

The Wind Profile Above the Sea – Investigations Basing on Four Years of FINO 1 Data

Das Windprofil über See – Auswertung von vier Jahren FINO 1-Daten

M. Türk, KEMA Consulting GmbH
K. Grigutsch, DEWI-OCC
S. Emeis, Inst. für Meteorologie und Klimaforschung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH



M. Türk

EXTERNAL ARTICLE

ENGLISH - DEUTSCH

1. Introduction

A detailed knowledge of the wind profile and so also the wind shear above the sea is essential e.g. for the calculation of wind loads on wind turbines (Hsu et al., 1994) and for a detailed calculation of the wind potential (Pérez et al., 2005).

The very small surface roughness length of sea in comparison to land surfaces leads to different wind profiles in the marine boundary layer: The vertical gradient of the offshore wind profile is significantly smaller (e.g. Roedel, 2000). While the wind profile above land surfaces is well known from studies of many measuring towers, the data availability offshore was very limited in the past: Existing measuring towers were limited in height, height-resolution, fetch and / or quality and length of the data time series.

In the IEC standard 61400-1 Ed. 3 („Wind Turbines - Part 1: Design Requirements“) the wind profile is described by the so called *power law profile*:

$$v(z) = v_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \quad (1)$$

1. Einleitung

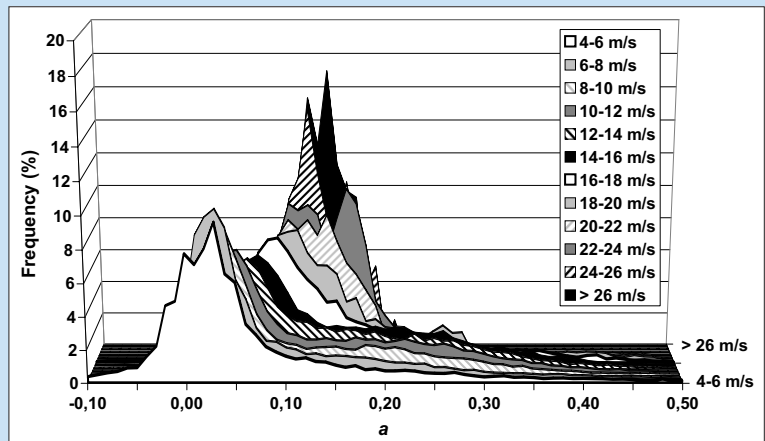
Die Kenntnis des Windprofils und somit auch der Windscherung über See ist unter anderem für die Kalkulation der auftretenden Windlasten bei Windkraftanlagen (Hsu et al., 1994) und für eine genaue Berechnung des Windpotentials (Pérez et al., 2005) unerlässlich.

Das Windprofil in der marinen Grenzschicht unterscheidet sich unter anderem aufgrund der wesentlich geringeren Oberflächenrauigkeit über See deutlich von Windprofilen der meisten Landoberflächen, der Vertikalgradient des Windprofils ist wesentlich kleiner (z. B. Roedel, 2000). Während das Windprofil über Land durch eine Vielzahl von vorhandenen Messmasten verhältnismäßig gut erforscht ist, gab es bislang kaum geeignete Offshore-Messungen mit ausreichender Höhengauflösung, Messdauer und Datenqualität.

Zur Beschreibung des Windprofils wird in der IEC-Norm 61400-1 Ed. 3 („Wind Turbines - Part 1: Design Requirements“) das sogenannte Potenzprofil (*power law profile*) verwendet:

Fig. 1: Frequency distribution of the power law exponent α for different wind speed classes.

Abb. 1: Häufigkeitsverteilung des Höhenexponenten α für verschiedene Windgeschwindigkeitsklassen.



Tab. 1: Mean value, standard deviation and number of values of α for different wind speed classes.

Tab. 1: Mittelwert, Standardabweichung und Anzahl der Werte von α für verschiedene Windgeschwindigkeitsklassen.

wind speed (m/s) Windgeschwindigkeit (m/s)	mean value Mittelwert	standard deviation Standardabweichung	number of values Anzahl Werte
4-6	0,048	0,144	18178
6-8	0,068	0,114	23318
8-10	0,094	0,109	25236
10-12	0,116	0,109	24599
12-14	0,129	0,104	19863
14-16	0,137	0,101	13645
16-18	0,138	0,092	8540
18-20	0,142	0,084	4874
20-22	0,131	0,056	2270
22-24	0,133	0,039	1210
24-26	0,130	0,034	384
>26	0,130	0,025	247

where $v(z)$ is the mean horizontal wind speed at the height z above the ground (here: 40 m), v_{hub} is the mean horizontal wind speed at hub height z_{hub} (here: 90 m) and α is the exponent of the power law wind profile. For onshore sites, in the IEC 61400-1 a mean value of 0.20 is recommended for α , while for offshore conditions the IEC standard 61400-3 Ed. 1 („Wind Turbines - Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines“) gives a mean value of 0.14.

2. Measuring Site and Dataset

In this investigation, the above-mentioned recommendations for the height exponent α (eq. 1) given by the IEC standards, were tested using four years of data (September 2003 to August 2007) from the FINO 1 research platform, which is located about 45 km north of the island of Borkum in the German Bight (Neumann et al., 2004). The investigation is based on 10-minute mean values of the horizontal wind speed.

For determining the height exponent α from the FINO 1 data according to eq. (1), $z_{hub} = 90$ m was chosen and $z = 40$ m as reference height. The value for α was determined for each 10-minute interval. Because of the strong disturbance of the wind field in the direct mast shadow of the measuring platform this wind direction sector (280-350°) was excluded.

3. Results

At the location of FINO 1, the mean value of the power law exponent α is 0.10, but α shows a wide variation and

mit $v(z)$ als mittlere horizontale Windgeschwindigkeit in der Höhe z über Grund (hier: 40 m), v_{hub} als mittlere horizontale Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe z_{hub} (hier: 90 m) und α als dem Höhenexponenten des Potenzprofils. In der IEC-Norm 61400-1 wird für das normale Windprofil (NWP) für α ein Wert von 0,20 vorgegeben, in der für Offshore-Verhältnisse gültigen IEC 61400-3 Ed. 1 („Wind Turbines - Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines“) ein Wert von 0,14.

2. Messplattform und Datensatz

In der vorliegenden Arbeit wurden anhand von vier Jahren Daten (September 2003 bis August 2007) der 45 km vor Borkum in der Deutschen Bucht liegenden Forschungsplattform FINO 1 (Neumann et al., 2004) die in den genannten IEC-Normen für den Höhenexponenten α aus Gl. (1) gemachten Annahmen überprüft. Die Auswertungen wurden auf Basis der 10-Minuten Mittelwerte der Windgeschwindigkeit durchgeführt.

Für die Bestimmung des Höhenexponenten α aus den FINO 1-Daten nach Gl. (1) wurde $z_{hub} = 90$ m gewählt und als Referenzhöhe $z = 40$ m. Der Wert für α wurde dabei für jedes 10-Minuten Intervall bestimmt. Aufgrund der starken Störung des Windfeldes im direkten Mast Schatten der Messplattform wurde dieser Windrichtungssektor (280-350°) ausgeschlossen.

3. Ergebnisse

Der mittlere in den FINO 1-Daten gefundene Wert für α

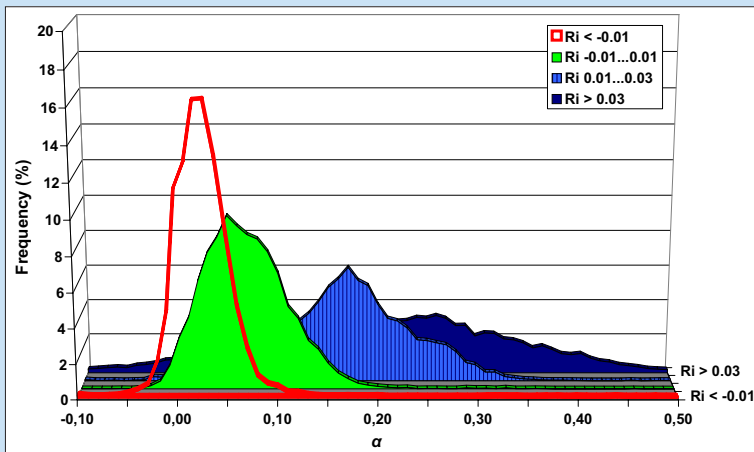


Fig. 2: Frequency distribution of the power law exponent α for different atmospheric stability classes.

Abb. 2: Häufigkeitsverteilung des Höhenexponenten α für verschiedene Stabilitätsklassen.

bulk-richardson-number Bulk-Richardson-Zahl	mean value Mittelwert	standard deviation Standardabweichung	number of values Anzahl Werte
< -0,01	0,023	0,036	9450
-0,01...0,01	0,063	0,048	11939
0,01...0,03	0,149	0,065	10626
> 0,03	0,190	0,185	11361

Tab. 2: Mean value, standard deviation and number of values of α for different atmospheric stability classes.

Tab. 2: Mittelwert, Standardabweichung und Anzahl der Werte von α für verschiedene Stabilitätsklassen.

strongly depends on wind speed and atmospheric stability. Fig. 1 shows the frequency distribution of α for different wind speed classes with a bin-width of 2 m/s. The frequency within each class is 100 percent, i.e. the frequency distribution of each plotted curve relates not to the totality of all values but to the number of values within the corresponding wind speed class. Mean value, standard deviation and number of α are listed in Tab. 1 for each wind speed class. At low wind speeds, α is smallest and even situations with a negative exponent height, i.e. situations where wind speed decreases with height, occur frequently. With increasing wind speed and therefore increasing surface roughness length, the mean value of α also rises to a maximum value of 0.142 in the wind speed class 18 – 20 m/s. When the wind speed increases even further, α stays nearly constant in the range of 0.13 and the values of the standard deviation become significantly lower. Very small as well as very high values of α hardly occur at these high wind speeds.

The frequency distribution of the height exponent α is shown in Fig. 2 for different atmospheric stability conditions. Analogous to Fig. 1, the frequency distribution within each class relates to the number of values within the corresponding class. The so called Bulk-Richardson-Number R_i (e.g. Foken, 2003) is used as a measure of atmospheric stability. Mean value, standard deviation and number of α are listed in Tab. 2 for each stability class. Under unstable conditions ($R_i < 0.01$), values of α as well as the width of the distribution are smallest because the good mixing within the atmospheric boundary layer leads to a very small vertical wind speed gradient. With increasing stability, the mean

beträgt 0,10, der Höhenexponent zeigt jedoch eine große Variationsbreite und ist stark von der Windgeschwindigkeit sowie der atmosphärischen Schichtung abhängig. Abb. 1 zeigt die Häufigkeitsverteilung des Höhenexponenten für verschiedene Windgeschwindigkeitsklassen. Die Klassenbreite beträgt 2 m/s. In der Grafik ist die Häufigkeit in jeder Klasse 100%, d. h. die Häufigkeitsverteilung jeder Kurve bezieht sich nicht auf die Gesamtanzahl aller Werte, sondern nur auf die Häufigkeit innerhalb der jeweiligen Klasse. Mittelwert, Standardabweichung und Anzahl der Werte von α je Windgeschwindigkeitsklasse sind in Tab. 1 aufgeführt. Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten ist der Mittelwert von α am kleinsten und es treten regelmäßig Fälle mit negativem Höhenexponenten auf, also Situationen, in denen die Windgeschwindigkeit nach oben abnimmt. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit nimmt der Mittelwert von α aufgrund der größer werdenden Oberflächenrauigkeit bis zu einem Maximum von 0,142 in der Windgeschwindigkeitsklasse 18 – 20 m/s zu. Mit weiter ansteigender Windgeschwindigkeit bleibt α im Bereich um 0,13 nahezu konstant und die Standardabweichungen innerhalb der Windgeschwindigkeitsklassen werden deutlich geringer. Sowohl sehr kleine, als auch sehr große Werte von α kommen bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten kaum noch vor.

Die Häufigkeitsverteilung des Höhenexponenten α für verschiedene Stabilitätsklassen ist in Abb. 2 dargestellt. Analog zur Grafik in Abb. 1 bezieht sich die Häufigkeitsverteilung auf die Häufigkeit innerhalb der jeweiligen Klasse. Als Maß für die atmosphärische Stabilität wird die Bulk-Richardson-Zahl R_i (z. B. Foken, 2003) verwendet. Mittelwert, Standard-

value of α also increases and reaches a maximum of 0.19 under very stable conditions ($R_i > 0.03$). The distribution of the number of values of the different stability classes is not representative for the distribution of atmospheric stability of the whole investigated period, because the water surface temperature, which was used for the calculation of the Bulk-Richardson-Number, is available only for limited (and irregularly distributed) time intervals.

4. Discussion and Outlook

With a mean value of 0.10, the height exponent α calculated from four years of FINO 1 data is significantly lower than the values given by the IEC standards (0.2 for onshore sites and 0.14 for offshore sites). Load calculations done by DEWI-OCC for concrete wind turbines suggest that the loads for the load component blade root flapwise bending moment are higher when using the actually occurring distribution of α compared to using the (higher) constant mean values given by the standards. Apparently, the occurrence of very high values of α (even at relatively high wind speeds), which is not considered in the IEC standards, carries more weight in the load calculations of the blade root flapwise bending moment than the “conservative” chosen mean value of α (0.14 for offshore conditions), which is significantly higher than the measured value of 0.10. Further investigations are necessary here.

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.

abweichung und Anzahl der Werte von α je Windgeschwindigkeitsklasse sind in Tab. 2 aufgeführt. Bei instabiler Schichtung ($R_i < -0,01$) sind die Werte von α sowie die Breite der Verteilung am kleinsten, da sich durch die gute Durchmischung der atmosphärischen Grenzschicht nur ein sehr kleiner Vertikalgradient der Windgeschwindigkeit ausbilden kann. Mit zunehmend stabiler werdender Schichtung nimmt der Mittelwert von α zu, um bei stark stabilen Verhältnissen ($R_i > 0,03$) sein Maximum zu erreichen. Die Verteilung der Anzahl der Werte je Stabilitätsklasse in Tab. 2 ist nicht repräsentativ für die Verteilung der atmosphärischen Stabilitätszustände im Gesamtzeitraum, da die für die Bestimmung der Bulk-Richardson-Zahl verwendete Wasseroberflächentemperatur nur für begrenzte und noch dazu ungleichmäßig über den Gesamtzeitraum verteilte Zeitabschnitte verfügbar ist.

4. Diskussion und Ausblick

Der aus den FINO 1-Daten ermittelte Höhenexponent α liegt im Mittel mit 0,10 relativ deutlich unterhalb der Vorgaben aus den IEC-Normen (0,2 über Land bzw. 0,14 für Offshore-Verhältnisse). Lastrechnungen am DEWI-OCC für konkrete Windkraftanlagen deuten darauf hin, dass die auftretenden Lasten für die Lastgröße „Blattwurzel Schlagmoment“ bei Verwendung der oben dargestellten real auftretenden Verteilung des Höhenexponenten dennoch oberhalb der Lasten liegen, die sich bei Verwendung eines konstanten Höhenexponenten von 0,14 in den Lastrechnungen ergeben. Das in den Vorgaben der IEC-Normen nicht berücksichtigte Vorkommen sehr großer Höhenexponenten – auch bei relativ hohen Windgeschwindigkeiten – wiegt bei der Berechnung der Betriebslasten für das Blattwurzel Schlagmoment also offenbar größer als der „konservativ“ angesetzte Mittelwert von α , der mit 0,14 deutlich oberhalb des gemessenen Mittelwertes von 0,1 liegt. Hier bedarf es weiterer Untersuchungen.

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.

Literature / Literatur:

- [1] T. Foken: Angewandte Meteorologie. Springer, Berlin (2003), 289 S.
- [2] S. A. Hsu, E. A. Meindl, D. B. Gilhousen: Determining the Power-Law Wind-Profile Exponent under Near-Neutral Stability Conditions at Sea. *J. Appl. Meteorol.* 33 (1994), 757-765.
- [3] Draft IEC 61400-1 Ed. 3: Wind Turbines – Part 3: Design requirements, IEC 2003-05-20.
- [4] Draft IEC 61400-3 Ed.1: Wind Turbines – Part 3: Design requirements for offshore wind turbines, IEC 2006-01-17.
- [5] T. Neumann, K. Nolopp, K. Herklotz: Erste Betriebserfahrungen mit der FINO 1-Forschungsplattform in der Nordsee. *DEWI-Magazin* Nr. 24 (2004), 27-34.
- [6] I. A. Pérez, M. A. García, M. L. Sánchez, B. de Torre: Analysis and parameterisation of wind profiles in the low atmosphere. *Solar Energy* 78 (2005), 809-821.
- [7] W. Roedel: Physik unserer Umwelt – Die Atmosphäre. Springer, Berlin (2000), 498 S.