

Turbulenzkorrektur von Leistungskennlinien

Turbulence Correction of Power Curves

Dr. H. van Radecke, FH Flensburg und DEWI Wilhelmshaven 2003



Summary

This research presents a method of converting the power curve measured at one site with known turbulence to another site with different turbulence. Due to the effects of turbulence, the nonlinearity of the power curve causes changes in the power curve corresponding to its second derivative and the variance in wind speed. On the basis of the research by Albers and Hinsch [1] Kaiser et al. [2] and by an analysis of variance in terms of regression between power and standard deviation of the wind, the influence of turbulence is determined by means of a power curve without turbulence P_0 and influence factors k , both arranged in order of wind speed bins. Using these values, conversion to different classes of turbulence is made. For the purpose of verification of regression, power curves of different classes of turbulence are determined and compared with the calculations. The influence on annual energy yield is also investigated. In a second step, the derivative of the power curves is examined, and the results are compared with the analysis of variance. The method of variance analysis presented permits power curves to be converted into classes of turbulence. The accuracy in the lower part of the power curve is high and decreases towards the upper part of the power curve as well as in case of great, particularly positive changes in turbulence intensity. Changes in annual energy yield percentages and the resulting predictions are for the most part correct. The analysis of the power curve only by its derivative provides results which are qualitatively correct, but the results of the variance analysis are more accurate.

1. Einleitung

Die vorliegende Untersuchung stellt ein Verfahren vor, die an einem Standort mit bekannter Turbulenz gemessene Leistungskennlinie auf einen anderen Standort mit einer anderen Turbulenz umzurechnen. Albers und Hinsch erkannten 1996 den Einfluss der Turbulenz der Anströmung auf die Leistungsabgabe von Windenergieanlagen und wies auf die Methode, mit der Krümmung der Leistungskennlinie (zweite Ableitung) und der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit den Einfluss nach Windgeschwindigkeitsklassen geordnet zu berechnen [1]. Der Einfluss auf den Jahresenergieertrag ist gering und die Betrachtung anderer Ungenauigkeiten stand im Vordergrund. Durch jüngere Bestrebungen, nur bestimmte Turbulenzintensitäten bei der Leistungsvermessung zuzulassen, rückt die Turbulenz wieder in den Vordergrund. Kaiser et al. veröffentlichten in 2003 ein Verfahren, das auf dem Ansatz von Albers und Hinsch aufbauend Matrizen und minimale Fehlerquadrate benutzt [2]. Mit dem hier vorgestellten Verfahren wird aufbauend auf dem Ansatz von Albers und Hinsch mit nicht linearer Regression und der mit ihr verbundenen minimalen Fehlerquadrate der Einfluss der Turbulenz bestimmt. Das Verfahren ist im Ergebnis mathematisch identisch zu dem von Kaiser et al., liefert zusätzlich mit den Formalismen der Regression direkte Aussagen über die Genauigkeit der Regression und schafft einen anschaulichen Zugriff auf die Bedeutung der Varianz und die Anwendbarkeit des Verfahrens. Zur Verifikation werden in verschiedene Turbulenzklassen eingeteilte gemessene Leistungskennlinien und deren Jahresenergieerträge mit der Regression verglichen. In einem zweiten Schritt wird die Krümmung der Leistungskennlinie untersucht. Dieses Verfahren bietet grundsätzlich die Möglichkeit, ohne die Daten, die zur Erstellung der Leistungskennlinie verwendet werden, den Einfluss der Turbulenz zu bestimmen.

2. Methoden

Mehrfach nachgewiesen wurde [1] [2], dass mit steigender Turbulenzintensität T_1 die Leistungskennlinie Veränderungen zeigt derart, dass im unteren Teillastbereich höhere und im oberen Teillastbereich niedrigere Leistungen erreicht werden, siehe Abb. 1. Ursache ist die Nichtlinearität der Leistungskennlinie $P(v)$. Nichtlinearität in der Übertragungsfunktion erzeugt bei Variation des Eingangssignals Verzerrung des

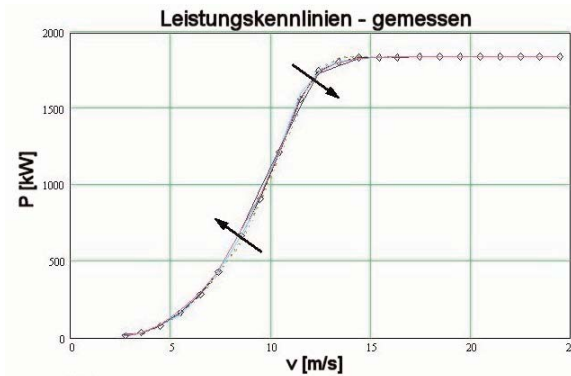


Abb. 1 Mit steigender Turbulenzintensität $TI = \sigma_v/v$ Veränderung der Leistungskennlinie

Fig. 1 Increasing turbulence $TI = \sigma_v/v$ causes change of power curve

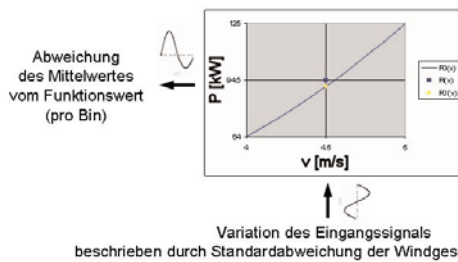


Abb. 2 Nichtlinearität der Übertragungsfunktion erzeugt Mittelwertverschiebung

Fig. 2 Nonlinearity in transfer function causes shift in the mean value

Ausgangssignals. Der Mittelwert des Ausgangssignals ist nicht mehr identisch mit dem Funktionswert des Mittelwertes des Eingangssignals, siehe Abb. 2. Die Variation des Eingangssignals wird beschrieben mit der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit σ_v jeweils pro Geschwindigkeitsklasse (Bin). Die Klassenbreite beträgt hier $\Delta v = 1$ m/s. Es wurden ebenfalls Untersuchungen mit der Klassenbreite 0,5 m/s durchgeführt, die zu ähnlichen Ergebnissen führen jedoch mit sinkender statistischer Signifikanz.

Quantitativ angegeben wird pro Windgeschwindigkeitsklasse die Abweichung des Mittelwertes mit der zweiten Ableitung der Übertragungsfunktion (Krümmung der Leistungskennlinie) und dem Quadrat der Standardabweichung (Varianz) der Windgeschwindigkeit. Dieser Zusammenhang folgt aus der Taylorentwicklung (Abbruch nach zweitem Glied, das erste Glied verschwindet aufgrund der Linearität der Mittelwertbildung) und ist u. a. von Albers [1] und ebenso von Bendat und Piersol [3] als "Bias of Estimate" beschrieben. Der Zusammenhang ist in den Gl. (1) bis (3) dargestellt. P_0 ist die Leistungskennlinie bei der Turbulenz $TI = 0$. Gl. (2) und (3) erlauben zwei Lösungsansätze.

$$P(v) = P_0(v) + \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2 P_0(v)}{dv^2} \cdot (v - v_0)^2 \quad (1)$$

$$P(v) = P_0(v) + \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2 P_0(v)}{dv^2} \cdot \sigma_v^2 \quad (2)$$

$$P(v) = P_0(v) + k \cdot \sigma_v^2 \quad (3)$$

Ansatz 1 (Varianzanalyse)

Die Leistungsvermessung nach IEC [4] liefert luftdichtekorrigierte j Datentripel der Geschwindigkeit, ihrer Standardabweichung und der Leistung (v_j, σ_{v_j}, P_j). Geschwindigkeit v_j und Leistung P_j sind Mittelwerte über 10 Minuten, die Standardabweichung σ_{v_j} beschreibt die Varianz in 10 Minuten auf der Basis von Werten im Sekundentakt. Nach Gl. (3) werden die Datentripel geordnet nach Geschwindigkeitsklassen i (Bin) herangezogen, um P_{0i} und k_i aus der Regression zwischen P_j und $\sigma_{v_j}^2$ zu bestimmen (entsprechend $y = b + mx$). Für die Mittelwerte gilt Gl. (4):

$$\overline{P(\bar{v})} = P_0(\bar{v}) + k \cdot \overline{\sigma_v^2} \quad (4)$$

Die Unsicherheiten ΔP_0 und Δk sind gegeben durch die Gleichungen für die Unsicherheiten der Regression, siehe u. a. [5]. Die Übertragbarkeit in andere Turbulenzintensitäten ergibt sich aus

$$TI = \frac{\sigma_v}{v} \quad (5)$$

so dass für konstante Turbulenzintensitäten die veränderten Leistungskennlinien mit den oben bestimmten Regressionskoeffizienten P_{0i} und k_i berechnet werden können mit

$$\overline{\sigma_v^2} = Fak \cdot (TI \cdot v)^2 \quad (6)$$

wobei gilt

$$Fak = \frac{\overline{\sigma_v^2}}{(\overline{\sigma_v})^2} \quad (7)$$

In erster Näherung ist Quadrierung und Mittelwertbildung in Gl. (7) vertauschbar, was nachgewiesen für höhere Windgeschwindigkeiten gilt ($F_{ak} = 1$). Bei den vorliegenden Umrechnungen wird im Wesentlichen direkt Gl. (4) angewandt, da alle Werte vorliegen. Liegen die Einzelwerte der Turbulenz, auf die umgerechnet werden soll, nicht vor, muss ihre statistische Verteilung bekannt sein. Der Faktor lässt sich berechnen aus der Standardabweichung und dem Mittelwert der Verteilung von σv_j jeweils pro Windgeschwindigkeitsklasse.

Ansatz 2 (Ableitung)

Gl. (2) stellt eine Differenzialgleichung dar, mit deren Lösung bei bekannter Leistungskennlinie $P(v)$ sowohl $P_0(v)$ als auch

$$2 \cdot k(v) = d^2 P_0 / dv^2 \tag{8}$$

angegeben werden kann. Zum einen wird mit einem analytischen Ansatz für $P(v)$ die Differenzialgleichung gelöst. Zum zweiten wird mit bekanntem P_0 aus der Varianzanalyse unter Anwendung von Gl. (8) k bestimmt. Die Ergebnisse werden mit denen nach Ansatz 1 verglichen.

3. Leistungskennlinie und Turbulenz

Abb. 3 zeigt eine Leistungskennlinien in dreidimensionaler Darstellung. Aus Blickwinkel 1 (Projektionswand gelb) ergibt sich die Leistungskennlinie in ihrer üblichen Darstellung. Aus Blickwinkel 2 (Projektionswand grün) erhält man den inneren Zusammenhang der Turbulenz. Die Messungen wurden aufgenommen in offenem, ebenem Gelände der Rauigkeitsklasse 1. Es zeigt sich, dass die mittlere Turbulenzintensität Tl annähernd konstant und Gl. (5) für die Mittelwerte anwendbar ist. Die Verteilung der Turbulenzintensität Tl lässt sich als Weibull-Verteilung beschreiben mit einer hinreichend breiten Streuung ($\sigma\sigma v = 0,04 \text{ m/s}$ bis $0,06 \text{ m/s}$), so dass die Bildung von Turbulenzintensitätsklassen bis hinunter zu einer Breite von $\Delta Tl = 2 \%$ möglich ist. Unterteilt man die Verteilungen von Tl nach Geschwindigkeitsklassen, wird deutlich, dass die Breite der Verteilungen von v abhängig ist derart, dass sie mit steigender Geschwindigkeit kleiner wird oder umgekehrt formuliert, zu niedrigeren Geschwindigkeiten wird die Verteilung von Tl breiter. Aus Blickwinkel 3 (Projektionswand blau) erhält man die Leistung in Abhängigkeit der Turbulenz ausgedrückt als Standardabweichung der Windgeschwindigkeit. Dieser Zusammenhang wird folgend mit obigen Ansätzen untersucht. Die hier vorgestellten Messdaten beziehen sich auf drehzahlvariable Anlagen mit Blattverstellung.

4. Varianzanalyse und Turbulenzklassen

Wie zu erwarten, ist der Einflussfaktor k als Steigung der Regressionslinie im unteren Teillastbereich positiv, im mittleren Teillastbereich nahe Null und im oberen Teillastbereich negativ. In den Abb. 4 und 5 sind für zwei Leistungskennlinien die Messwerte der Leistung über der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit und die Regressionslinien als Ergebnisse der Varianzanalyse nach Gl. (3) für zwei Windgeschwindigkeitsklassen mit den Mittelwerten $v = 5,5 \text{ m/s}$ (unterer Teillastbereich) und $v = 12,5 \text{ m/s}$ (oberer Teillastbereich) dargestellt. Der Einflussfaktor k ist die Steigung der Regressionslinie und im unteren positiv (Abb. 4) und im oberen Teillastbereich negativ

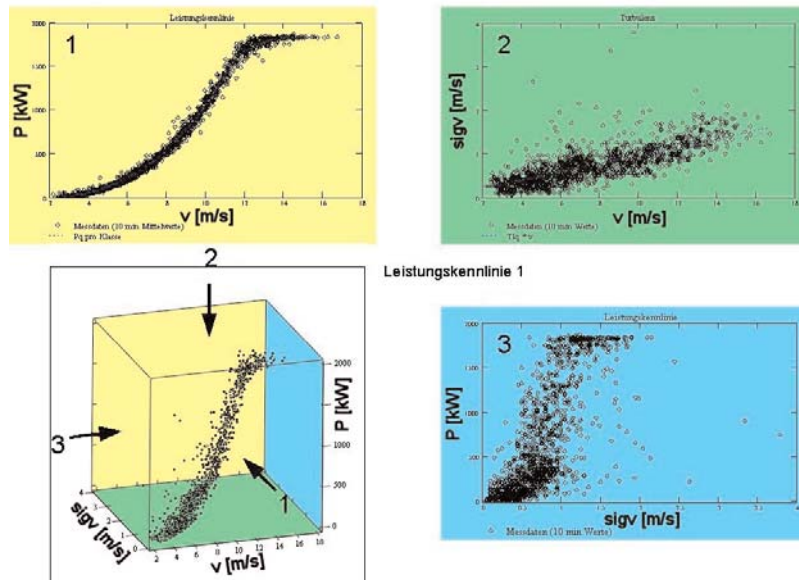


Abb. 3 Dreidimensionale Leistungskennlinie mit Projektion 1 (gelb): Leistungskennlinie $P = P(v)$
 Projektion 2 (grün): Turbulenz $\sigma_v = Tl \cdot v$
 Projektion 3 (blau): Leistung über Turbulenz $P = P(\sigma_v)$

Fig. 3 Three-dimensional power curve with Projection 1 (yellow): power curve $P = P(v)$
 Projection 2 (green): turbulence $\sigma_v = Tl \cdot v$
 Projection 3 (blue): power related to turbulence $P = P(\sigma_v)$

(Abb. 5). Ebenfalls eingetragen ist die Unsicherheit der Regression als punktierte Linie. Die Unsicherheit der Regression nimmt mit höheren Windgeschwindigkeitsklassen zu, was zum Teil auf die Windhäufigkeit zurückzuführen ist. Alle Variationen der Regression führen durch den tatsächlich gemessenen Punkt der mittleren Leistung (P_{q_i}) und der zugehörigen mittleren Standardabweichung

$$(\sqrt{\text{sigv}^2 q_i}),$$

in den Abbildungen gekennzeichnet als Schnittpunkt der senkrechten Linie gekennzeichnet durch diesen Ausdruck mit der Regressionslinie. Die Güte der Regression ist u. a. abhängig von der Streuung der Standardabweichungen σ_v , die folglich für die Bestimmung der Regressionskoeffizienten möglichst groß sein sollte. Die extrapolierte Leistung bei der Turbulenz Null (P_{0i}) und ihre Unsicherheit ist als Ordinatenabschnitt der Regressionslinie ($\sigma_v = 0$) abzulesen.

Zur Verifikation der Regression werden betrachtet die Leistungen gemittelt in Turbulenzklassen; sie entstehen durch Filterung der Daten und entsprechen gemessenen Leistungen. In Abb. 4 sind eingetragen die Leistungen (\square) von 10 Turbulenzklassen der Breite $\Delta TI=2\%$. Gute Übereinstimmungen werden erzielt. Einzelne Leistungswerte liegen jedoch knapp außerhalb der statistischen Grenzen der Regression, insbesondere dann, wenn die Anzahl der Messpunkte sinkt. In Abb. 5 sind die Leistungen von drei Turbulenzklassen (siehe in Abb. 5 Punkt 4, Messwerte (\square)) dargestellt, die Klasse mit allen Turbulenzen, die Klasse der Turbulenzintensitäten kleiner und die Klasse der Turbulenzintensitäten größer als die mittlere Turbulenzintensität. Auch hier folgen die Leistungen der Regressionslinie und liegen sehr nahe den berechneten Leistungen (siehe in Abb. 5 Punkt 5 (\diamond)). In einigen Windgeschwindigkeitsklassen folgen die gemittelten Leistungen der Turbulenzklassen nicht so deutlich der Regression und liegen zum Teil knapp außerhalb der statistischen Unsicherheit (68%) der Regression.

Der Vergleich aller gemessenen und nach der Regression berechneten Leistungskennlinien in verschiedenen Turbulenzklassen zeigt gute Übereinstimmung, die die grundsätzliche Anwendbarkeit des Verfahrens bestätigt. Abweichungen sind jedoch festzustellen. Zur besseren Sichtbarmachung der geringen Unterschiede ist in Abb. 6 unten von allen Kennlinien der Anteil der Leistungskennlinie bei der Turbulenz Null (P_0 , für alle gleich) abgezogen. Das linke und das rechte Diagramm stellen die gemessenen und berechneten Kennlinien dar und zeigen sehr ähnliche Verläufe, im Detail sind sie jedoch verschieden. Dieses Ergebnis entspricht den obigen Ausführungen. Durchgängig ist zu beobachten, dass die Übereinstimmungen von Messung und Rechnung im unteren Teillastbereich sehr gut sind. Differenzen treten im mittleren und oberen Teillastbereich auf.

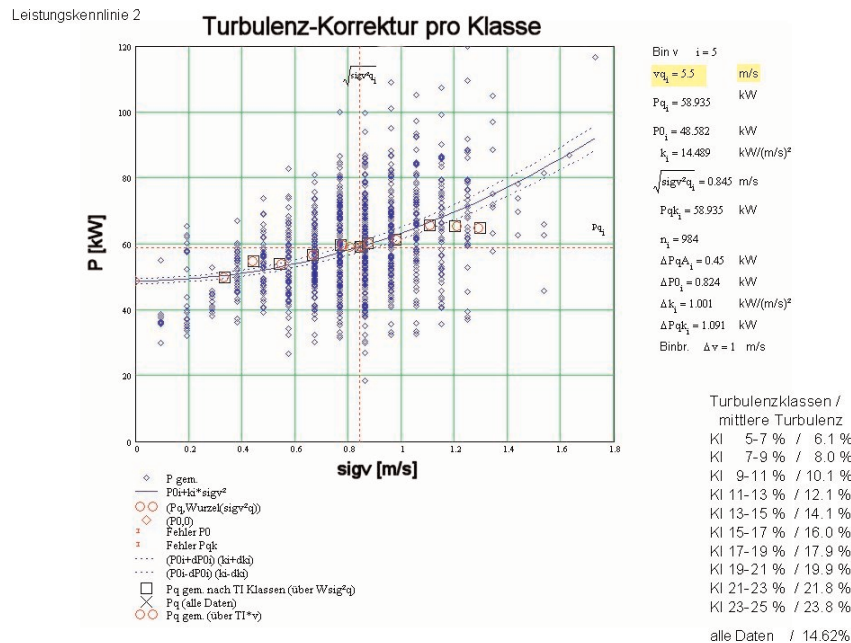


Abb. 4 Varianzanalyse, P über σ_v , Mittelwert Geschwindigkeitsklasse $v = 5,5$ m/s, Messwerte (10-min), Regression k, P_0 , Unsicherheit Regression Δk , ΔP_0 , Leistung gemessen (\square) in 10 Turbulenzklassen Breite $\Delta TI = 2\%$, Leistung berechnet bei gleichen σ_v auf Regressionslinie

Fig. 4 Analysis of variance P related to σ_v , wind speed class mean value $v=5.5$ m/s, Data (10-min), regression k, P_0 , uncertainty regression Δk , ΔP_0 , power measured (\square) in 10 turbulence intensity classes width $\Delta TI=2\%$, power calculated referred to same σ_v on regression line

5. Energieerträge

Die Energieerträge werden berechnet mittels der oben genannten gemessenen bzw. berechneten Leistungskennlinien bei Windverteilungen nach Weibull mit dem Formfaktor 2 und der mittleren Windgeschwindigkeit

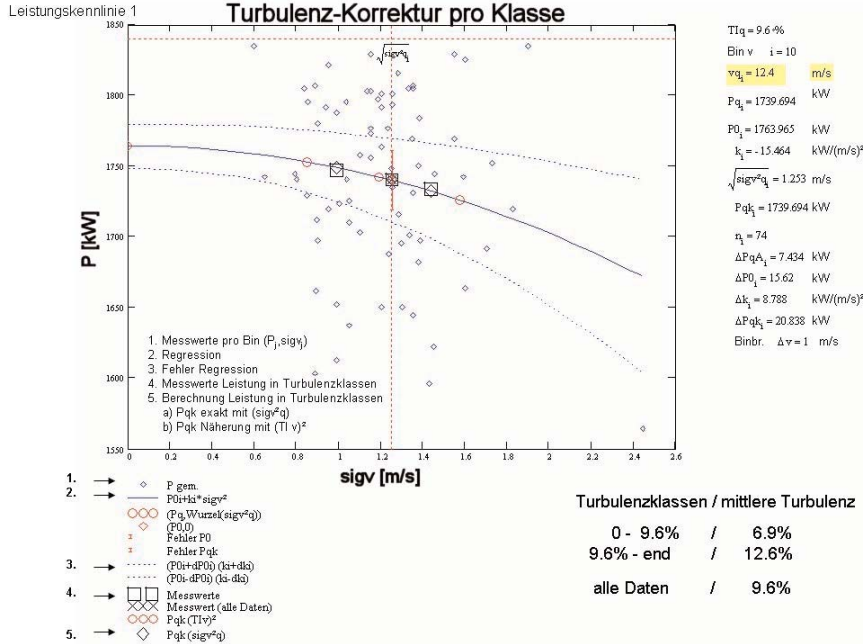


Abb. 5 Varianzanalyse, P über σ_v , Mittelwert Geschwindigkeitsklasse $v = 12,5 \text{ m/s}$; 1. Messwerte (10-min), 2. Regression k, P₀, 3. Unsicherheit Regression $\Delta k, \Delta P_0$, 4. Leistung gemessen (\square) in Turbulenzklassen TI < 9,6 %, alle Daten, TI > 9,6 %, 5. Leistung berechnet (\diamond) mit Regression für Turbulenzklassen

Fig. 5 Analysis of variance P related to σ_v , wind speed class mean value $v = 12.5 \text{ m/s}$; 1. Data (10-min), 2. Regression k, P₀, 3. Uncertainty regression $\Delta k, \Delta P_0$, 4. Power measured (\square) in three turbulence intensity classes TI < 9.6 %, all data, TI > 9.6 %, 5. Power calculated (\diamond) by regression for these turbulence intensity classes

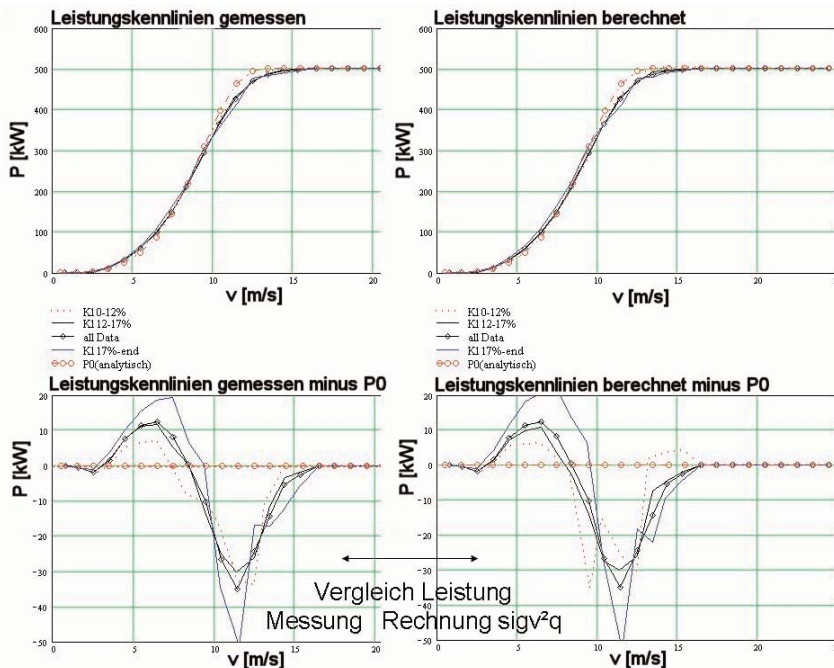


Abb. 6 Vergleich der Leistungskennlinien in Turbulenzklassen; links: Messung, rechts: Rechnung; unten: zur Sichtbarmachung wurde dasselbe $P_0(v)$ von allen Kennlinien abgezogen; Ergebnis: gute Übereinstimmung, im Detail jedoch Unterschiede

Fig. 6 Comparison power curves in turbulence intensity classes; Left: measurement, right: calculation; Below: for demonstration subtraction of the same $P_0(v)$ from all power curves; Result: good correspondence in general, differences in details

| Klasse Turbulenzintensität TI | Mittelwert Turbulenzintensität TI | Messung Energieertrag | Rechnung Energieertrag |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 0-9,6 % | 6,9 % | 98,3 % | 98,7 % |
| alle Daten | 9,6 % | 100 % | 100 % |
| > 9,6 % | 12,6 % | 102,0 % | 101,2 % |

Tab. 1 Jahresenergieerträge für gemessene und berechnete Leistungskennlinien der WEA 1 bei mittlerer Windgeschwindigkeit $v = 6,3$ m/s in Nabenhöhe für drei Turbulenzintensitätsklassen mit Angabe ihrer Grenzen und Mittelwerte

Tab. 1 Annual energy performance for measured and calculated power curves of WEA 1 at mean wind speed $v = 6.3$ m/s at hub height for three turbulence intensity classes, their borders and mean values are noted

| Klasse Turbulenzintensität TI | Mittelwert Turbulenzintensität TI | Messung Energieertrag | Rechnung Energieertrag |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 0-12 % | 8,4 % | 96,4 % | 96,1 % |
| 12 %-17 % | 14,6 % | 99,8 % | 98,9 % |
| alle Daten | 14,62 % | 100 % | 100 % |
| > 17 % | 21,1 % | 103,9 % | 106,1 % |

Tab. 2 Jahresenergieerträge für gemessene und berechnete Leistungskennlinien der WEA 2 bei mittlerer Windgeschwindigkeit $v = 5,2$ m/s in Nabenhöhe für vier Turbulenzintensitätsklassen mit Angabe ihrer Grenzen und Mittelwerte

Tab. 2 Annual energy performance for measured and calculated power curves of WEA 2 at mean wind speed $v = 5.2$ m/s at hub height for four turbulence intensity classes, their borders and mean values are noted

(als v angegeben) entsprechend Nabenhöhe und in Anlehnung an die Referenzerträge nach EEG. Die Differenzen in den Jahresenergieerträgen bei verschiedenen Turbulenzintensitäten sind nicht sehr hoch, sie liegen im Allgemeinen im Prozentbereich. Mit der vorgestellten Varianzanalyse kann ein erheblicher Teil der zu erwartenden Differenzen berechnet werden. Die Extrapolation auf niedrigere Turbulenzintensitäten ist die genauere mit knapp $\frac{1}{2}$ % Unsicherheit bei einem Effekt von 2% bis 4% Abnahme. Die Extrapolation auf höhere Turbulenzintensitäten hat einen positiven, etwas stärkeren Effekt, wobei sich in der Zunahme eine rechnerische Unsicherheit von -1% bis +2% ergibt. In Tabelle 1 und 2 sind untersuchte Turbulenzklassen mit den Grenzwerten der Intervalle, den mittleren Turbulenzintensitäten und den Jahresenergieerträgen notiert. Neben den oben dargestellten Übereinstimmungen und Unsicherheiten in der Berechnung der Energien wird anhand von Tabelle 2 deutlich, dass neben der mittleren Turbulenzintensität die Streuung der Turbulenzintensität ebenfalls, wenn auch einen untergeordneten Einfluss auf die Berechnung der Leistungskennlinie und damit auf die Energie hat. Die Abnahme der Streuung der Turbulenz erzeugt nach Gl. (6) und (7) eine Abnahme des dort eingeführten Faktors, der die Breite der Verteilung beschreibt. Dieser Effekt ist im Allgemeinen schwach, macht sich hier jedoch immerhin bemerkbar, da die zu Grunde gelegte Streuung der Turbulenzen in der Messreihe von Tabelle 2 ungewöhnlich groß ist. Die Untersuchungen der Energieerzeugung pro Geschwindigkeitsintervall ($\Delta E/\Delta v$) zeigt, dass die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Energieerträgen im Wesentlichen im mittleren Teillastbereich entstehen. Grund ist, dass im unteren Teillastbereich Messung und Berechnung der Leistungskennlinien sehr gut übereinstimmen (s.o.) und im oberen Teillastbereich die Windhäufigkeit nachlässt.

6. Krümmung der Leistungskennlinie

Nach Ansatz 2 Gl. (2) wurden die Krümmungen der Leistungskennlinien untersucht. Dazu wurde zum einen numerisch über lokale Polynome die zweite Ableitung von P_0 bestimmt, wobei P_0 aus der Varianzanalyse gewonnen wurde. Zum zweiten wurde die Leistungskennlinie P durch eine analytische Funktion genähert mit einem Ansatz für die erste Ableitung, deren Integral an die Stützwerte der Leistungskennlinie angepasst wurde. Die Lösung von Gl. (2) liefert P_0 . In allen Fällen zeigte sich, dass die Krümmung der Leistungskennlinie im unteren bis mittlerem Teillastbereich bis ca. 10 m/s den Einflussfaktor k unterschätzt, während sie im oberen Teillastbereich (im Bereich der negativen Krümmung) den Einflussfaktor k überschätzt. In Abb. 7 ist dargestellt 2 k aus der Varianzanalyse und die zweite Ableitung von P_0 , wobei hier P_0 aus der Varianzanalyse be-

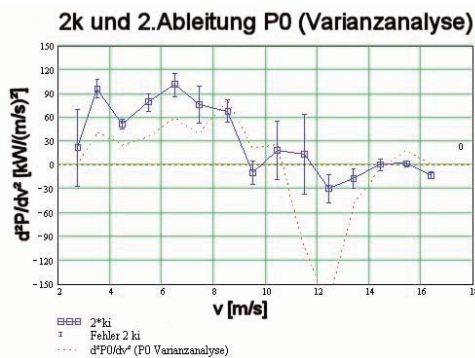


Abb. 7 Abhängigkeit Einflussfaktor k von Windgeschwindigkeit v und Vergleich; $2k$ aus Varianzanalyse (durchgezogen mit Fehlerbalken); Zweite Ableitung Leistungskennlinie (unterbrochen); Ergebnis: Zweite Ableitung unterschätzt bzw. überschätzt k

Fig. 7 Relation influence factors k to wind speed v and comparison; $2k$ from analysis of variance (straight line with uncertainties); Second derivative of power curve (dotted line); Result: second derivative underestimates respectively overestimates k

stimmt wurde. Abb. 8 zeigt die analytische Lösung mit einem ähnlichen Ergebnis. Die Schlussfolgerung ist, dass man mit der Kenntnis der Leistungskennlinie alleine ohne Verwendung der 10-Min-Messwerte nach IEC ihre Änderung bei Wechsel der Turbulenzklasse qualitativ richtig beschreibt. Man erhält jedoch quantitativ genauere Ergebnisse mit der Varianzanalyse und Verwendung der 10-Min-Messwerte.

7. Zusammenfassung

Die Messwerte der Leistungen im Zusammenhang mit der Turbulenz bzw. Standardabweichung unterliegen Streuungen, so dass bei der Ermittlung der Vergleichswerte, die den gemessenen Leistungen in den Turbulenzklassen entsprechen, Streuungen auftreten. Das vorgestellte Verfahren der Varianzanalyse der Standardabweichungen der Windgeschwindigkeiten mit den Daten der Leistungsvermessung bietet die Möglichkeit, mittels extrapolierter Leistungskennlinie P_0 und Einflussfaktoren k Leistungskennlinien in Turbulenzklassen umzurechnen. Die Genauigkeit ist im unteren Teillastbereich sehr gut und nimmt zum oberen Teillastbereich hin sowie bei großen insbesondere positiven Turbulenzintensitätsänderungen ab. Die Änderungen der Jahresenergieerträge liegen im Prozentbereich und werden zu einem erheblichen Teil richtig vorhergesagt. Die Auswertung der Leistungskennlinie alleine nach ihrer Ableitung liefert qualitativ richtige Prognosen, quantitativ bietet die Varianzanalyse genauere Werte.

8. Dank

Dank an die Mitarbeiter des DEWI Wilhelmshaven für ihre kompetente und kollegiale Unterstützung dieses Forschungsprojektes, insbesondere an Dr. Helmut Klug, Martin Strack, Harald Mellinghoff, Ulrike Bunse, Andreas Jansen, Jürgen Rohlje sowie an Axel Albers, WindGuard Varel.

9. Literatur

- [1] Albers, Axel; Hinsch, Christian (1996): Abhängigkeit des Leistungsverhaltens großer Windenergieanlagen von verschiedenen meteorologischen Parametern, DEWI Magazin, Nr. 9, Aug. 1996
- [2] Kaiser, Klaus; Hohlen, Harald; Langreder, Wiebke (2003): Turbulence Correction for Power Curves, EWEC 2003, Madrid
- [3] Bendat, J.S.; Piersol, A.G. (1986): Random Data, Analysis and Measurement Procedures, John Wiley & Sons Inc., New York
- [4] IEC 61400-12 (1998): Wind Turbine Generator Systems - Part 12: Wind Turbine Power Performance Testing
- [5] Stöcker, H. (Hrsg.) (1999): Taschenbuch mathematischer Formeln und moderner Verfahren, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt

Leistungskennlinie P , P_0 , 1. und 2. Ableitungen, $2k$

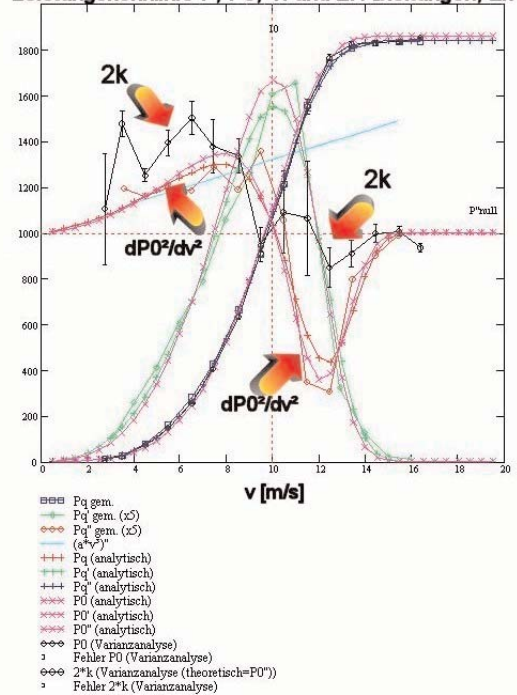


Abb. 8 Vergleich: $2k$ aus Varianzanalyse (schwarz mit Fehlerbalken); Zweite Ableitung P_0 (lila mit x); Ergebnis: Zweite Ableitung unterschätzt bzw. überschätzt k

Fig. 8 Comparison: $2k$ from analysis of variance (black line with uncertainties); Second derivative P_0 (violet line marked by x); Result: second derivative underestimates respectively overestimates k