

the observed differences between the cup anemometer measurements.

- Future research should emphasise on the verification of the findings regarding the turbulence parameter analysis with other types of cup anemometers and at other locations, especially in complex terrain. Simulations of turbulence effects on cup anemometers in wind tunnels require a good control over the here identified important turbulence measures.

7. Acknowledgements

The work has been partially supported by the European Commission under contract number JOR3-CT98-0257.

8. References

- [1] MEASNET: Measurement Procedure Cup Anemometer Calibrations, 1997
- [2] A. Albers, H. Klug, D. Westermann; Outdoor Comparison of Cup Anemometers; Pro-ceedings of DEWEK 2000
- [3] A. Albers, H. Klug, D. Westermann; Cup Anemometry in Wind Engineering, Struggle for Improvement, DEWI Magazine no. 18, February 2001
- [4] A. Albers; Identification of Variables for Site Calibration and Power Curve Assessment in Complex Terrain, JOR3-CT98-0257, Project Task 6, Relative Power Curve Measurements in Flat terrain, Final Report, Report-No. JOR3-CT98-0257-0601-DEWI07, June 2001
- [5] F. Mouzakis, E. Morfiadakis, P Dellaportas; Parameter Identification on Power Performance of Wind Turbines Operating at Complex Terrain, 2nd European & African Conference on Wind Engineering Geneva, Italy, 1997
- [6] A. Albers; Comments on Techniques for Multi-Parameter Site Calibration, DEWI Report-No.: JOR3-CT98-0257-1198-DEWI01, 1998

Problematik der Windböen

Frank Böttcher, Christoph Renner, Hans-Peter Waldl und Joachim Peinke
Fachbereich Physik, Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg

1. Einleitung

Windenergieanlagen (WEA) sind im Betriebszustand unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt, die die Lebensdauer der Anlagen, vor allem durch die wechselnden (instationären) Belastungen, herabsetzen. Neben den deterministischen Anteilen (wie z.B. Schwer- und Kreiselkräfte) sind es insbesondere stochastische Lastanteile, die die mechanische Auslegung von Windkraftanlagen sehr komplex werden lassen. [1] Die stochastischen mechanischen Belastungen haben ihre Ursache in der schwankenden Windgeschwindigkeit. Sie werden in der Regel in Windturbulenzen und in Windböen untergliedert. Der Einfluß der Windturbulenz wird oftmals durch den Turbulenzgrad

$$S = \frac{\sigma}{u} \quad (1)$$

wiedergegeben, der das Verhältnis der Standardabweichung des Windgeschwindigkeitsfeldes zu seiner mittleren Geschwindigkeit beschreibt. Die Frage nach der Natur von Windböen ist trotz ihrer scheinbaren Trivialität bis heute nicht allgemein geklärt und eine strenge Definition des Begriffes findet sich in der Literatur nicht [3]. Dabei ist die Kenntnis der maximal zu erwartenden Geschwindigkeit einer Windböe besonders hinsichtlich der Abschätzung von Extrembelastungen von großem Interesse. Ähnlich relevant und auch schwierig ist die Einschätzung der Häufigkeit von Böenereignissen und deren zeitliche Abfolge [2]. Die Unterscheidung von Böen und Windturbulenzen wird in der Regel folgendermaßen formuliert. Während die Windturbulenz $u'(t)$ als permanente, fluktuierende Überlagerung der mittleren Geschwindigkeit $\bar{u}(t)$ aufgefaßt werden kann, stellen Böen nach [3] eine "erhebliche Abweichung von der mittleren Windgeschwindigkeit im Bereich von einigen bis einigen zehn Sekunden" dar. Letztere werden demnach im Gegensatz zur Windturbulenz als einzelne und extreme Ereignisse charakterisiert.

Um zu untersuchen wie Windböen vom statistischen Standpunkt aus erfaßt werden können, werden wir im folgenden zwei Geschwindigkeitszeitreihen auf ihre statistischen Eigenschaften untersuchen: Einen Freifeld-Windgeschwindigkeits- und einen Labor-Geschwindigkeitsdatensatz. In diesem Artikel

wird gezeigt, daß zum einen die Problematik der Böen in einer anomalen, d.h. nicht gaußförmigen Statistik fußt, und daß diese Statistik der entwickelten Turbulenz von Labordaten entspricht.

2. Intermittenz des Windfeldes

2.1 Daten

Die verwendeten Winddaten wurden von der FH Ostfriesland in Emden von 1997 bis 1998 in einer Höhe von 20 m mit einer Meßfrequenz von 4 Hz aufgezeichnet. Das Windgeschwindigkeitsfeld wurde dabei 3-achsig mit Hilfe eines Ultraschallanemometers erfaßt (Hauptwindrichtung nach SW). Wir beschränken uns auf einen 275 stündigen Ausschnitt aus dem Oktober 1997. Als Labordatensatz wird eine Messung in der Symmetrieebene einer Zylindernachlaufströmung ($Re \approx 30000$) verwendet. Diese sind neben Freistrah- und Gitternachlaufströmungen die verbreitetsten experimentellen Systeme innerhalb der Turbulenzforschung und sollen hier für einen Vergleich mit der Windturbulenz herangezogen werden. Die Meßfrequenz betrug 10^5 Hz, die Anzahl der Datenpunkte ist $12,5 \cdot 10^6$.

2.2 Häufigkeitsverteilung des Windfeldes

Da sich Windböen durch große Geschwindigkeitsanstiege äußern, untersuchen wir die Häufigkeiten, mit der einzelne Anstiege auftreten. Hierzu betrachten wir zunächst das Windgeschwindigkeitsfeld $U(t)$, daß sich zusammensetzt aus der mittleren Windgeschwindigkeit $\bar{u}(t)$ und den momentanen Fluktuationen $u'(t)$

$$U = \bar{u} + u' \quad (2)$$

wobei in dieser Arbeit, wie üblich, für \bar{u} der zehnmünütige, gleitende Mittelwert um den Zeitpunkt t gewählt wird. Außerdem beschränken wir uns auf die Longitudinalkomponenten (in horizontaler Hauptwindrichtung). Als charakteristische Größen werden die entsprechenden Geschwindigkeitsinkremente untersucht, die sich aus der Differenz der Fluktuationen zu verschiedenen Zeitpunkten ergeben:

$$\delta u_\tau := u'(t + \tau) - u'(t) \quad (3)$$

Diese Geschwindigkeitsinkremente bieten sich aus zweierlei Gründen für eine statistische Betrachtung an: Zum einen enthalten sie aufgrund der Differenzbildung Informationen über den Geschwindigkeitsunterschied zu verschiedenen Zeitpunkten; ein großes Inkrement entspricht damit einem Böenergebnis, bei einem entsprechenden τ von z.B. 10 Sekunden. Zum anderen sind Untersuchungen auf Basis von Geschwindigkeitsinkre-

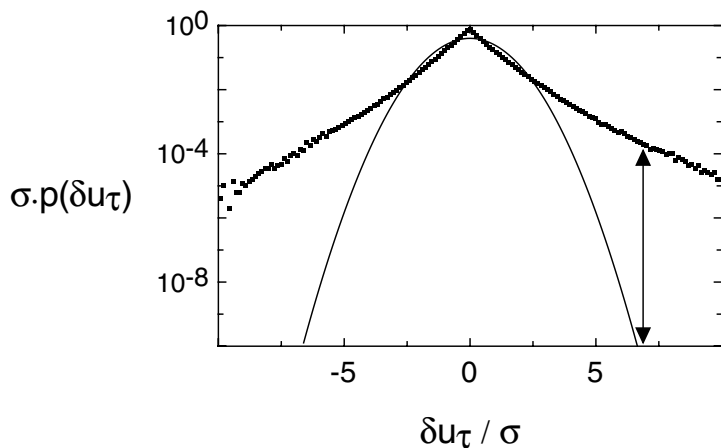


Abb. 1: Die Verteilung der Windgeschwindigkeitsinkremente für $\tau = 4$ s wird durch die quadratischen Symbole wiedergegeben. Desweiteren ist eine Gaußverteilung mit derselben Standardabweichung und demselben Mittelwert durch die durchgezogene Linie dargestellt. Beide Verteilungen sind auf die Standardabweichung $\sigma = 0; 8$ m/s normiert und flächentreu eingezeichnet.

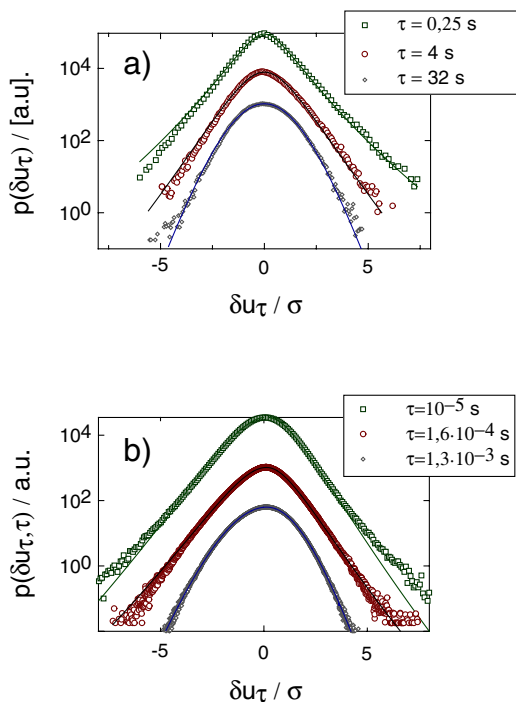


Abb. 2: Verteilungen der Geschwindigkeitsinkremente: a) auf eine mittlere Geschwindigkeit von 5 m/s bis 6 m/s bedingte Winddaten, b) Labordaten. Die Verteilungen sind in semi-logarithmischer Auftragung dargestellt. In beiden Fällen wird die Formänderung für größer werdende τ deutlich. Der betrachtete Zeitbereich der Inkremente ist aneinander angepaßt (siehe Kapitel 3.3).

menten in der Turbulenzforschung sehr verbreitet, was eine gute Vergleichbarkeit von Labor- und Winddaten gewährleistet.

Die nach (3) bestimmten Inkremente lassen sich nach Einteilung in unterschiedliche Inkrementklassen durch eine Häufigkeitsverteilung charakterisieren (siehe Abb. 1). Diese Verteilung wird idealisiert durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $p(\delta u_\tau)$ wiedergegeben.

Der einfachste mathematische Ansatz für eine solche Verteilung ist eine Gauß- bzw. Normalverteilung, der für viele unkorrelierte Zufallsprozesse seine Gültigkeit hat. Eine Gaußverteilung ist eindeutig durch ihren Mittelwert und ihre Breite (Standardabweichung σ) definiert. Jede gemessene

Verteilung läßt sich quantitativ mit einer Gaußverteilung vergleichen, wie dies auch in Abb. 1 zu sehen ist. Augenscheinlich weicht hier die Verteilung der Windinkremente deutlich von einer Gaußverteilung ab. Sie ist um den Erwartungswert relativ spitz und schmal, während sie zu den Rändern hin ausgeprägte Flügel besitzt, d. h. große Geschwindigkeitsinkremente sind weitaus wahrscheinlicher als das für die gaußverteilten Inkremente der Fall ist. Doch gerade diese großen Inkrementwerte sind letztendlich das, was man als Böen wahrnimmt, sofern der zeitliche Abstand τ hinreichend klein ist.

Diese anomale (nichtgaußförmige) Verteilung wird auch als intermittent bezeichnet. Die Wahrscheinlichkeit für $\delta u_\tau = 7 * \sigma$ beispielsweise, was einem seltenen und großen Geschwindigkeitsanstieg (einer Böe) entspricht - in diesem Fall einem Geschwindigkeitsanstieg von 5,6 m/s innerhalb von 4 Sekunden - ist für die intermittente Verteilung bereits um einen Faktor 10^6 größer als man das für die entsprechende Gaußverteilung erwarten würde! Dieser Fall ist in Abb. 1 durch einen Pfeil markiert. Für noch größere Inkremente nimmt der Faktor weiter stark zu.

Dieser drastische Unterschied in der Wahrscheinlichkeitsdichte hat zur Folge, daß selbst extrem große Geschwindigkeitsanstiege häufig auftreten. Allein der Faktor 10^6 bedeutet beispielsweise, daß Windböen, die 5 mal täglich beobachtet werden lediglich alle 500 Jahre vorkämen, läge ihnen eine Normalverteilung zugrunde! Intermittente Häufigkeitsverteilungen werden in der Natur oft beobachtet, beispielsweise in Erdbebenstatistiken [7], aber auch bei Wechselkursen an der Börse [6] oder im Straßenverkehr [5]. Wird dennoch eine Gaußverteilung der jeweiligen Größen angenommen, führt dies zu einer starken Unterschätzung extremer Ereignisse.

3. Wind- vs Laborturbulenz

3.1 Bedingte und unbedingte Verteilungen

Im folgenden soll die Freifeldmessung der ebenfalls in Kapitel 2.1 vorgestellten Laborturbulenzmes-

sung gegenübergestellt werden. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen erfahren in Laborexperimenten, also bei stationärer Turbulenz, eine bestimmte, charakteristische Formänderung in Abhängigkeit vom Inkrementabstand τ [8]. Während die Verteilungen für kleine τ deutlich intermittiert sind, nähern sie sich für größer werdende Zeitabstände immer mehr einer Normalverteilung an (siehe Abb. 2b). Diese charakteristische Formänderung findet sich bei den Winddaten nicht, was für den Fall $\tau = 4\text{s}$ in Abb. 1 zu erkennen ist. Selbst für sehr große Inkrementabstände, die hier allerdings nicht abgebildet sind, ist keine signifikante Annäherung an eine Normalverteilung festzustellen. Die Verteilung bleibt nahezu unverändert intermittiert!

Ein wesentlicher Unterschied des atmosphärischen Geschwindigkeitsfeldes zu einem im Labor erzeugten Geschwindigkeitsfeld ist die Tatsache, daß ersteres hochgradig instationär ist. Das bedeutet, daß viele unterschiedliche Hauptwindgeschwindigkeiten den jeweiligen Fluktuationen und damit auch den entsprechenden Inkrementen zugrunde liegen, während bei der Labormessung die mittlere Geschwindigkeit \bar{u} gleich bleibt. Werden die Windgeschwindigkeitsinkremente nur dann gebildet, wenn die entsprechende mittlere Geschwindigkeit in einem vorgegebenen Intervall liegt, so tritt ein bemerkenswerter Effekt auf. Die auf diese Weise bedingten Verteilungen $p(\delta u_\tau | \bar{u})$ verhalten sich so wie die stationären Labordaten, d.h. es zeigt sich ebenfalls eine deutliche Annäherung an eine Normalverteilung für größere τ . Dieser Fall ist in Abb.2 a dargestellt.

3.2 Mathematischer Einschub

Zur Quantifizierung der Formänderung benutzen wir eine aus der Turbulenzforschung bekannte Fitfunktion [4]:

$$P(\delta u_\tau) = \frac{1}{2\pi\lambda_\tau} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{\delta u_\tau^2}{2s^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\ln^2(s/s_0)}{2\lambda_\tau^2}\right) \frac{d(\ln s)}{s} \quad (4)$$

Der wesentliche Parameter, der Gleichung (4) bestimmt, ist der sogenannte Form- oder Intermittenzparameter λ_τ^2 . Er dient als Maß dafür, wie stark eine Verteilung von einer Normalverteilung abweicht. Für $\lambda_\tau^2 = 0$ geht Gleichung (4) in eine Normalverteilung der Form

$$p(\delta u_\tau) = \frac{1}{s_0\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta u_\tau^2}{2s_0^2}\right) \quad (5)$$

über.

3.3 Verlauf des Formparameters

Je größer der Formparameter λ_τ^2 ist, desto intermittenter wird die Verteilung. Zur Wiedergabe der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Abb. 2 wird dieser Parameter entsprechend angepaßt. Der Verlauf der Verteilungen wird erstaunlich gut beschrieben, selbst Inkremente der Größe der fünffachen Standardabweichung - also sehr seltene Ereignisse - werden noch richtig wiedergegeben.

In Abb. 3 ist der Verlauf von λ_τ^2 der bedingten Windgeschwindigkeitsinkremente sowie der Inkremente der Labormessung für Abstände bis $\bar{\tau} = 500$ dargestellt. Die zeitlichen Inkrementabstände τ wurden für die Wind- und Labordaten linear umskaliert, so daß der Übergang zu gaußförmigen Verteilungen bei $\bar{\tau} = 128$ stattfindet. Als Schwellenwert für eine gaußförmige Verteilung setzen wir $\lambda_\tau^2 = 0,01$.

Es ist deutlich zu erkennen, daß der Formparameter sowohl für die Labor- als auch für die Winddaten einen ähnlichen Verlauf aufweist. In beiden Fällen nähert sich λ_τ^2 dem

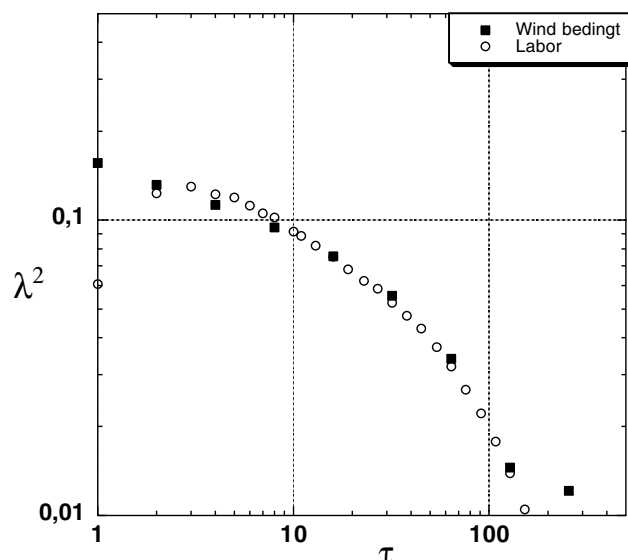


Abb. 3: Dargestellt ist der Verlauf des Formparameters in doppellogarithmischer Auftragung. Für die Labordaten gilt: $\bar{\tau} = \tau / 10^{-6}\text{s}$, für die bedingten Winddaten $\bar{\tau} = \tau / 0,25\text{s}$.

Wert Null mit ansteigendem Inkrementabstand τ .

4. Fazit

- Im Rahmen der hier verwendeten Inkrementanalyse finden sich Windböen in den Flügeln ihrer Inkrementenverteilung wieder. Die Freifeld-Windmessung besitzt eine sehr ausgeprägt intermittente Verteilung, was auf eine Vielzahl von Böenereignissen hindeutet. Das freie Windfeld kann man aber zusammengesetzt aus unterschiedlichen Windverhältnissen auffassen. Innerhalb einzelner Windverhältnisse (Hauptwindgeschwindigkeitsintervalle) findet sich eine erstaunlich gute Übereinstimmung mit Turbulenzeffekten, wie sie aus stationären Laborturbulenzexperimenten bekannt sind. Insofern scheinen sich Windböen auf reine Turbulenzeffekte zurückführen zu lassen, so daß die Unterscheidung zwischen Windböen und -turbulenzen im Sinne von [3] willkürlich ist.
- Für eine Abschätzung der Häufigkeit extremer Geschwindigkeitsinkremente kann die Formel (4) benutzt werden. Allein die Kenntnis von $\lambda\tau^2$ reicht aus, um die Verteilung gut zu approximieren. Dies gilt auch für die unbedingten Inkremente. Auf gar keinen Fall sollte eine Normalverteilung zur Abschätzung herangezogen werden, da diese Extremereignisse völlig untergewichtet.

5. Literatur

- [1] T. Siebers, U. Heinrichs, Abschätzung und Messung von Strukturbelastungen großer Windkraftanlagen, Erneuerbare Energien, 9/1999
- [2] J. Altemark, Bedeutung von Schwingungswächtern in Windenergieanlagen, Windkraft-Journal 2/2000
- [3] E. Hau, Windkraftanlagen, Springer 1996
- [4] B. Castaing, Y. Gagne, E.J. Hopnger, Physica D, 46 , 177 (1990)
- [5] J.C. Vassilicos, Turbulence and intermittency, Nature, 374 , 408-409 (1995)
- [6] S. Ghashghaie, W. Breymann, J. Peinke, P. Talkner & Y. Dodge Nature 381, 767-770 (1996)
- [7] D. Schertzer, S. Lovejoy, Multifractal Generation of Self-Organized Critically, Fractals in the Natural and Applied Sciences, A-41 , 325-339, 1994
- [8] K. R. Sreenivasan & R.A. Antonia, The phenomenology of small-scale turbulence, Annu. Rev. Fluid Mech. 29 , 435-472, 1997