

Abhängigkeit der Turbulenzintensität über See von der Windgeschwindigkeit

The Dependence of Offshore Turbulence Intensity on Wind Speed

M. Türk, S. Emeis

Institut für Meteorologie und Klimaforschung – Atmosphärische Umweltforschung
FZ Karlsruhe GmbH, Kreuzackbahnstr. 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen
matthias.tuerk@imk.fzk.de



1. Einleitung

Im Gegensatz zu Landoberflächen ist die Rauigkeit der Meeresoberfläche nicht konstant, sondern hängt stark von der Windgeschwindigkeit ab. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit nimmt die Wellenhöhe und somit die Rauigkeitslänge der Oberfläche zu und die Turbulenzintensität steigt an (Csanady, 2001). Unter Verwendung eines relativ kleinen Datenkollektivs und unter Betrachtung nur der unteren 8 Meter über der Wasseroberfläche schlug Charnock (1955) folgende Beziehung vor:

$$z_0 = \frac{\alpha u_*^2}{g} \quad (1)$$

mit z_0 als Rauigkeitslänge der Oberfläche, u_* als Schubspannungsgeschwindigkeit und g der Erdbeschleunigung. Die empirische Konstante α ist heute als Charnock-Parameter bekannt. Nach Charnock hängt die Rauigkeitslänge somit nur von der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* ab. Für den Vergleich zwischen gemessenen und den nach IEC 61400-3 berechneten Werten wurde der in der Norm für Offshorebedingungen vorgeschlagene Wert von $\alpha = 0,011$ verwendet.

In den beiden IEC-Normen 61400-1 Ed. 3 („Wind Turbines - Part 1: Design Requirements“) und IEC 61400-3 Ed.1 („Wind Turbines - Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines“) wird die Turbulenzintensität nach Gleichung (2) bestimmt

$$ti = \frac{\sigma_u}{u} \quad (2)$$

mit ti als Turbulenzintensität, σ_u als Standardabweichung der Windgeschwindigkeit in einem bestimmten Zeitintervall (in diesem Fall 10 Minuten) und u der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit in diesem 10 Minuten Intervall.

Die Standardabweichung σ_u wird in der Norm berechnet als

$$\sigma_u = \frac{V_{hub}}{\ln(z_{hub} / z_0)} + 1,28 * (1,44m / s) * I_{15} \quad (3)$$

mit V_{hub} als Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe, z_{hub} als Nabenhöhe und I_{15} der mittlere Turbulenzintensität in Nabenhöhe bei einer Windgeschwindigkeit von

1. Introduction

In contrast to land surfaces the roughness of a sea surface is not constant but depends strongly on the wind speed because the wave height and consequently the surface roughness length increase with increasing wind speed (Csanady, 2001). Using a small dataset and looking only at the lowest 8 metres above the water surface Charnock (1955) proposed

where z_0 is the surface roughness length, u_ the friction velocity and g the acceleration of gravity. The empirical constant α is known as the Charnock parameter. So, according to Charnock z_0 depends only on the friction velocity u_* . For the comparison between measured values and values calculated according to IEC standard 61400-3 α was set to 0.011 as recommended in the standard for offshore conditions.*

In both IEC standards 61400-1 Ed. 3 (“Wind Turbines - Part 1: Design Requirements“) and 61400-3 Ed. 1 (“Wind Turbines - Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines“) the turbulence intensity is calculated according to eq. (2)

where ti is the turbulence intensity, σ_u the standard deviation of the horizontal wind speed (within 10 minutes in this case) and u is the average horizontal wind speed in this 10-minute interval.

The standard deviation σ_u is calculated in the standard from

where V_{hub} is the wind speed in hub height, z_{hub} is the height of the hub above ground and I_{15} is the average turbulence intensity in hub height at 15 m/s wind

15 m/s. Für die Bestimmung von z_0 im Nenner der Gleichung (3) muss noch folgende Gleichung iterativ gelöst werden:

$$z_0 = \frac{\alpha}{g} \left(\frac{\kappa V_{hub}}{\ln(z_{hub} / z_0)} \right) \quad (4)$$

speed. For the determination of z_0 in eq. (3) the following equation has to be solved iteratively:

2. Messplattform und Datensatz

Die seit September 2003 in der Deutschen Bucht arbeitende Forschungsplattform FINO1 bietet nunmehr die Möglichkeit, den in den Gleichungen (2) bis (4) beschriebenen Zusammenhang an Messdaten zu überprüfen. Hierzu werden die 10 min-Mittel der Windgeschwindigkeit und die longitudinale Varianz dieser Geschwindigkeit in dem jeweiligen 10 min-Intervall herangezogen. Die daraus bestimmte beobachtete Abhängigkeit der Turbulenzintensität wird mit den Aussagen der Gleichungen (2) bis (4) verglichen. Hansen und Larsen (2006) beschreiben eine Methode zum Detrending von nach Gleichung (2) bestimmten Turbulenzintensitäten und geben eine standortabhängige Reduktion der Turbulenzintensität von 6-8 Prozent durch das Detrendingverfahren an. Die Turbulenzdaten in der vorliegenden Untersuchung wurden nicht enttrentet, die Anwendung der von Hansen und Larsen (2006) beschriebenen Methode auf ausgewählte Zeitabschnitte der FINO1-Datenreihen ergaben Reduktionen, die sich im unteren Bereich oder sogar unterhalb der angegebenen Werte bewegen.

Für die vorliegende Untersuchung wurden knapp drei Jahre Daten (Januar 2004 bis November 2006) der FINO1 Offshore-Messplattform untersucht. FINO1 steht etwa 45 Kilometer nördlich von Borkum in der Deutschen Bucht und bietet bei den Windgeschwindigkeitsmessungen eine Höhengauflösung von 10 Metern in einer Messhöhe zwischen 33 und 103 Metern. Aufgrund der starken Störung des Windfeldes im direkten Mastschatten der Messplattform wurde dieser Windrichtungssektor (280-250°) ausgeschlossen.

2. Measurement Site and Dataset

Working since 2003 in the German Bight, the offshore measurement platform FINO1 gives the opportunity to check the relations described in eq. (2) to (4) using measured data. Therefore the 10-minute averages of the mean horizontal wind speed and their longitudinal variance within these 10-minute intervals are investigated. The resulting turbulence intensity is compared with the calculation from the abovementioned equations. Hansen and Larsen (2006) propose a method for the de-trending of turbulence intensities determined following eq. (2) and show a measurement-site

Continuous windprofiles without mast

High resolution wind profiles up to 200m height


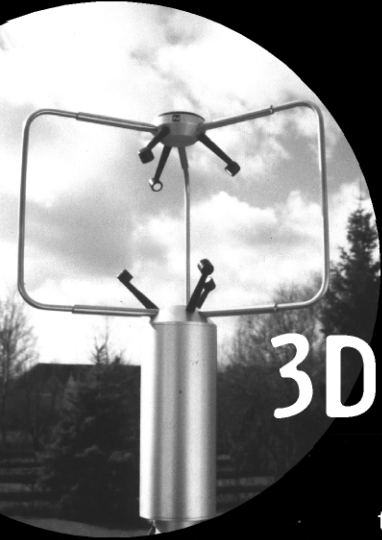

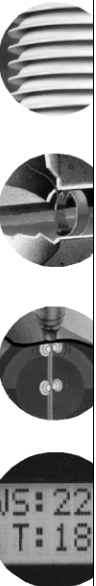
miniSodar

Anemometer for precise high resolution wind measurements

3D-Sonic

3-dimensional wind and turbulence measurement


Professional solutions for wind and weather measurements!

SALES AND SERVICE BY:

GWU-Umwelttechnik

Talstraße 3
D-50374 Erftstadt-Friesheim
Phone + 49 (0) 22 35/95 52 20
Fax + 49 (0) 22 35/7 56 32
E-mail: info@gwu-group.de
Web: www.gwu-group.de



3. Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt die 90-Perzentilwerte (=Wert, unterhalb dessen 90 Prozent aller Werte liegen) der gemessenen Turbulenzintensität in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit in verschiedenen Höhen für den Zeitraum Januar 2004 bis November 2006 im Vergleich zu Gleichung (3), der Berechnungsvorschrift der Turbulenzintensität nach IEC 61400-3. Die Kurven der 90-Perzentilwerte fallen mit zunehmender Windgeschwindigkeit zunächst auf ein Minimum je nach Messhöhe zwischen 7 und 8,5 Prozent bei etwa 10-12 m/s Windgeschwindigkeit. Unterhalb dieser Windgeschwindigkeit, insbesondere bei instabiler Schichtung, wird die Turbulenzintensität von der thermisch induzierten Turbulenz dominiert.

Oberhalb einer Windgeschwindigkeit von etwa 12 m/s steigt die Turbulenzintensität durch die zunehmende Wellenhöhe und Oberflächenrauigkeit wieder an. In diesem Bereich beginnt die mechanisch erzeugte Turbulenz zu dominieren, während die thermische Turbulenz kaum noch eine Rolle spielt. Die Turbulenzintensität ist in der untersten Messhöhe von 33 m am höchsten und nimmt nach oben hin ab, da der Einfluss der Oberflächenrauigkeit um so geringer wird, je weiter man sich von der Oberfläche entfernt. Im Vergleich zu den von der IEC-Norm vorgegebenen Turbulenzintensitäten lassen sich drei Bereiche erkennen: Unterhalb einer Windgeschwindigkeit von 8-10 m/s werden die gemessenen Ergebnisse von der Norm nicht treffend abgebildet. Dieser Bereich ist jedoch aufgrund der geringen Windgeschwindigkeiten kaum lastrelevant. Zwischen Windgeschwindigkeiten von 10 und etwa 22 m/s liegen die gemessenen Turbulenzintensitäten bis auf einen Ausreißer in der 30 m Höhe alle unterhalb der von der IEC-Norm geforderten Werte und die Steigung der gemessenen Turbulenzintensitätskurven ist etwas steiler als die der Kurven nach IEC 61400-3. Oberhalb einer Windgeschwindigkeit von etwa 22 m/s sind die Steigungen der gemessenen und der Norm-Kurven nahezu identisch, wobei die Vorgaben der Norm v.a. in den oberen Höhen oberhalb der gemessenen Werte liegen. Die 90-Perzentilwerte liegen bei einer Windgeschwindigkeit von 30 m/s zwischen 8,5 Prozent in 90 m Höhe und etwa 11 Prozent in einer Höhe von 30 m. Lediglich in den unteren beiden Messhöhen 50 und besonders 30 m liegen die gemessenen Werte in einigen Windgeschwindigkeitsklassen an bzw. oberhalb der Norm-Werte. Bei den Messwerten in 30 m Höhe ist dabei zu berücksichtigen, dass diese Höhe nur knapp oberhalb des Hubschrauberlandedecks der Messplattform liegt

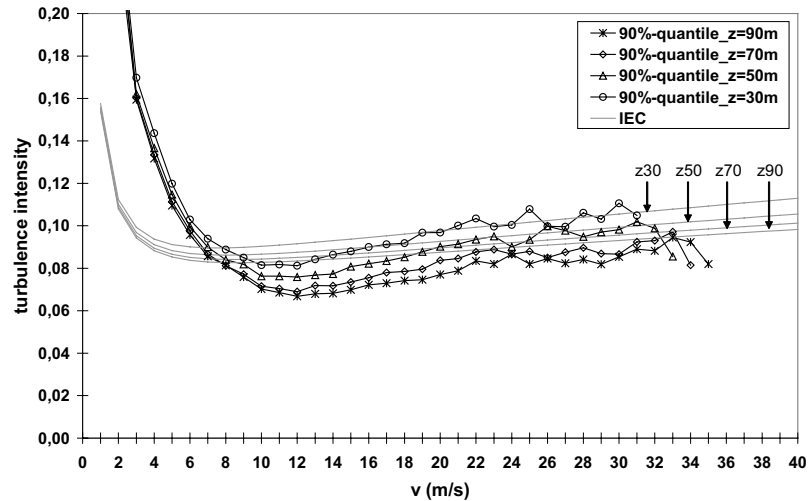


Abb. 1: 90-Perzentilwerte der gemessenen Turbulenzintensität (schwarze Kurven) in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit in verschiedenen Höhen im Vergleich zur Turbulenzintensität nach IEC 61400-3 (graue Kurven).

Fig. 1: 90-percent quantiles of measured turbulence intensity (black lines) depending on wind speed in different heights compared to turbulence intensity given by IEC 61400-3 (grey lines).

depending reduction of turbulence intensity due to de-trending of about 6-8 % for offshore sites. Turbulence data in the present work are not de-trended. Applying the de-trending method according to Hansen and Larsen (2006) to selected time series of the FINO1 dataset produced reductions of turbulence intensity which lay in the lower range or even below of the mentioned reductions.

Almost three years of data (January 2004 – November 2006) from the FINO1 offshore measurement platform were used for the investigations in this paper. FINO1 is located about 45 kilometres north of the island of Borkum in the German bight and offers a height resolution of 10 m in wind speed between 33 and 103 m. Due to the strong influence of the mast structure on the wind field the wind sector within the lee of the mast was excluded.

3. Results

Fig. 1 shows the 90-percent quantiles (= value underneath which 90 percent of all values within one bin lie) of measured turbulence intensity depending on wind speed in different heights for the period January 2004 – November 2006 compared to eq. (3) given by IEC 61400-3. The curves of the 90-percent quantiles first decrease with increasing wind speed till a measuring-height depending minimum of about 7 to 8.5 percent at 10-12 m/s wind speed. Below this wind speed, especially during instable thermal stratifications, turbulence intensity is dominated by thermal induced turbulence. Above 12 m/s wind speed turbulence intensity increases again due to the increasing wave height and surface roughness. Here the mechanical part of turbulence begins to dominate while the thermal effect became negligible. The highest turbulence intensity appears in the lowest level of 33 m and then decreases

und somit die Turbulenz in bestimmten Situationen unter Umständen von der Struktur der Plattform stark beeinflusst wird.

4. Diskussion und Ausblick

Die Turbulenzintensität ist über See von der Windgeschwindigkeit abhängig. Oberhalb eines Minimums zwischen 10 und 12 m/s Windgeschwindigkeit nimmt die Turbulenzintensität mit zunehmender Windgeschwindigkeit aufgrund der steigenden Wellenhöhe und somit Oberflächenrauigkeit zu. Die Turbulenzintensität nimmt mit der Höhe ab, da der Einfluss der Oberflächenrauigkeit abnimmt. Die von der IEC-Norm 61400-3 vorgeschlagenen Werte für die Turbulenzintensität über See liegen in den oberen Messhöhen immer und in den unteren Messhöhen bis auf Ausreißer in der Regel oberhalb der gemessenen 90-Perzentilwerte der Turbulenzintensität. Die Vorgaben der IEC 61400-3 können daher für die oberen Höhen absolut und für die unteren Höhen eingeschränkt für einzelne Windkraftanlagen als ausreichend solide gelten. Es ist allerdings zu bedenken, dass es im Innern von größeren Windparks durch die Wakes der äußeren Anlagen zu einer Erhöhung Turbulenzintensität kommt. Hier ist durch Modellierung zu prüfen, ob ggf. ein Sicherheitszuschlag erforderlich ist.

5. Danksagung

Wir danken dem BMU für die Finanzierung dieser Arbeit im Rahmen des Projektes „Ermittlung designrelevanter Belastungsparameter für WEA in der Deutschen Bucht auf Basis der FINO-Messdaten“ (OWID, Förderungsnummer 0329961). Das Projekt ist Teil eines BMU-Verbundprojektes gleichen Namens, das vom DEWI geleitet wird.

Literatur:

- [1] H. Charnock: Wind stress on a water surface. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 81 (1955), Seite 639-640.
- [2] G. T. Csanady: Air-Sea Interaction. Cambridge University Press (2001), Cambridge, New York, 240 S.
- [3] K. S. Hansen; G. Ch. Larsen: De-trending of turbulence measurements. Proceedings of OMEMES 2006 Seite 55-64, OWEMES Association, ENEA, ATENA, Rome.
- [4] Draft IEC 61400-1 Ed. 3: Wind Turbines – Part 3: Design requirements, IEC 2003-05-20.
- [5] Draft IEC 61400-3 Ed.1: Wind Turbines – Part 3: Design requirements for offshore wind turbines, IEC 2006-01-17.

with height because of the decreasing influence of surface roughness. Compared to turbulence intensities given by the IEC standard, we can detect three sectors: Below wind speeds of 8-10 m/s – wind speeds that are not really load-relevant - measured turbulence intensities are covered by the IEC-curves not very well. At wind speeds between 10 and 22 m/s the measured turbulence intensities lie below the values given by the standard except of one value in 30 m height. In this sector the slopes of the curves of measured turbulence intensity are steeper than the slopes of the curves calculated according to IEC 61400-3. Above wind speeds of about 22 m/s the slopes of measured and calculated turbulence intensity curves become nearly identical. IEC-curves lie above measured values especially in the upper heights. At 30 m/s wind speed values of the 90-percentiles are between 8.5 percent in 90 m height and 11 percent in 30 m height. Only in the lower two measuring heights, at 50 m and especially at 30 m, measured values in some wind speed bins are close to or above the values given by the standard. Looking at the measured values in the height of 30 m one has to consider that this height is located only short above the helicopter deck of the measuring platform and so the turbulence intensity may be affected by the platform structure here.

4. Discussion and Outlook

Offshore turbulence intensity strongly depends on wind speed. Above a minimum which occurs between 10-12 m/s wind speed the turbulence intensity increases with increasing wind speed because of increasing wave height and surface roughness. The influence of the surface roughness decreases with height resulting in a likewise decrease of the turbulence intensity with height. In the upper heights the turbulence intensity proposed by IEC 61400-3 lies above the measured values of the turbulence intensity in every wind speed bin, while in the lower heights some measured values are equal or greater than the values given by the standard. For single wind turbines the IEC guideline seems to be adequate, while for wind parks with wake-induced higher turbulence intensities inside the park an accurate modelling of the wind park effects is required to check if the guidelines are adequate here, too.

5. Acknowledgement

We wish to thank the German Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) for financing this work within the research project "Determination of design-relevant load-parameters for wind turbines in the German Bight based on the FINO-data" (OWID, No. 0329961). This project is part of a homonymous BMU joint project led by DEWI.