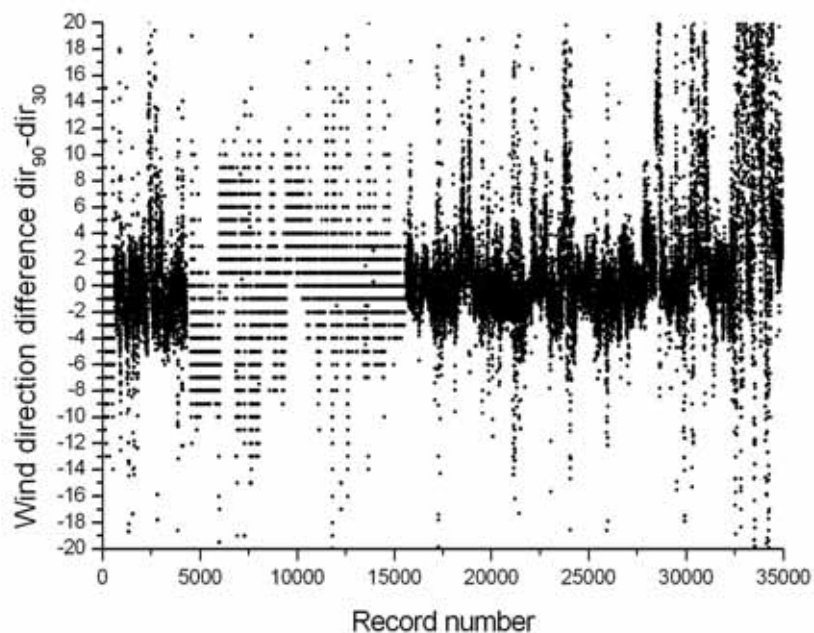


Figure 20: Wind direction difference of wind vane measurements at 90m and 30m versus record number

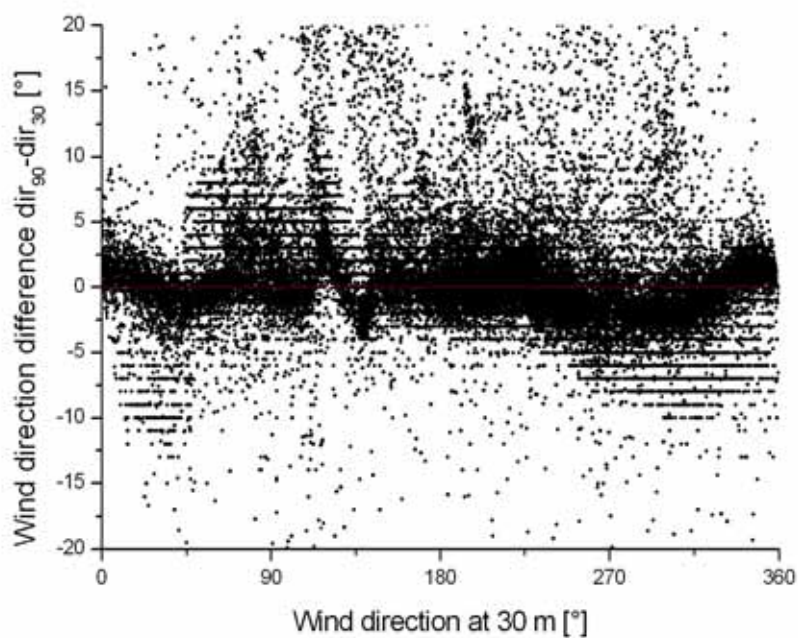


Figure 21: Wind direction difference of wind vane measurements at 90m and 30m versus the wind direction at 30m.

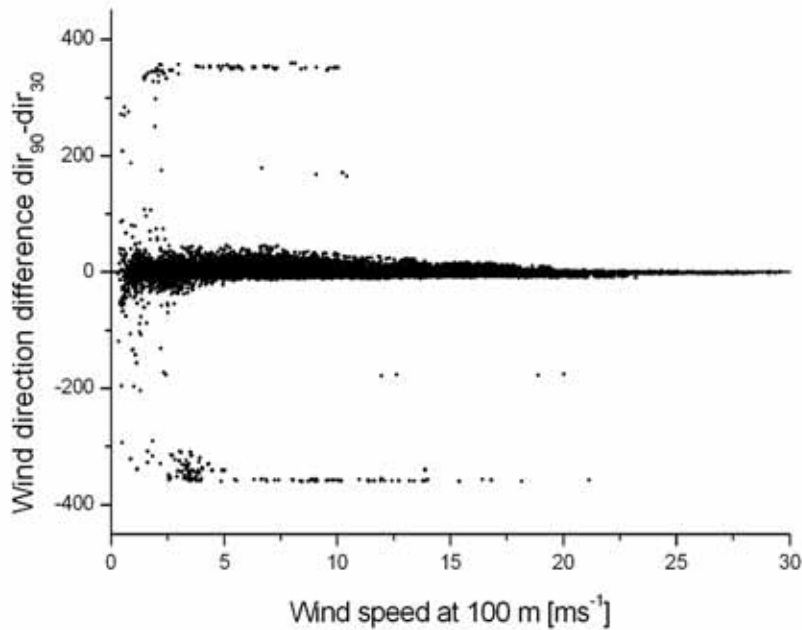


Figure 22: Wind direction difference of wind vane measurements at 90m and 30m versus wind speed at 100m

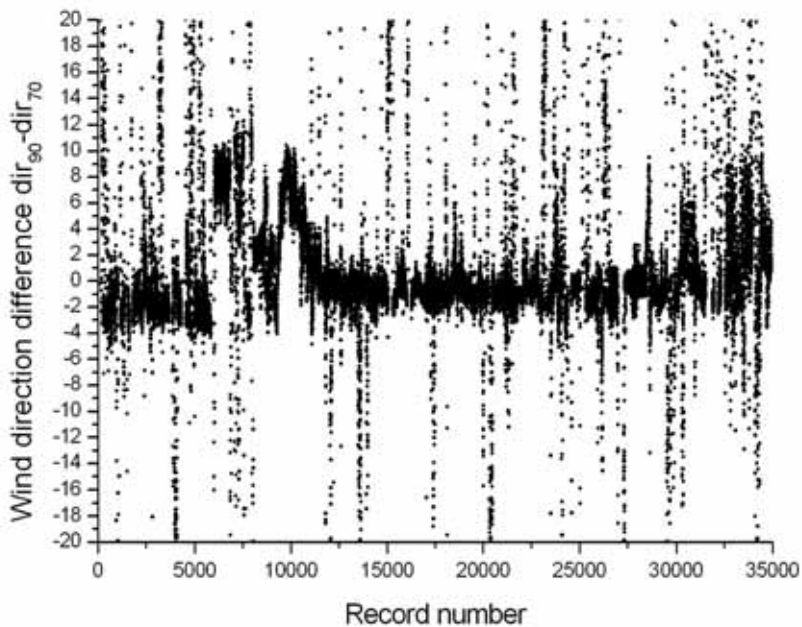


Figure 23: Wind direction difference of wind vane measurements at 90m and 70m versus record number

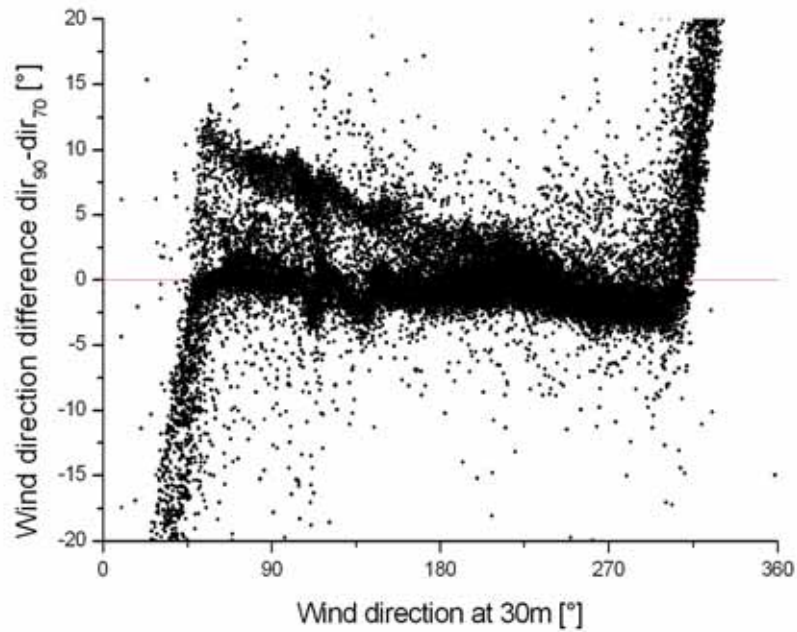


Figure 24: Wind direction difference of wind vane measurements at 90m and 70m versus wind direction at 30m

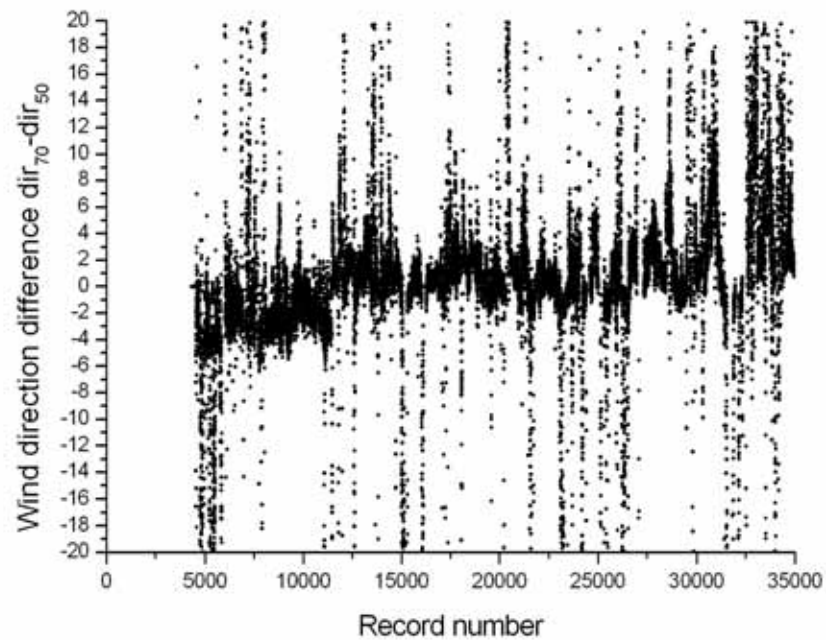


Figure 25: Wind direction difference of wind vane measurements at 70m and 50m versus record number

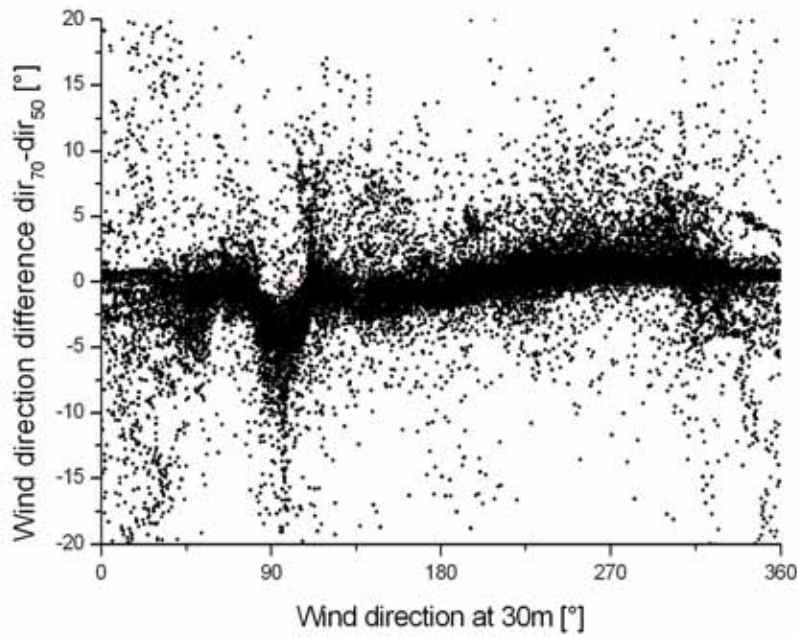


Figure 26: Wind direction difference of wind vane measurements at 70m and 50m versus wind direction at 30m

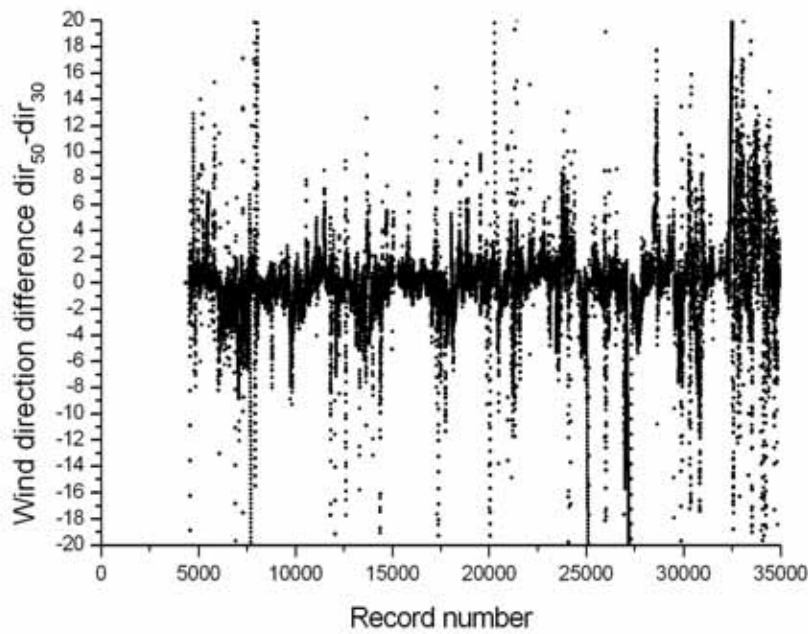


Figure 27: Wind direction difference of wind vane measurements at 50m and 30m versus record number

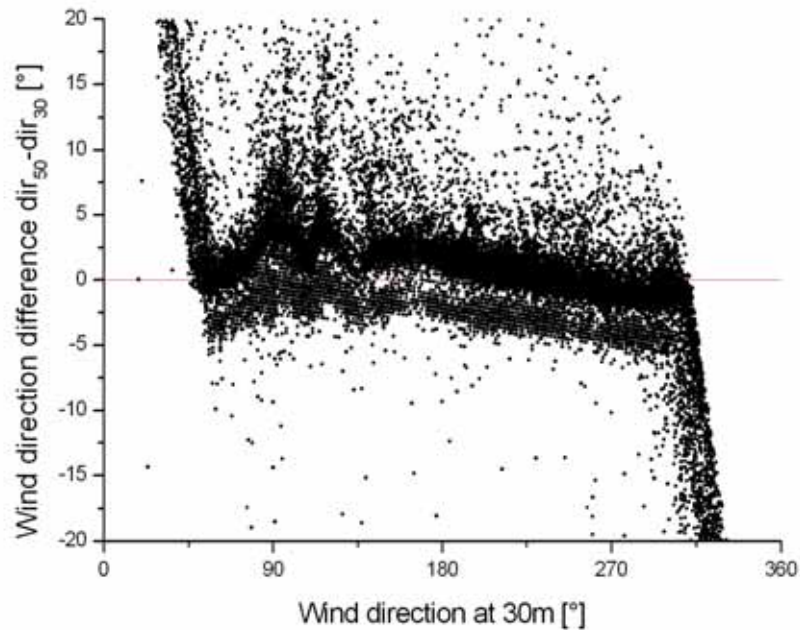


Figure 28: Wind direction difference of wind vane measurements at 50m and 30m versus wind direction at 30m

2.5 Temperature differences

Due to the still ongoing calibration, which the DEWI reports, the temperature measurements can at present not be used to derive temperature differences. It was for example found that although the temperature at 50m is as expected on average lower than the temperature at 40m, the temperature at 70 is on average higher than at 50m.

The temperature also shows a period (up to about record number 16000), where discretisation was larger than usual. Larger differences for the heights of 70m and 50m were found for end of April.

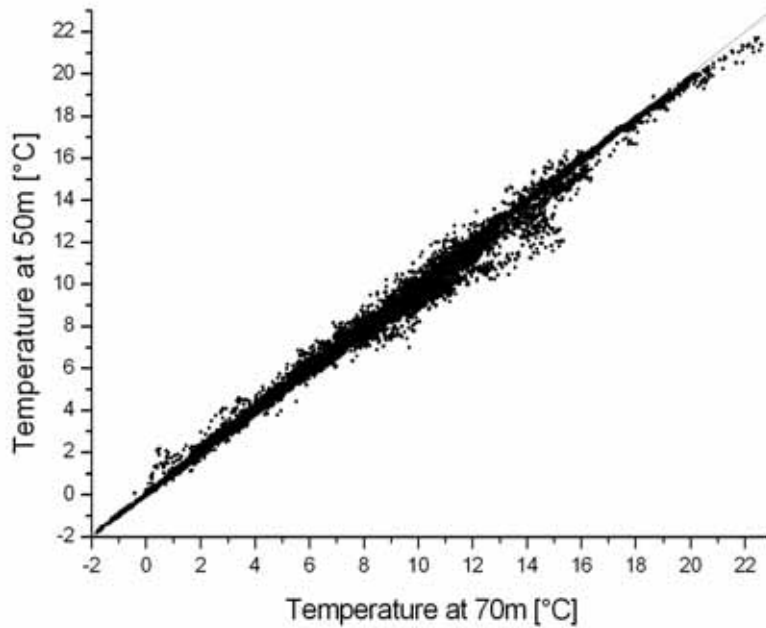


Figure 29: Scatter plot of temperatures at 50m and at 70m height

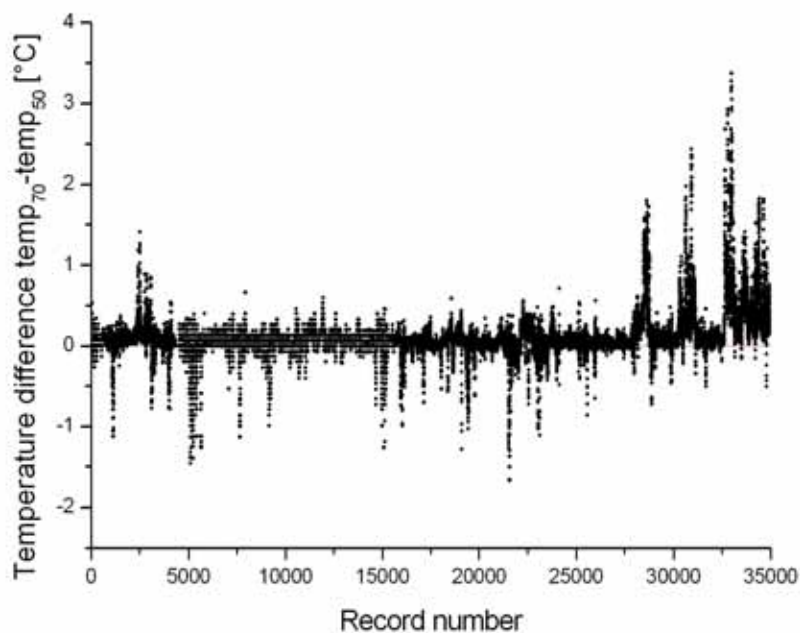


Figure 30: Temperature difference of measurements at 90m and 30m height versus record number

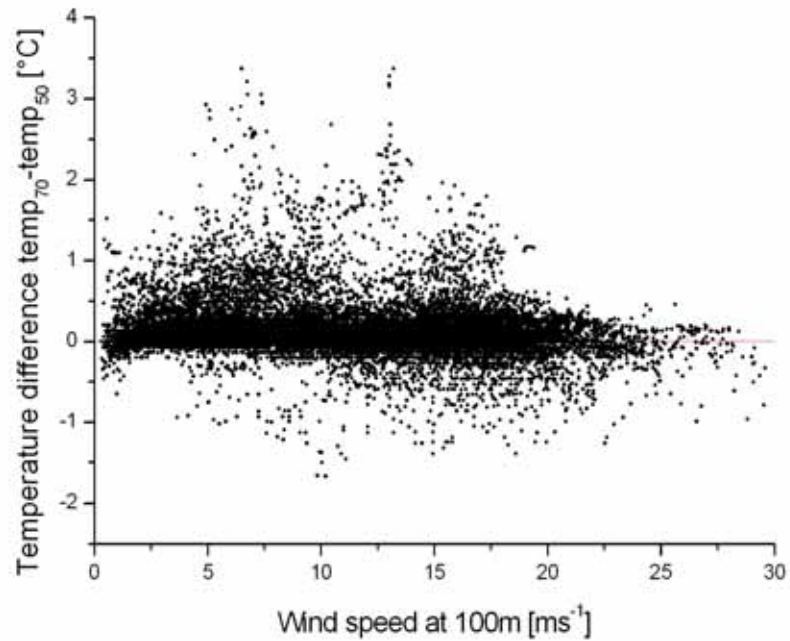


Figure 31: Temperature difference of measurements at 70m and 50m height versus wind speed at 100m

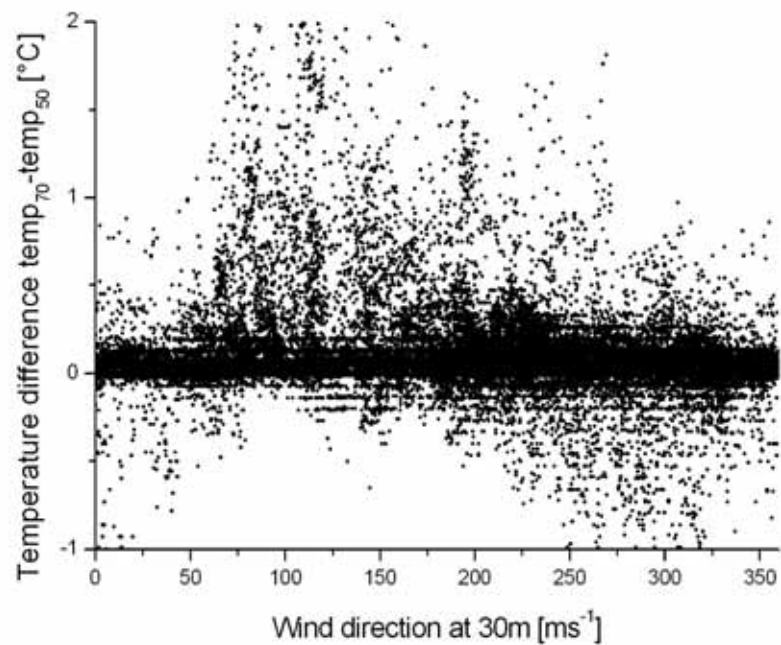


Figure 32: Temperature difference of measurements at 70m and 50m height versus wind direction at 30m

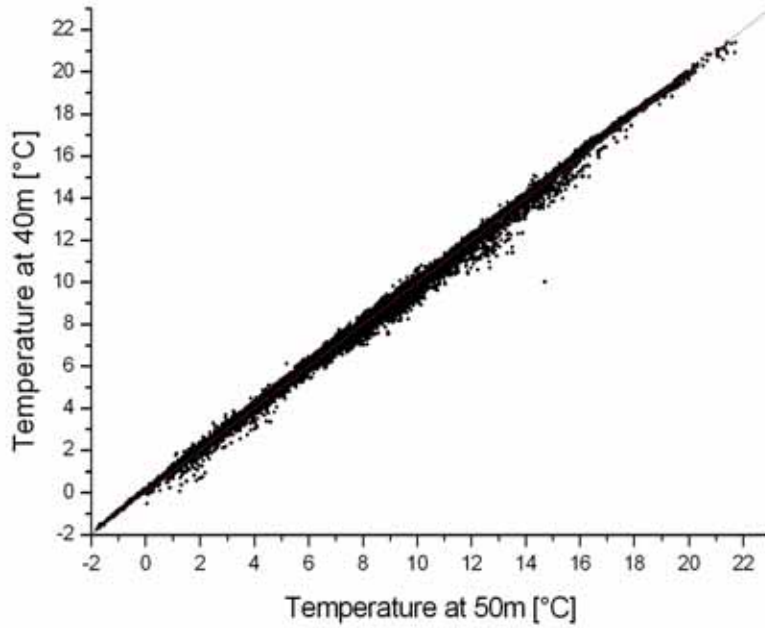


Figure 33: Scatter plot of temperatures at 40m and at 50m height

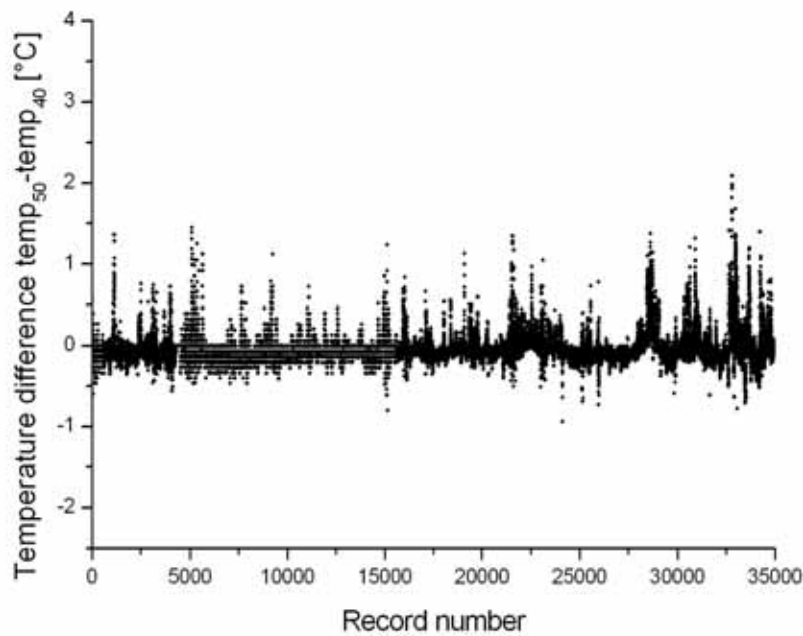


Figure 34: Temperature difference of measurements at 40m and 50m height versus record number

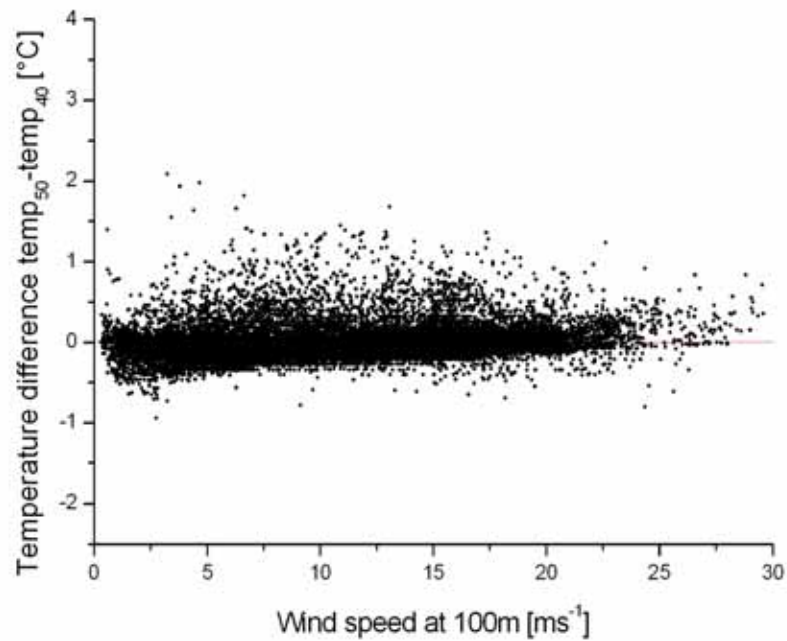


Figure 35: Temperature difference of measurements at 50m and 40m height versus wind speed at 100m

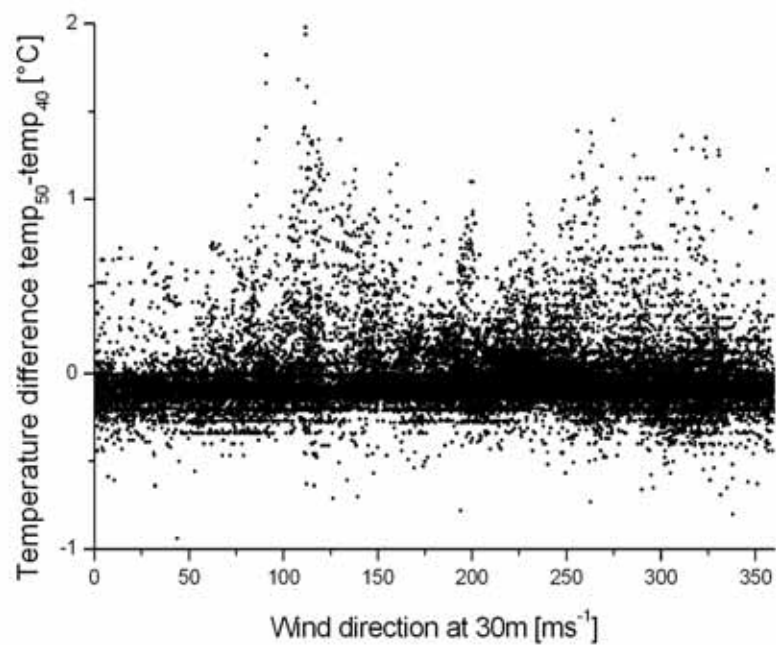


Figure 36: Temperature difference of measurements at 50m and 40m height versus wind direction at 30m

2.6 Humidity Differences

The measured humidity is higher at a lower height (see Figure 37), the difference decreases with increasing wind speed (see Figure 39). A visible trend is the growing difference with time (see Figure 38). Seasonal differences might be the reason for this. The humidity data is discretised differently up to about record number 16000.

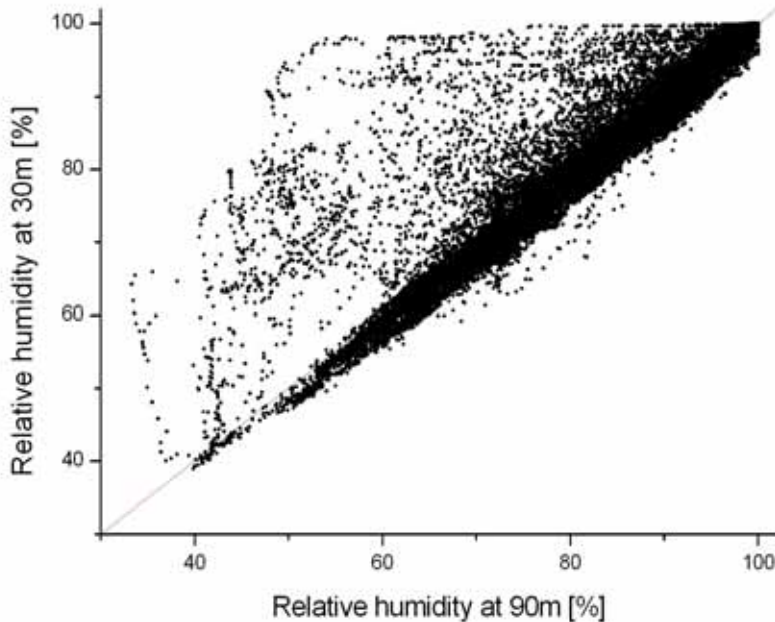


Figure 37: Relative humidity at 30m versus relative humidity at 90m.

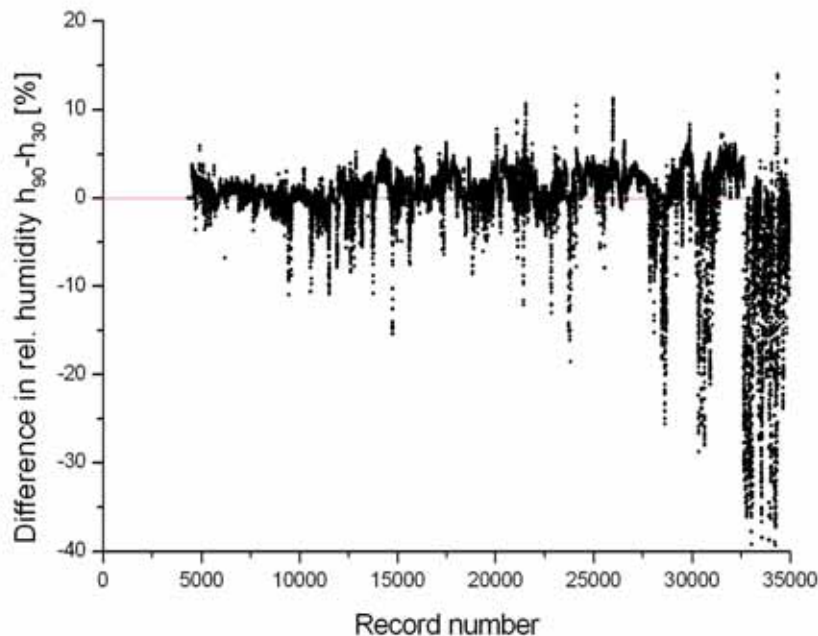


Figure 38: Difference in relative humidity (heights 90, 30m) versus record number.

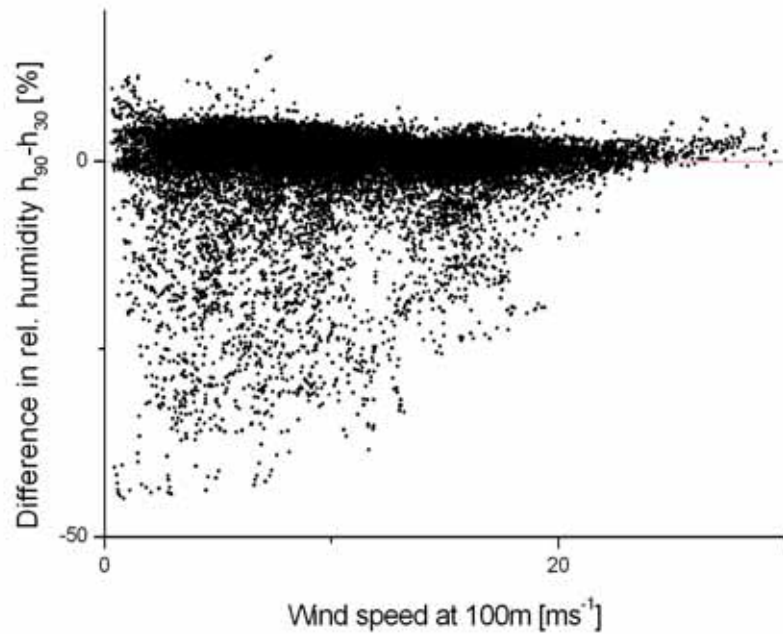


Figure 39: Difference in relative humidity (heights 90, 30m) versus wind speed at 100m.

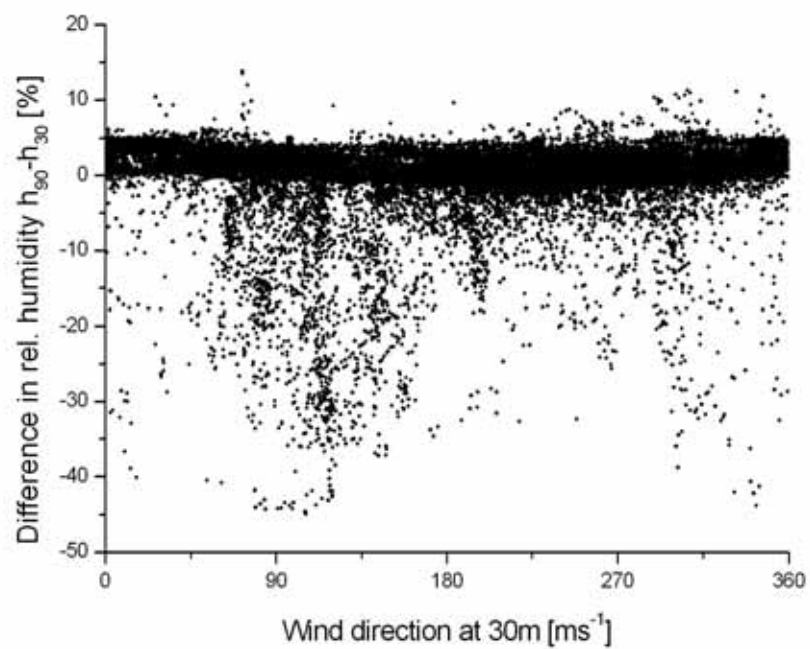


Figure 40: Difference in relative humidity (heights 90, 30m) versus wind direction at 30m

3 Fast Data

3.1 Quality Control of the Sonic Wind Speed

Comparison of the cup and the sonic data shows good concordance, as can be seen in Figure 41. The ratio of cup and sonic being for most wind directions nearly one. Two strong deviations around 125 and 310 degrees indicate the influence of the measurement mast. For 125 degrees, the wind comes from the cup side of the mast, making the cups measure a much larger relative wind speed than the shadowed sonics. For 310 degrees the wind comes from nearly the opposite direction (it is not exactly 180 degrees, because the two cantilever arms are not exactly 180 degrees opposed), giving the cups the shadow position and consequently the sonics a relatively higher wind speed to measure. This behaviour confirms the reliability of the sonic wind speed measurements.

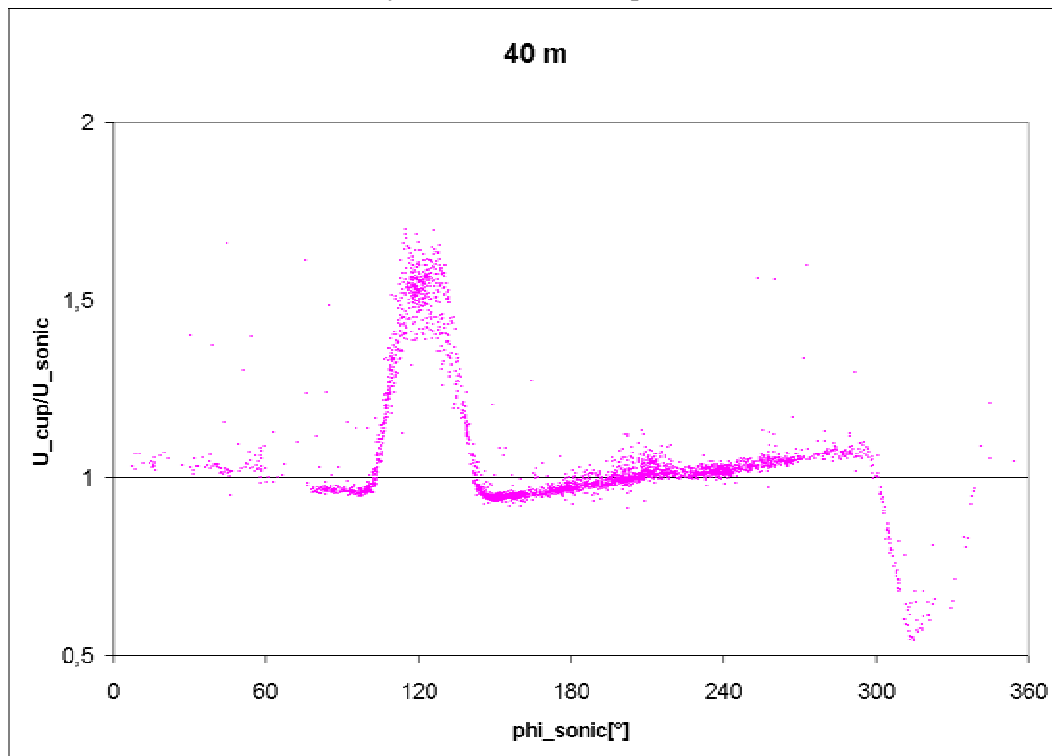


Figure 41: *Ration of cup and sonic wind speed versus wind direction.*

3.2 Quality Control of the Sonic Wind Direction

As shown in section 2.4, only the wind vane at 30 m height can be used as a reference. Comparisons between these data and the sonic data show a constant shift in the sonic measurements. This indicates a misalignment from north direction, which is correctable, if the right offset is known. The shifting angles from north direction for the three sonics are listed in Table 5. The values are in agreement with those found by the operator of the platform (personal communication: T. Neumann, DEWI, 2004).

Table 5: Deviation of the installed sonics from north alignment, value indicates position of true north alignment in sonic coordinate system.

| Sonic | Shift from north alignment |
|-------|----------------------------|
| #255 | 54 |
| #273 | 277 |
| #274 | 29 |

If compared with the reliable wind vane at 30 m, the sonic shows a rather constant shifting angle between 51 and 53 degrees (measurements on the instrument position show a shifting angle of 54°), see Figure 42. The influence of the mast can be clearly seen for wind directions around 125 degrees. For 310 degrees, not enough data was collected to make a reliable statement.

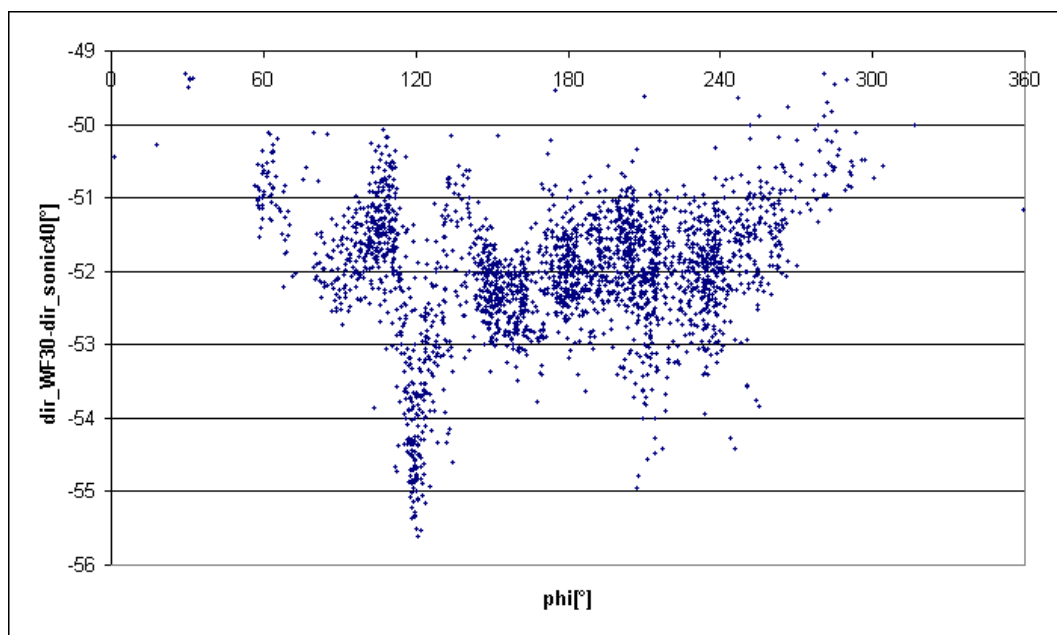


Figure 42: Difference of wind direction measured by the wind vane at 30m and the sonic at 40m versus the wind direction at 30m.

3.3 Peaks

Standard deviation, mean, minimum and maximum values of 10 minute of measurement periods are investigated.

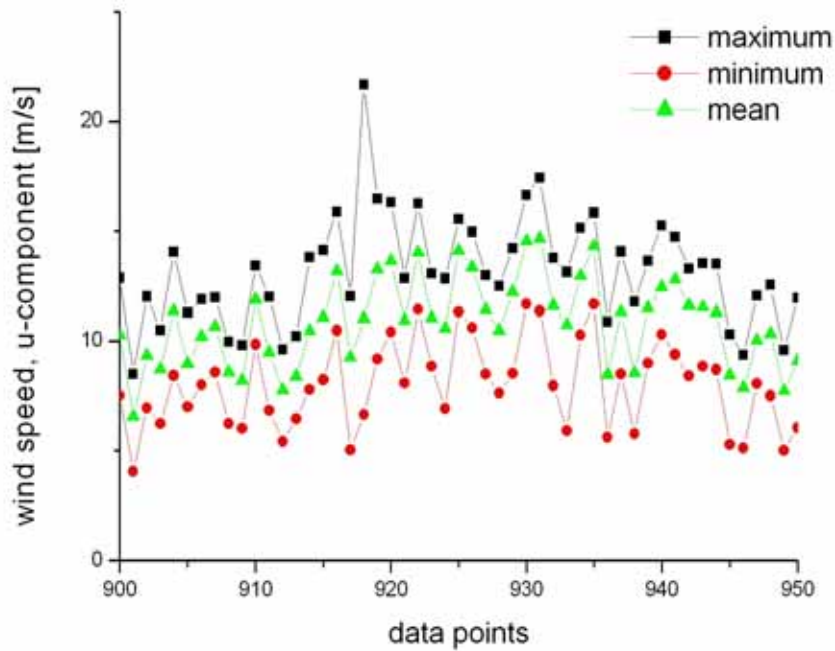


Figure 43: Wind speed minima, maxima and mean values versus time, for an 500 min interval in November 2003

Few peaks are found throughout the month (Figure 43 shows an interval featuring such a peak). They originate from false measurements, singular events, where measurements in a very small time interval (a few seconds at maximum) strongly deviate from the rest of the measurement (the measurement interval corresponding to the peak in Figure 43 can be seen in Figure 44). These events are seldom (approx. 5 times a month) and do not influence flux measurements in a noticeable way. For further investigations, these events are taken out of consideration though.

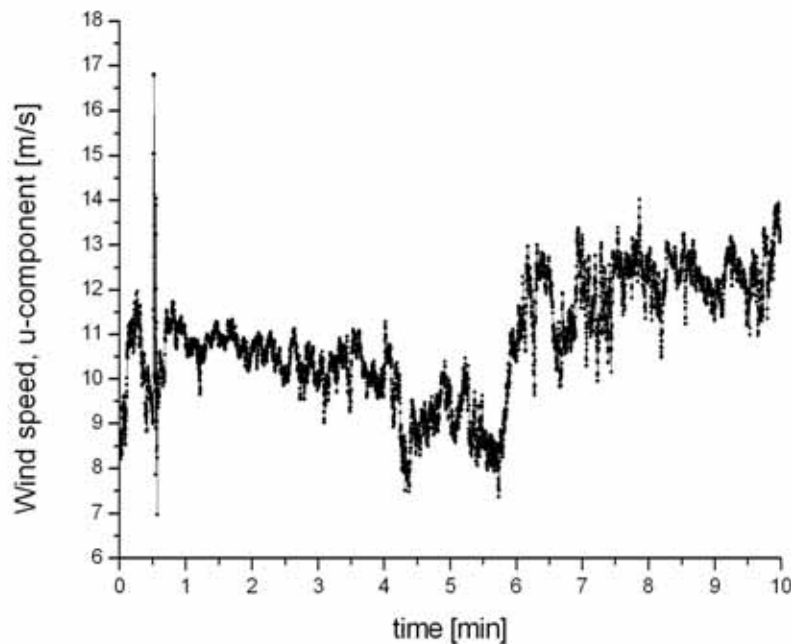


Figure 44: 10 min measuring interval: wind speed versus time.

4 Conclusion

4.1 Meteorological Data

The wind speed measurements with the cup anemometers seem to be generally reliable.

For the wind direction only the measurements of the wind vane at 30m height was found to be consistent and reliable. The other vanes can not be used, because of the non distinct shifting angles and the wrong interpolation.

Because of calibration problems, the temperature measurements can not be used for temperature difference measurements at present.

For the humidity measurements no problems have been found.

4.2 Ultrasonic Data

The quality control of the ultrasonic data by comparison with the wind vanes and the cup anemometers show that the installed ultrasonic anemometer at 40m height delivers reliable measurements. The shifting angles from north alignment have to be accounted for. Additionally, wind directions leading to shadowing from the measurement mast have to be treated carefully.

The number of peaks is very small, about five of 4320 (for November 2003) 10 minute averages are found to be deviating. Therefore the influence of these peaks in flux measurements is very small and can be neglected.

References

T. Neumann: *Personal Communication*, 2004

S. Tautz: *Thermal Effects in the Atmospheric Boundary Layer above the North Sea*,
Diploma Thesis, Oldenburg, 2004