

Leistungsuntersuchungen an einer Windkraftanlage im Gebirge

Investigation of the Electrical Power of a Wind Turbine in Mountains

Zelený, Jaroslav; Institut für Physik der Atmosphäre Prag der Tschechischen Akademie der Wissenschaften; Foken, Thomas; Meteorologisches Observatorium Lindenberg des Deutschen Wetterdienstes

Summary

The use of wind turbines in mountains is increasing not only in the USA but also in Central Europe. It is important to know whether electric power of wind turbines for the same wind conditions differs between low land and mountain locations. Using the results of wind power research station at Dlouhá Louka (Iron Hills, Czech Republic) it will be shown that the power of the wind turbine varies with the degree of turbulence. The normalized electrical power (ratio of the measured power to the available wind power) decreases with a decreasing degree of turbulence or increasing wind velocity. Also the power fluctuation coefficient (PFC) decreases with increasing wind velocity.

1. Einleitung

Die Nutzung von Windkraftanlagen im Gebirge nimmt nicht nur in den USA sondern auch in Mitteleuropa zu, wie die wachsende Zahl von Windkraftanlagen beispielsweise in Sachsen [1] zeigt. Es ist daher wichtig zu wissen, ob sich die Leistung von Windkraftanlagen für gleiche Windbedingungen zwischen einem Flachland- und einem Gebirgsstandort unterscheidet. Prinzipiell wäre dies auf der Basis von Untersuchungen der Leistung von gleichen Windkraftanlagen an verschiedenen Standorten bei gleichem geostrophischem Wind (Wind der reibungsfreien Luftströmung) möglich. Da für die Tschechische Republik derartige Untersuchungen nicht möglich sind, wurde der Weg gewählt, die im Gebirge veränderten turbulenten Bedingungen zu studieren und mit der Leistung einer Windkraftanlage zu vergleichen. Insbesondere ging es darum, den offensichtlich im Gebirge vorhandenen Effekt, daß bei gleicher Windgeschwindigkeit zeitweise völlig verschiedene Leistungen erreicht werden [2], zu erklären. Es wurden dabei verschiedene Parameter getestet, wobei die Turbulenzintensität, aber auch der Leistungsfluktuationskoeffizient (PFC) [3], die aussagekräftigsten waren.

2. Beschreibung der Windenergieversuchsstation Dlouhá Louka

Das Institut für Physik der Atmosphäre Prag der Tschechischen Akademie der Wissenschaften betreibt seit Dezember 1993 eine Windkraftanlage am Observatorium Dlouhá Louka im Erzgebirge in 870 m über NN (13° 39' E, 50° 38' N). Der Standort befindet sich auf einer Hochfläche, die nach Süden offen ist und ansonsten niedrigen Wald und einzelne Gebäude aufweist. Neben der Windkraftanlage der Firma Energovars (Tschechische Republik, Frýdek-Místek) befindet sich am Observatorium ein 45 m hoher Mast für meteorologische Messungen. Detaillierte Angaben sind in den Tabellen 1 und 2 enthalten. Die Datenaufzeichnung und Datenspeicherung erfolgt mit 1 Hz Abtastfrequenz.

Leistung	315 kW
Zahl der Rotorblätter	3
Rotordurchmesser	30 m
Nabenhöhe	30 m
Drehzahl	33 min ⁻¹
Geschwindigkeitsbereich	3,5 - 24 m/s

Tab. 1: Technische Daten der Windkraftanlage EWT 315

Tab. 1: Technical characteristics of the wind turbine EWT 315

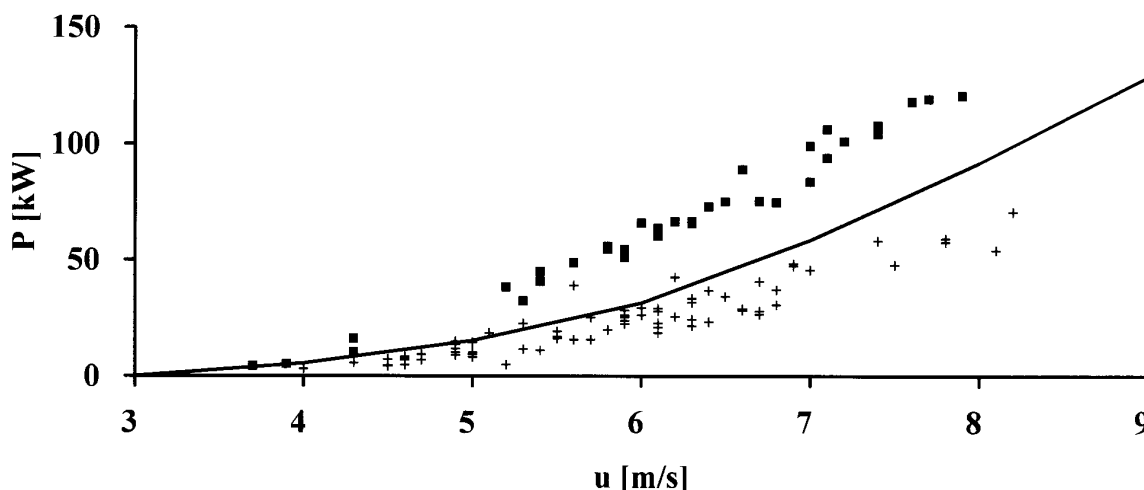
Parameter	Meßhöhe
Windgeschwindigkeit	10, 15, 30, 45, 50 m

Windrichtung	10, 30, 50 m
Temperatur	10, 30, 45 m
Luftfeuchte	10,30,45 m
Luftdruck	2 m
Eisablagerungsgeber	10 m
meteorol.-klimatolog. Standardmeßstation	2 m

Tab. 2: Meteorologisches Meßprogramm
 Tab. 2: Meteorological observation programme

3. Abhängigkeit der Leistung von der Windgeschwindigkeit im Gebirge

Die Leistungswerte von Windkraftanlagen weisen im inhomogenen Gelände (Gebirge) zeitweise und insbesondere bei hohen Windgeschwindigkeiten erheblich von der Leistungskurve der Anlage abweichende Werte auf [2,4]. Als typisches Beispiel ist in Abb. 1 die Windgeschwindigkeitsabhängigkeit der Leistung am 07.12.1994 am Observatorium Dlouhá Louka dargestellt.



- Turbulenzgrad = 0,29 + Turbulenzgrad = 0,19 — projizierte Leistung

Abb. 1: Windgeschwindigkeitsabhängigkeit der Leistung der Windkraftanlage vom 07.12.1994 am Observatorium Dlouhá Louka

Fig. 1: Dependence of the electrical power of the wind turbine on the wind velocity, on Dec. 07, 1994 at the observatory Dlouhá Louka

Die ermittelten Leistungen liegen sowohl oberhalb als auch unterhalb der projizierten Leistungskurve. Eine Analyse der Daten ergab, daß analog zu den Ergebnissen an der Alta Mesa Wind Farm (USA, [2]), die aber nicht speziell interpretiert wurden, diese Unterschiede durch einen unterschiedlichen Turbulenzgrad hervorgerufen wurden, wobei die niedrigeren Werte bei Südwind (freie Anströmung) beobachtet wurden. Dabei wird der Turbulenzgrad als das dimensionslose Verhältnis aus der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit und der Windgeschwindigkeit für 10-Minuten-Mittel (s_u / \bar{u}) bezeichnet. Die nachfolgenden Untersuchungen dienen der Untersuchung der offensichtlich vorhandenen Abhängigkeit der Leistungsabgabe der Windkraftanlage vom Turbulenzgrad. Dabei wurden verschiedene Turbulenzgrade nahezu ausschließlich durch unterschiedliche Windgeschwindigkeiten bei westlicher Anströmung und nicht durch unterschiedliche Anströmrichtungen hervorgerufen.

4. Einfluß des Turbulenzgrades auf die Leistung der Windkraftanlage

Für gleiche Anströmrichtung ergibt sich eine klare Abhängigkeit des Turbulenzgrades von der Windgeschwindigkeit (Abb. 2) mit einer Abnahme des Turbulenzgrades für höhere Windgeschwindigkeiten auf Werte von ca. 0,1.

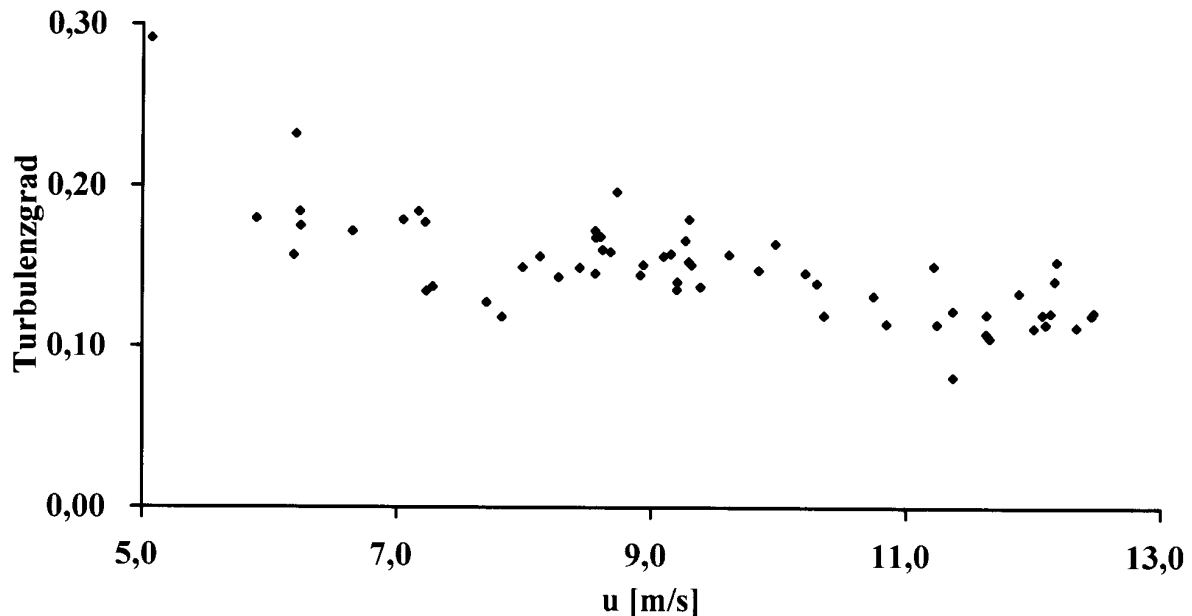


Abb. 2: Abhängigkeit des Turbulenzgrades von der Windgeschwindigkeit am Observatorium Dlouhá Louka bei Westwind

Fig. 2: Dependence of the turbulence intensity on the wind velocity for western winds at the observatory Dlouhá Louka

Um eine von der Windgeschwindigkeit unabhängige Darstellung der Leistung der Windkraftanlage zu ermöglichen, wurde die gemessene Leistung mit der 3. Potenz der Windgeschwindigkeit einschließlich dem zusätzlichen Anteil durch die vorhandene Turbulenz [5] normiert:

$$P_{norm} = \frac{P_{mess}(\bar{u})}{\bar{u}^3 \left(1 + 3 \frac{\sigma_u^2}{\bar{u}^2} \right)} \quad (1)$$

Diese Größe zeigt abnehmende Werte der normierten Leistung mit einem abnehmenden Turbulenzgrad (Abb. 3). Die Interpretation des Ergebnisses bedeutet, daß für geringere Turbulenzintensitäten (höhere Windgeschwindigkeiten) die verfügbare Leistung unter der Nennleistung der Windkraftanlage liegt. Damit wird bei niedrigeren Turbulenzintensitäten nicht mehr die entsprechend der vorhandenen Windgeschwindigkeit mögliche Energie produziert. Um dies weiter zu verdeutlichen, wird in Abb. 4 die normierte Differenz aus produzierter und gemäß Datenblatt theoretisch möglicher Energieproduktion dargestellt. Es zeigt sich, daß bei niedrigen Turbulenzintensitäten die produzierte Energie (P) unter den Angaben des Datenblattes (P_0) liegt, jedoch für hohe Turbulenzintensitäten (0,2) deutlich über den Angaben des Datenblattes. Weiterhin wurde untersucht, ob der dargestellte Sachverhalt im Zusammenhang mit vorhandenen Instationaritäten in der Luftströmung erklärt werden kann. Entsprechende Tests [6] zeigten jedoch, daß trotz starker Geländegliederungen bei dem untersuchten Windgeschwindigkeitsbereich ($u > 5$ m/s) die Luftströmung weitgehend stationär ist und bei niedrigen Turbulenzintensitäten sogar eine nahezu ideale Stationarität aufweist. Im untersuchten Windgeschwindigkeitsbereich sind Untersuchungen in Abhängigkeit von der Stabilität nicht notwendig, da die Schichtung immer nahezu neutral ist.

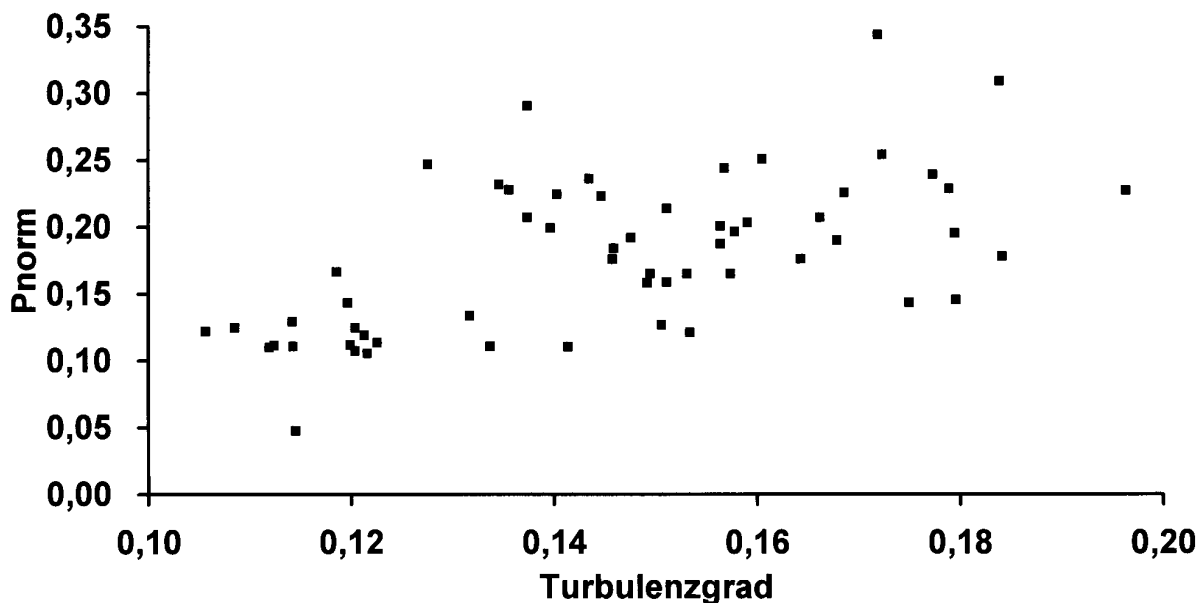


Abb. 3: Abhängigkeit der auf die verfügbare Windenergie normierten elektrischen Leistung entsprechend Gleichung (1)

Fig. 3: Dependence of the electrical power normalized with the available wind power, according to equation (1)

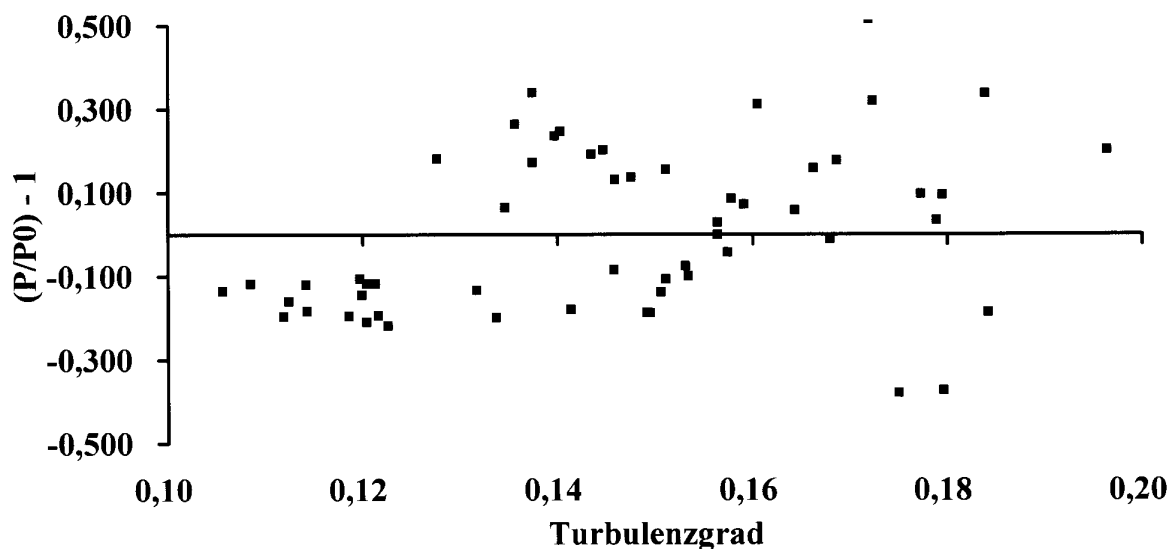


Abb. 4: Abhängigkeit des Turbulenzgrades von der mit der Nenn-Leistung normierten Leistung

Fig. 4: Dependence of the turbulence intensity on the electrical power, normalized by the theoretical power

5. Regelung von Windkraftanlagen im Gebirge

Wegen der hohen Variabilität des Windes im Gebirge erscheint es angebracht, das Übertragungsverhalten des Windes auf die Leistung der Windkraftanlage speziell zu untersuchen. Als Maß wurde der Koeffizient der Fluktuation der Leistungsabgabe der Anlage in Abhängigkeit von der Fluktuation des Windes (PFC: Power fluctuation coefficient) untersucht [3]:

$$PFC = \frac{\frac{\sigma_P}{P}}{3 \frac{\sigma_u}{u}} \quad (2)$$

In Abb. 5 wird gezeigt, wie der PFC-Koeffizient von der Windgeschwindigkeit abhängt. Für niedrige Windgeschwindigkeiten ergeben sich Werte nahe 1, so daß sich Windgeschwindigkeitsschwankungen voll auf die Leistungsschwankungen übertragen.

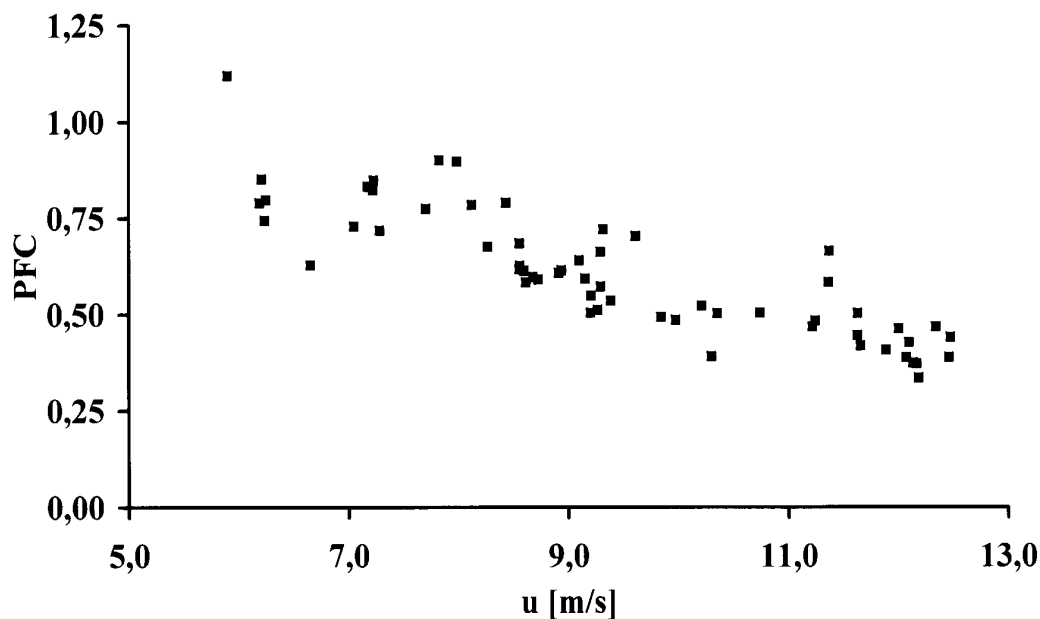


Abb. 5: Abhängigkeit des PFC-Koeffizienten von der Windgeschwindigkeit
Fig. 5: Dependence of the PFC on the wind velocity

Für hohe Windgeschwindigkeiten wird $PFC < 1$. Damit folgen die Leistungsschwankungen der Windkraftanlage nicht mehr voll den Windschwankungen. Diese zwar für den Betrieb der Anlage erstrebenswerte Tatsache führt aber nicht zu einer optimalen Leistungsausbeute. Die Abnahme des PFC-Koeffizienten mit zunehmender Windgeschwindigkeit wird dadurch verursacht, daß Zähler und Nenner von Gleichung (2) in ihrer Windgeschwindigkeitsabhängigkeit merklich differieren.

6. Schlußfolgerungen

Starke Leistungsunterschiede von Windkraftanlagen im Gebirge bei nahezu gleicher Windgeschwindigkeit beruhen auf einer windrichtungsabhängigen (topographieabhängigen) Variation des Turbulenzgrades. Bei dem untersuchten Windkraftanlagentyp wird für Windgeschwindigkeiten > 10 m/s (abnehmende Turbulenzintensität) nicht mehr die volle Leistung erreicht. Demgegenüber ist in einem mittleren Geschwindigkeitsbereich von ca. 5 - 10 m/s eine höhere Leistung als die Nennleistung zu erwarten, allerdings werden alle Windgeschwindigkeitsschwankungen in Leistungsschwankungen umgesetzt.

Zukünftige Untersuchungen sollen einer Unterscheidung zwischen dynamischer Turbulenz und der durch die Heterogenität des Geländes hervorgerufenen mechanischen Turbulenz dienen, um die Auswirkungen der Heterogenität des Geländes, die mittels Makrorauhigkeiten quantitativ erfaßt wer-

den kann [7], auch vor der Installation einer Windkraftanlage abschätzen zu können. Weiterhin muß untersucht werden, ob durch eine veränderte Stellung der Rotorblätter in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und Windrichtung (Turbulenzgrad) der Einfluß der heterogenen Unterlage minimiert werden kann.

7. Danksagung

Unser Dank gilt dem Tschechischen Energiewerk (EZ), welches die Untersuchungen finanziert und fördert, sowie dem DEWI für die Möglichkeit der raschen Publikation der Ergebnisse.

8. Literatur

- [1] Keuper, A.: Windenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland, Stand 31.12.1994. DEWI Magazin (1995) 6, 12-24
- [2] Thomsen, K.; Petersen, S. M.; Sangill, O.; Lading, P.: Analysis of loads for wind turbines in inhomogeneous terrain. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, Nov. 1993, Risø-R-657(EN), 87pp.
- [3] Metzler, T.; Söker, H.: Untersuchung einer Methode zur Bewertung der Regelgüte von Windkraftanlagen. DEWI Magazin (1994) 5, 56-60
- [4] Pedersen, T. F.; Petersen, S. M.; Thomsen, K.; Madson, P. H.; Højstrup, J.: Loads for wind turbines in inhomogeneous terrain, Measurement report. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, July 1991, Risø-M-2922, 150pp
- [5] Mengelkamp, H.-T.: On the energy output estimation of wind turbines. Int. J. Energy Res. 12 (1988), 113-123
- [6] Foken, Th.; Wichura, B.: Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. Agric. & Forest Meteorol. (1995), in print
- [7] Zelený, J.; Pretel, J.: Zur Problematik der Bestimmung der aerodynamischen Rauigkeit der Erdoberfläche. Z. Meteorol. 36 (1986), 325