

## Cup Anemometry in Wind Engineering, Struggle for Improvement Schalensternanemometrie in der Windenergienutzung, wo liegt die Wahrheit?

A. Albers, H. Klug, D. Westermann, DEWI

### 1. Einleitung

Kürzlich wurden im Rahmen von Forschungsaktivitäten unter Beteiligung des DEWI große Abweichungen in Windgeschwindigkeitsmessungen von Schalensternanemometern unterschiedlicher Typen im Freifeld festgestellt [1]. Im Gegensatz zu bis dato in der Windenergieszene weit verbreiteten Vorstellungen traten Abweichungen in der Größenordnung um 2 % selbst in flacher Geländestruktur und großer Höhe über dem Boden auf, obwohl die verschiedenen Anemometertypen vor den Freifeldversuchen einheitlich im Windkanal nach neuesten Standards kalibriert wurden [2], [3]. Dieses Ergebnis ist mit erheblichen Problemen für die Windenergienutzung behaftet:

- In den Standards und Empfehlungen für die Messung der Leistungskennlinien von Windenergieanlagen (WEA) [4], [5], [6] gibt es keine Vorgabe des Anemometertyps. Somit sind Leistungskennlinienmessungen, die mit verschiedenen Anemometertypen durchgeführt wurden, in der Regel nicht direkt vergleichbar. Die

### 1. Introduction

*Recent comparisons of different types of cup anemometers in the open field have uncovered significant deviations between wind speed measurements in the order of 2 % [1]. Contrary to all expectations, the deviations in the measurements of commonly used anemometers have been found to be present even in flat terrain, and when the anemometers have been uniformly calibrated in a wind tunnel according to the latest standards [2], [3]. This basic finding has severe consequences for the whole wind energy industry:*

- *The existing standards [4], [5], [6] on wind turbine power performance tests have no special requirements on the type or class of cup anemometer to be used. Thus, the power performance of wind turbines cannot be compared unless it is measured using the same type of anemometer. The differences in the cup anemometer measurements lead to differences in the predicted*

Auswirkungen des Anemometertyps auf die gemessenen WEA-Leistungskennlinien betragen ca. 3-7 % bzgl. des Jahresenergieertrages. Messungen bei WEA unter Verwendung des in Dänemark üblichen Schalensternanemometers vom Typ Risø P2445b führen z. B. zu optimistischeren Leistungskennlinien als Messungen, die mit dem in Deutschland weit verbreiteten Schalensternanemometer von Typ Thies 4.3303.22.X durchgeführt werden.

- Die Abweichungen zwischen den Anemometertypen im Freifeld bedingen eine erhebliche, früher kaum beachtete Unsicherheitsquelle für standortspezifische Energieertragsprognosen und erhöhen somit das finanzielle Risiko von Windparkprojekten. Unglücklicherweise ist diese Unsicherheitskomponente an Schwachwindstandorten, wo die finanzielle Situation ohnehin oft kritisch ist, besonders groß. Die Verwendung nach neuesten Standards gemessener WEA-Leistungskennlinien für Energieertragsprognosen ist problematisch, sofern der bei der Leistungskennlinienmessung verwendete Anemometertyp nicht mit dem für die Ermittlung des standortspezifischen Energieertrags verwendeten Anemometertyp übereinstimmt.

Für die Lösung des Problems wurden bisher im Wesentlichen folgende Lösungen verfolgt:

- Verwendung eines einheitlichen Schalensternanemometers im Bereich der Windenergienutzung. Nach ersten Diskussionen innerhalb von Expertenteams besteht kaum Hoffnung auf diese Lösung in naher Zukunft.
- Entwicklung einer geeigneten Klassifizierung von Schalensternanemometern. Diese Klassifizierung sollte sicherstellen, dass Anemometer innerhalb einer Klasse im Freifeld nur geringfügige Abweichungen bezüglich der Windgeschwindigkeitsmessung aufweisen.
- Entwicklung einer Korrektur, die es erlaubt, Messwerte von Anemometern einer Klasse auf Messwerte von Anemometern einer anderen Klasse umzurechnen.

## **2. Erste Versuche einer Klassifizierung von Schalensternanemometern**

### **2.1 Klassifizierung entsprechend dem Schräganströmverhalten**

Die mit der Weiterentwicklung von Standards bezüglich WEA-Leistungskennlinien betrauten Expertenteams (IEC, MEASNET, Technische Richtlinien) favorisieren die Entwicklung einer Klassifizierung von Schalensternanemometern. Erste Versuche haben sich dabei auf eine Klassifizierung entsprechend des Schräganströmverhaltens der Schalensternanemometer konzentriert. Einige Schalensternanemometer tendieren zur Messung nur der

*energy production of wind turbines in the order of 3-7%. Power curve measurements as performed with the Risø P2445b anemometer, which is in common use by the Danish wind industry, indicate a better power performance than measurements performed with a Thies 4.3303.22.X anemometer, which is often applied in Germany.*

- *The deviations between measurements with different types of cup anemometers add a severe systematic uncertainty component to site assessment studies and thus to the financial feasibility of wind farm projects. This uncertainty component increases at low wind sites, where the financial situation is often critical anyway. Measured power curves are useless for the prediction of the site specific energy production, when the type of anemometer in use for the power curve determination does not match the type of anemometer applied for the site assessment.*

*Since the effect has been identified, intensive discussions are going on within the wind energy scene about solutions for the problem. Basically, the following ideas have been thought of:*

- *Applying a unified cup anemometer for all wind energy related measurements. First discussions between specialists give only poor hope of the feasibility of this solution in the near future.*
- *Development of a proper classification for cup anemometers. The classification must ensure that anemometers belonging to a certain class show only insignificant deviations in open field measurements.*
- *Development of a method for correcting of wind measurements from one class of anemometers to the other. This should allow to compare power curves measured with different anemometer types and to match measured power curves with site specific wind measurements for wind potential predictions.*

## **2. First Attempts for a Classification of Cup Anemometers**

### **2.1 Classification according to the Response on Vertically Inclined Air Flow**

*The expert groups engaged in the refinement of measurement standards for wind turbine power performance testing (IEC, MEASNET, German Technical Guidelines) support the development of a classification scheme for cup anemometers. The first attempts concentrated*

Horizontalkomponente der Windgeschwindigkeit, während andere tendenziell eher den Gesamtbetrag des Windgeschwindigkeitsvektors, inklusive der momentanen vertikalen Windgeschwindigkeitskomponente messen. Fluktuationen der vertikalen Windgeschwindigkeitskomponente aufgrund der natürlichen Turbulenz können im Freifeld prinzipiell zu Abweichungen der Schalensternanemometermessungen führen. Bei der Windkanalkalibration tritt dieser Effekt aufgrund der stationären Strömung im Windkanal nicht auf. In der Tat haben jene Anemometertypen, welche eher zur Messung nur der momentanen horizontalen Windgeschwindigkeitskomponente tendieren, in den in [1] beschriebenen Freifeldvergleichen zur Messung kleinerer Windgeschwindigkeiten geführt als solche Anemometer, die tendenziell eher den Gesamtbetrag des Windgeschwindigkeitsvektors messen. Somit war es naheliegend, die Abweichungen der Anemometer im Freifeld mit dem unterschiedlichen Schräganströmverhalten der Anemometer zu assoziieren.

Mittlerweile liegen neue Erkenntnisse vor, die einen starken Zusammenhang zwischen dem Schräganströmverhalten der Schalensternanemometer und den Abweichungen der Anemometer im Freifeld widerlegen. Im Rahmen der Weiterentwicklung der Technischen Richtlinien für Windenergieanlagen [6] wurde ein Klassifizierungsschema für Schalensternanemometer auf Basis einer Simulation der Auswirkung des Schräganströmverhaltens der Schalensternanemometer auf die Windgeschwindigkeitsmessung in turbulenter Strömung entwickelt. Hierfür wurde zunächst das Schräganströmverhalten verschiedener Schalensternanemometer im Windkanal unter statischen Bedingungen untersucht (Abb. 1). Das Antwortverhalten der Schalensternanemometer als Funktion des Schräganströmwinkels wurde mit Hilfe in turbulenter Strömung realistischer Verteilungen des Schräganströmwinkels gewichtet. Das Ergebnis ist das Verhältnis der simulierten Messergebnisse des Schalensternanemometer und einem Anemometer das zu jedem Zeitpunkt den Gesamtbetrag des Windgeschwindigkeitsvektors, inklusive der Vertikal-komponente mißt (Abb. 2). Nach dieser Simulation wurde erwartet, dass das Schalensternanemometer vom Typ Metone 010C-1, welches im Windkanal ein unsensibles Schräganströmverhalten gezeigt hat (Abb. 1), im Freifeld eine geringfügig höheres Messergebnis aufweist als das Thies 4.33.03.22.X Anemometer (Abb. 2). Tatsächlich hat das Metone 010C-1 im Freifeldvergleich in flachem Gelände eine erheblich geringere Windgeschwindigkeit gemessen als das Thies 4.33.03.22.X Anemometer (Abb. 3). Im Freifeldvergleich liegt das Metone 010C-1 sehr dicht bei den beiden Schalensternanemometern Vector

A100 und Risø P2445, die beide ein völlig anderes Schräganströmverhalten als das Metone 010C-1 aufweisen. Eine Klassifizierung von Schalensternanemometern nur anhand des im Windkanal gemessenen, stationären Schräganströmverhaltens erscheint daher nicht geeignet, um dem Problem unterschiedlicher Messergebnisse in turbulenter Strömung gerecht zu werden.

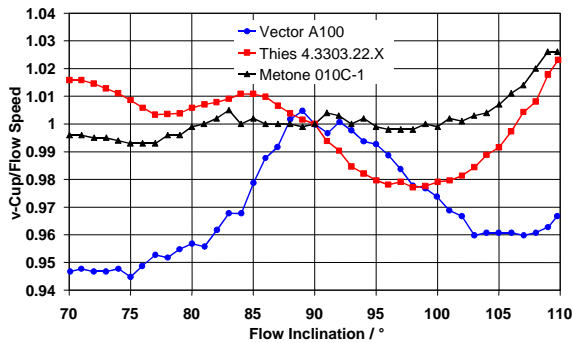


Abb.1: Einfluss der vertikalen Schräganströmung auf verschiedene Schalensternanemometer im Windkanal unter statischen Bedingungen. Ergebnis der Windkanaluntersuchung ist das Verhältnis der Schalensternanemometermessung und der tatsächlichen Windkanalströmung als Funktion des Anströmwinkels.

Fig. 1: Influence of vertically inclined air flow on different cup anemometers as measured in a wind tunnel under static conditions. The ratio of the flow speed and the cup anemometer readings are shown as a function of the flow inclination.

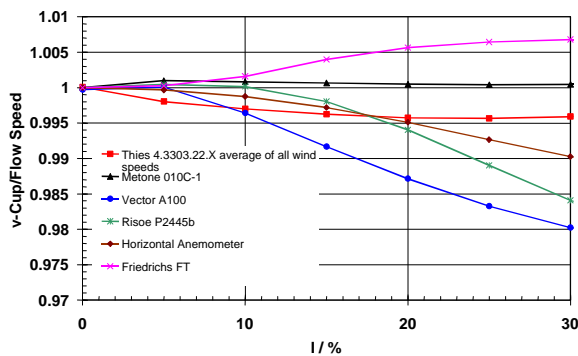


Abb. 2: Simulation der Messergebnisse verschiedener Schalensternanemometer in flachem Gelände auf Basis des Schräganströmverhaltens. Ergebnis ist das Verhältnis der Anemometermessung und des Gesamtbetrages des Windgeschwindigkeitsmessung (inklusive Vertikalkomponente) als Funktion der Turbulenzintensität. "Horizontal Anemometer" repräsentiert ein virtuelles Anemometer, das die Horizontalkomponente des Windgeschwindigkeitsvektors mißt.

Fig. 2: Simulation of cup anemometer readings in turbulent air flow in flat terrain under consideration of the cup anemometers' sensitivity on vertically inclined air flow. The ratio of the flow speed (including instantaneous vertical component) and the cup anemometer readings are shown as a function of the turbulence intensity. The ratio would be unity for an anemometer which at each instant measures the total flow speed. "Horizontal Anemometer" represents a virtual anemometer which measures at each instant only the horizontal flow component.

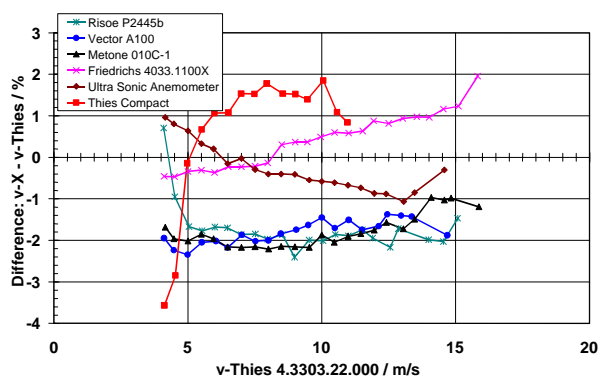


Abb. 3: Freifeldvergleich verschiedener Schalensternanemometer mit dem Thies 4.3303.22.000 Anemometer in flachem Gelände in 30 m Höhe über Grund. Die Turbulenzintensität liegt bei ca. 12 %. Das ebenfalls getestete Ultrashallanemometer ist vom Typ Gill (Solent) Windmaster. Das Thies Compact Schalensternanemometer wurde in 8 m Höhe über Grund getestet.

Fig. 3: Difference in wind speed measurements of various cup anemometers compared to the Thies 4.3303.22.000 cup anemometer at 30 m above ground in flat terrain. The turbulence intensity is about 12 %. The tested ultra sonic anemometer is of type Gill (Solent) Windmaster. The Thies Compact series anemometer has been tested 8 m above ground.

## 2.2 Klassifizierung anhand der Formgebung

Bei den bislang vom DEWI durchgeführten Freifeldvergleichen von Schalensternanemometern haben sich zwei Anemometergruppen herauskristallisiert. Die Anemometer Risø P2445b, Vector A100 und Metone 010C-1 messen tendenziell eine kleinere Windgeschwindigkeit als Anemometer der Typen Thies 4.3303.22.X, Friedrichs 4033.1100X und Thies Compact (Abb. 3). Da die Anemometer der erst genannten Gruppe konisch geformte Schalen und alle Anemometer der zweiten Gruppe halbkugelförmige Schalen haben, lag der Verdacht nahe, dass der Unterschied in der grundsätzlichen Formgebung der Schalen für die Abweichungen der Anemometer im Freifeld maßgebend sei. Eine Klassifizierung der Anemometer wäre gegebenenfalls einfach anhand der Schalenform möglich. Um diese Vermutung zu überprüfen, wurden die halbkugelförmigen Schalen eines Thies 4.3303.22.X Anemometers gegen konische Schalen, mit sonst identischen Eigenschaften ersetzt. Das Anemometer mit den konischen Schalen wurde im Freifeld mit dem Serienanemometer, mit abgesehen von der Schalenform gleichen Eigenschaften, verglichen. Im Gegensatz zu den anderen getesteten Anemometern mit konischen Schalen tendiert das Thies-Modell mit den konischen Schalen im Freifeld eher zu höheren Meßwerten als das Serienmodell vom Typ Thies 4.3303.22.X.

Eine Klassifizierung der Anemometer allein anhand der Schalenform ergibt demnach keinen Sinn. Wie bereits früher berichtet [1], erscheint nach den vorliegenden Ergebnissen auch eine Klassifizierung

on a classification mainly according to the sensitivity of the different cup anemometers on vertically inclined air flow. Some anemometers tend to measure only the horizontal flow component, while others tend to measure the complete wind speed vector, including the instantaneous vertical flow component. Fluctuations of the vertical flow component due to turbulence could thus in principle lead to deviations in wind speed measurements in the open field. In the wind tunnel, where the anemometers are calibrated, this effect is not present due to the absence of turbulence. Indeed such anemometers which have the tendency to measure only the instantaneous horizontal flow component or even less than that, have shown in the outdoor anemometer comparison reported in [1] a smaller wind speed than anemometers which are known to measure in tendency the full wind speed vector. Consequently, the property of anemometers to measure either rather the full wind speed vector or rather the horizontal flow component was believed to be a proper classification parameter for cup anemometers [1].

However, the latest research work clearly reveals a strong link between the anemometer's response to vertically inclined air flow and the observed deviations between measurements with the different cup anemometers in flat terrain. In the framework of improving the German Technical Guidelines for Wind Turbines [6] DEWI has tested a classification scheme for cup anemometers based on a simulation of the effect of the fluctuation of the vertical flow component in turbulent air flow. In a wind tunnel different cup anemometers have been investigated for their response to vertically inclined air flow under stationary conditions (Fig. 1). The response of each cup anemometer as a function of the flow inclination angle has been weighted with realistic distributions of the vertical flow inclination under turbulent air flow. The result is the ratio between the simulated anemometer measurement and an anemometer which would at each instant measure the total flow speed, inclusive the vertical flow component (Fig. 2). According to this simulation the Metone 010C-1 cup anemometer, which has shown in the wind tunnel a rather flat response on vertically inclined air flow (Fig. 1), was expected to measure slightly higher wind speed values in turbulent flow in flat terrain than the Thies 4.3303.22.X anemometer (Fig. 2). In contrast in the outdoor comparison in flat terrain the Metone 010C-1 anemometer has shown much smaller wind speed readings than the Thies 4.3303.22.X anemometer (Fig. 3). In fact the Metone 010C-1 was in the outdoor comparison very close to the Vector A100 and Risø

nach der Schalengröße oder dem Schalenstern-durchmesser nicht geeignet.

In einem weiteren Experiment wurden zwei Anemometer mit identischen Schalensternen aber unterschiedlichen Körpern im Freifeld verglichen. Hintergrund dieses Versuchs ist die Tatsache, dass die Anemometer, die zu kleineren Windgeschwindigkeitsmesswerten tendieren, einen langen, schlanken Körper haben (Risø P2445b, Vector A100, Metone 010C-1), während die Anemometer aus der anderen Gruppierung (Thies 4.3303.22.X, Friedrichs 4033.1100X, Thies Compact) relativ große Körper mit kurzem Schaft haben. Für das Experiment wurde der Schalenstern eines Anemometers vom Typ Thies 4.3303.22.X auf den Körper eines Metone 010C-1 Anemometers montiert. Dieses Anemometer wurde schließlich mit dem Thies 4.3303.22.X Standardmodell verglichen. Im Freifeld zeigte das aus dem Körper des Metone 010C-1 und dem Schalenstern des Thies 4.3303.22.X komponierte Anemometer geringfügig kleinere Windgeschwindigkeitsmesswerte als das Thies 4.3303.22.X Standardanemometer (Abb. 4). Die Abweichungen des Metone 010C-1 Standardmodells und des Thies 4.3303.22.X Standardanemometers unter gleichen Bedingungen im Freifeld sind jedoch erheblich größer (Abb. 4). Schlussfolglich erscheint auch eine Klassifizierung von Schalensternanemometern allein anhand der Geometrie des Anemometerkörpers wenig sinnvoll.

### 3. Korrektur von Schalensternanemometern

Um WEA-Leistungskennlinien, die mit verschiedenen Anemometertypen gemessen wurden, vergleichbar zu machen und um gemessene Leistungskurven an standortnahe Windmessungen mit dem Zwecke der Windpotentialermittlung zu adaptieren, ist eine Korrektur erforderlich, die die Umrechnung der Messwerte eines Anemometertyps auf die anderer Anemometertypen erlaubt. Die Bestimmung einer solchen Windgeschwindigkeitskorrektur setzt die Kenntnis voraus, welche standortspezifischen Strömungsparameter maßgeblich zu den Abweichungen in den Anemometermessungen beitragen.

Eine solcher Strömungsparameter ist die Turbulenzintensität: Die Anemometerabweichungen wachsen tendenziell mit der Turbulenzintensität an ([2], Abb. 5). Bei sehr schwacher Turbulenzintensität konvergierten die Abweichungen zwischen verschiedenen Schalensternanemometern an den meisten Untersuchungsstandorten gegen Null, was die Einheitlichkeit der Windkanalkalibrationen der Anemometer unterstreicht. An einigen Standorten wurden jedoch deutlich kleinere Abweichungen zwischen zwei bestimmten Anemometertypen gefunden, als an

P2445b, which both have a completely different response to vertically inclined air flow than the Metone 010C-1. Thus, a classification of cup anemometers according to the response to vertically inclined air flow as measured under stationary conditions in a wind tunnel turned out to be inappropriate for dealing with the deviations in wind speed measurements in turbulent air flow.

### 2.2 Classification according to the Shape of the Anemometer

The commercially available cup anemometers so far compared in outdoor measurements by DEWI roughly fall into two groups. The Risø P2445b, Vector A100 and Metone 010C-1 cup anemometers were found to measure substantially less wind speed than the Thies 4.3303.22.X, the Friedrichs 4033.1100X and the Thies Compact anemometer (Fig. 3). The first group of anemometers has conical cups while the second group of anemometers is equipped with semispherical cups. Thus, it seemed to be likely that the shape of the cups plays a key role in the explanation of the differences in the anemometer readings in turbulent air flow (see [1]). In order to verify this assumption, DEWI has exchanged the semispherical cups of a Thies 4.3303.22.X against conical cups (all other properties remained unchanged). The anemometer with the conical cups has been compared in open field measurement to the production model (Fig. 4). The Thies model with the conical cups tends to higher wind speeds than the one with semispherical cups contrary to the other types of anemometers with conical cups tested so far. Thus, a classification of cup anemometers taking into account only the

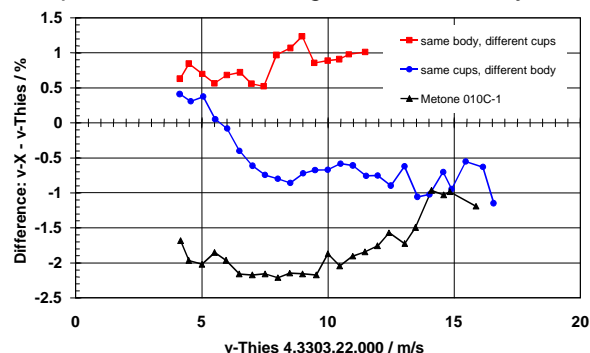


Abb. 4: Freifeldvergleich in flachem Gelände eines Thies 4.3303.22.000 Serienanemometers mit einem Thies 4.3303.22.000 Anemometer ausgerüstet mit konischen Schalen (Quadrate), einem Metone 010C-12 Anemometer ausgerüstet mit dem Schalenstern eines Thies 4.3303.22.000 Anemometers (Kreise) und einem Metone 010C-12 Serienmodell.

Fig. 4: Difference in wind speed measurements of a Thies 4.3303.22.000 anemometer equipped with conical cups (squares), a Metone 010C-12 anemometer equipped with cups from a Thies 4.3303.22.000 anemometer (circles) and a Metone 010C-12 production model all compared with the Thies 4.3303.22.000 production model in flat terrain.

anderen Standorten mit ähnlicher Turbulenzintensität (Abb. 6, [7]). Hierdurch wird indiziert, dass neben der Turbulenzintensität weitere Strömungsparameter für die Bestimmung einer Korrektur zwischen den Anemometermesswerten beachtet werden müssen.

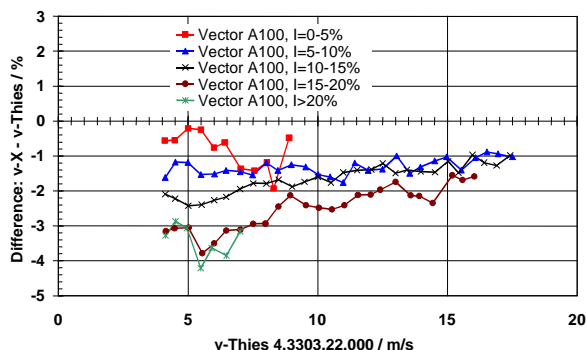


Abb. 5: Freifeldvergleich des Thies 4.3303.22.000 und des Vector A100 Schalensternanemometers in flachem Gelände klassiert nach der Turbulenzintensität.

Fig. 5: Difference in wind speed measurements between the Thies 4.3303.22.000 and the Vector A100 cup anemometer in flat terrain classified according to the turbulence intensity.

#### 4. Schlussfolgerungen

Kürzlich wurden große Abweichungen der Windgeschwindigkeitsmessungen verschiedener Schalensternanemometer in turbulenter Strömung aufgedeckt. Für die Windenergieindustrie folgt hieraus das Problem, dass Windmessungen mit verschiedenen Anemometertypen nicht miteinander vergleichbar sind. Lösungsansätze könnten in einer Klassierung der Schalensternanemometer und einer Korrektur zwischen den verschiedenen Schalensternanemometern bestehen. Die untersuchten Schalensternanemometer fallen in zwei Gruppen. Schalensternanemometer der Typen Risø P2445b, Vector A100 und Metone 010C-1 tendieren im Freifeld zu deutlich kleineren Windgeschwindigkeitsmesswerten als Schalensternanemometer der Typen Thies 4.3303.22.X, Friedrichs 4033.1100X und Thies Compact. Ein kalibriertes Ultraschallanemometer vom Typ Gill Windmaster stimmt bei hoher Windgeschwindigkeit tendenziell eher mit der ersten Gruppe und bei niedrigerer Windgeschwindigkeit eher mit der zweiten Gruppe überein. Bisher haben sich alle einfachen Klassifizierungsschemata für Schalensternanemometer z. B. anhand der Geometrie der Anemometer oder anhand des statischen Schräganströmungsverhaltens der Anemometer nicht als praktikabel erwiesen. Eine Korrektur der Windgeschwindigkeitsmesswerte zwischen den Anemometergruppen erfordert die Kenntnis, von welchen Strömungsparametern die Anemometerabweichungen abhängen. Die Windgeschwindigkeitskorrektur muss standortbezogen erfolgen. Welche standortspezifischen Strömungsparameter dabei neben der Turbulenzintensität berücksichtigt werden müssen ist noch unklar.

shape of the cups seems to make no sense. Also the size of the cups or the diameter of the rotating part seems to be no proper classification parameter, as has been pointed out earlier [1].

In a further experiment two anemometers with the same cups, but different shape of the body have been tested against each other. Background for this measurement is the fact that the anemometers which have so far found to measure the lower wind speed (Risø P2445b, Vector A100 and Metone 010C-1) all have long, relatively thin shafts, while all anemometers from the other group (Thies 4.3303.22.X, the Friedrichs 4033.1100X and the Thies Compact) have relatively big bodies and short shafts. In the open field tests the anemometer composed of the body of a Metone 010C-1 and the Cup of a Thies 4.3303.22.X anemometer has measured in tendency slightly smaller wind speeds than the anemometer Thies 4.3303.22.X production model (Fig. 4). However, the deviations in the measurements between the Metone 010C-1 production model and the Thies 4.3303.22.X production model was much larger (Fig. 4). Consequently, a classification of anemometers only according to the shape of the body seems to be inadequate.

#### 3. Correction for Cup Anemometer Measurements

In order to make wind turbine power curves measured with different cup anemometer types comparable, and in order to use a power curve for site assessments where the site specific wind measurements have been performed with a different type of anemometer than the power curve measurements, a correction of wind speed measurements from one type of anemometer to the other is indispensable. For the establishment of a proper wind speed correction, it has to be known which site specific flow parameters significantly contribute to the deviations in cup anemometer measurements.

A strong tendency of the deviations in wind speed measurements to increase with increasing turbulence intensity has been found ([2], Fig. 5). Indeed at most sites under investigation the deviations between different types of cup anemometers nearly disappeared in situations with very low turbulence intensity, which confirms the validity of the static wind tunnel calibrations. However, a few sites exist, where the deviations in the measurements between two certain types of anemometers appeared lower than at other sites, despite an ever higher turbulence intensity (Fig. 6, [7]). This indi-

Insgesamt hat sich das Problem der Abweichungen zwischen Messungen mit verschiedenen Schalensternanemometern als komplex erwiesen. Die vorliegenden Untersuchungen waren für die Identifizierung und Quantifizierung des Effektes geeignet. Sachgerechte Lösungen für die Problemstellung erfordern jedoch weiterführende systematische Forschungsaktivitäten, die sich auf die Aufdeckung der physikalischen Ursache des Effektes konzentrieren. Letzteres kann möglicherweise durch die Reproduktion des Einflusses von Turbulenz auf Schalensternanemometer im Windkanal durch die Anwendung von Turbulenzgeneratoren unter kontrollierbaren Laborbedingungen erzielt werden. Auch weitere Freifeldvergleiche von Schalensternanemometern bei starker Variation der Turbulenzparameter und Verwendung verschiedenartiger Referenzwindmessungen (z. B. mittels Ultraschallanemometer, LDA, Staurohrmessung, Propelleranemometer) können zu einem besseren Verständnis des Effektes beitragen.

## 5. Danksagung

Ein Teil der hier vorgestellten Arbeiten wurde von der Europäischen Kommission im Rahmen des Vertrages JOR3-CT98-0257 unterstützt.

## 6. Referenzen

- [1] A. Albers, H. Klug, D. Westermann: Outdoor Comparison of Cup Anemometers, Proceedings of DEWEK 2000, p. 107-111, DEWI
- [2] MEASNET: Measurement Procedure Cup Anemometer Calibrations, 1997
- [3] International Energy Agency: Expert Group Study on Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation, 11. Wind Speed Measurement and Use of Cup Anemometry, 1999
- [4] IEC 61400-12: Wind turbine generator system - Part 12: Wind turbines power performance testing, 1998
- [5] MEASNET: Power Performance Measurement Procedure, 1997

icates that further meteorological parameters may have to be considered for the determination of a wind speed correction between different types of cup anemometers.

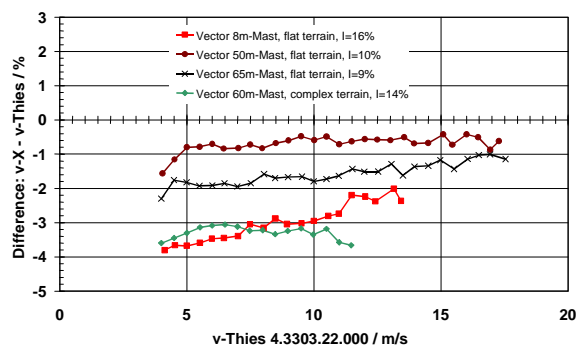


Abb. 6: Abweichungen zwischen dem Thies 4.3303.22.000 Anemometer und dem Vector A100 Anemometer an verschiedenen Standorten.

Fig. 6: Difference in wind speed measurements between the Thies 4.3303.22.000 and the Vector A100 cup anemometer at different sites.

## 4. Conclusions

Large deviations between measurements with cup anemometers of different types in turbulent air flow have recently been identified. The key problem resulting for the wind industry is that wind speed measurements performed with different anemometer types are not directly comparable. Solutions for this problem are believed to be found in a classification of cup anemometers or a correction among different cup anemometer types, while the focus must not necessarily lie on the determination of the true wind speed. The investigated cup anemometers fall roughly into two groups, namely the Risø P2445b, the Vector A100 and the Metone 010C-1 anemometers tend to measure less wind speed in turbulent flow than the Thies 4.3303.22.X, the Friedrichs 4033.1100X and the Thies Compact anemometers. Measurements with a calibrated ultra sonic anemometer of type Gill Windmaster were closer to the first group at high wind speeds and to the latter group at lower wind speeds. Up to now all simple classification schemes oriented on basic

- [6] Fördergesellschaft Windenergie e.V.: Technische Richtlinien für Windenergieanlagen, Teil 2, Bestimmung von Leistungskurve und standardisierten Energieerträgen, Revision 13, Stand 1.1.2000
- [7] T. Siebers, Enron Wind, private communication, 2000

*physical properties of the cup anemometers, like the shape of the cups, the shape of the body or the size of the cups, were not successful. Also a classification of the cup anemometers according to their static response to vertically inclined air flow as measured in wind tunnels turned out to be inappropriate. A correction between the different groups of cup anemometers requires the knowledge which meteorological parameters have to be considered for the determination of the correction. From the existing measurements it is clear that such a correction is site specific and must account for the turbulence intensity. However, some cases appeared where at different sites with comparable turbulence intensity different deviations between the same pair of cup anemometers occurred which indicates that other flow parameters than the turbulence intensity also play an important role.*

*The problem of large deviations between measurements with different cup anemometers turned out to be very complex. From the projects carried out so far the effect could be identified and quantified. Proper solutions for the problem can however be gained only by more systematic scientific work which concentrates on the understanding of the physical origin of the effect. Methods to achieve this goal may be found by applying turbulence generators in wind tunnels in order to reproduce the effects on cup anemometers present in turbulent flow under controlled laboratory conditions. Also further systematic field tests aiming to investigate the deviations in measurements between different cup anemometers under a large variety of flow and turbulence parameters and by using different kinds of reference anemometers (ultra sonic anemometers, LDA, Pitot tubes, propeller anemometer) may contribute to a better understanding of the effect.*

##### **5. Acknowledgement**

*Part of the presented work has been supported by the European Commission under contract number JOR3-CT98-0257.*