

Anemometerkalibration oder „Die Antwort weiß ganz allein der Wind“ Anemometer Calibration or „The answer is blowin' in the wind“

Klug, Helmut; Westermann, Dieter; DEWI

Summary

Since March 1995 DEWI is accredited according to EN 45001 in the field of anemometer calibration for wind energy applications. Wind speed measurements are of crucial importance for the economics of wind turbine projects. The accuracy of measured power curves is strongly dependant on the wind measurement uncertainty. Harmonisation of wind speed and power curve measurements allows the customer a comparison of different wind turbines and the manufacturer to guarantee a power curve for a series of wind turbines of the same type. European studies have demonstrated that the required accuracy for wind speed measurements is far from being obtained. DEWI is co-ordinating a Sub-Project on wind speed measurements in the frame of an EU-Project in order to develop recommendations which will harmonise test, measuring, calibrating and evaluating techniques for wind turbines. DEWI used a LASER Doppler System (LDA) to examine the flow field around an anemometer in the wind tunnel of the University of Oldenburg in order to prove that the wind tunnel is suitable for anemometer calibrations with the desired accuracy of better than 0.1 m/s. Calibrating the same anemometer again at different days DEWI reached in the meantime a reproducibility of better than 0.1% (see Table 1). Investigations on temperature effects on anemometer calibration (cooling the anemometer) and on the boom effect at the DEWI-130m meteorological mast were also performed (calibration of a met-mast system by an undisturbed anemometer on the top of an additional mast).

1. Einleitung

Das DEWI wurde als erstes deutsches Institut im April 1995 nach EN 45001 für Anemometerkalibration im Bereich Windenergie akkreditiert. Warum haben wir den hohen Aufwand betrieben, ein hochgenaues, reproduzierbares Kalibrationsverfahren zu entwickeln, ausschließlich Meßsensoren mit individuellem Kalibrierzeugnis einzusetzen und das Strömungsfeld im Windkanal und die Umströmung des Anemometers mit einem LDA (LASER-Doppler-System) zu vermessen?

2. Einfluß von Anemometerkalibrationen auf die Leistungskennlinie einer WKA

Schon vor einigen Jahren trat das Problem auf, daß an Windkraftanlagen des gleichen Typs sehr unterschiedliche Leistungskurven gemessen wurden. Das führte zu Abweichungen in den Energieertragsrechnungen um bis zu 12%. Für den potentiellen Betreiber einer WKA kann das statt zu erhofften Gewinnen zu schmerzhaften Verlusten führen. Das DEWI führte damals eine Vergleichsmessung durch und es stellte sich heraus, daß der enorme Unterschied in den Leistungskurven alleine dadurch bedingt war, daß die verwendeten Anemometer in unterschiedlichen Windkanälen kalibriert waren. Wegen der in großen Windgeschwindigkeitsbereichen von der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit abhängigen elektrischen Leistung einer WKA führt schon eine um 0.3 m/s fehlerhafte Anemometerkalibration zu etwa 10% Fehler bei der Berechnung des Jahresenergieertrages. Auch der an sich lohnende Aufwand, in größeren Höhen für einen längeren Zeitraum Wind zu messen, um eine möglichst genaue Ertragsrechnung für eine geplante WKA durchführen zu können, wird ad absurdum geführt, wenn keine individuell kalibrierten Anemometer verwendet werden.

3. Europäische Untersuchung der Kalibrationsverfahren

Wie sich bei einer 1994/95 durchgeführten Untersuchung in unterschiedlichen europäischen Windkanälen herausstellte, ist Kalibration nicht unbedingt gleich Kalibration. Selbst in Windkanälen anerkannter meteorologischer Institute können für den Bereich Windenergie nicht akzeptable Meßunsicherheiten bei der Kalibration auftreten. Offensichtlich spielten in der Meteorologie Unsicherheiten bei der Windgeschwindigkeit von wenigen Zehntel m/s bisher keine große Rolle. Das DEWI betreibt und betreibt einen nicht unerheblichen Aufwand, um diese Situation zu verbessern. So koordi-

nirt das DEWI ein EU - Forschungsprojekt, an dem sechs europäische Forschungsinstitute beteiligt sind, die Anemometer kalibrieren. Zu Beginn des Projektes ausgetauschte und in jedem Windkanal kalibrierte Anemometer wichen in ihrer Kalibration um bis zu 3.7% (bei 8m/s) ab [1]. Nach intensiver Ursachenforschung und weiteren Vergleichsmessungen unterscheiden sich inzwischen keine der neueren Messungen um mehr als 1% [2]. Bereits im Vorfeld dieser Untersuchung fand ein gegenseitiger Austausch von Anemometern mit WINDTEST statt. Hierbei zeigte sich allerdings, im Gegensatz zu den Vergleichen mit europäischen Testfeldern, eine gute Übereinstimmung der Kalibrationsergebnisse.

4. Einflüsse und Anforderungen an das Kalibrationsverfahren

Die Ursachen für fehlerhafte Anemometerkalibrationen können sehr vielfältig sein. Zunächst muß der Windkanal dafür geeignet sein. Viele Windkanäle sind zu klein (bzw. die Anemometer zu groß). Das Strömungsfeld im Windkanal muß in dem Volumen, in dem das Anemometer später plaziert wird, sehr homogen sein. Das DEWI kalibriert mit eigenem Meß- und Auswerteverfahren im Windkanal der Universität Oldenburg, zu dem auch ein kurzfristiger Zugang gewährleistet ist. Dieser Windkanal wurde im Auftrag des DEWI mit Hilfe eines LDA (LASER-Doppler-System) vermessen. Über mehrere Wochen wurde in Schritten von wenigen Zentimetern das gesamte Strömungsvolumen (mit und ohne Anemometer) bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten (4 bis 12 m/s) vermessen. Die Strömungsgeschwindigkeit weicht im Meßvolumen um weniger als 0.1% ab [1]. Mit Hilfe der LDA - Messungen wurde bei der Umströmung des Anemometers die Position der Referenzmessung (Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe von Staudrucksonden) bestimmt. Der Referenzpunkt muß einerseits im ungestörten Fall (ohne Anemometer) die gleiche Strömungsgeschwindigkeit aufweisen wie die Anemometerposition, was durch die Homogenitätsmessung nachgewiesen wurde, andererseits darf die Strömung an der Referenzposition nicht vom Anemometer beeinflusst sein.

Die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt über den Differenzdruck (Δp) mit Hilfe von Staudrucksonden und elektronischen Differenzdruckdosen gemäß Gleichung 1.

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p RT}{B}} \quad (1)$$

(B = Barometrischer Luftdruck, T = Lufttemperatur, R = Gaskonstante)

Aufgrund der geringen Abhängigkeit der Luftdichte von der Wasserdampfmenge empfiehlt sich auch eine Berücksichtigung der Luftfeuchte. Damit eine nachvollziehbare Kalibration erfolgen kann, müssen die notwendigen Sensoren mit hinreichender Genauigkeit individuell kalibriert und geeicht werden. Die aus den Meßwerten ermittelte Regressionsgerade muß einen Korrelationskoeffizienten von 0.99995 oder besser aufweisen, da ansonsten entweder das Meßverfahren ungenau ist, oder das Anemometer ein nichtlineares Verhalten aufweist, wodurch detailliertere Messungen notwendig werden. Der Meßbereich muß auf die Anwendung im Bereich Windenergie abgestimmt sein. Eine hohe Genauigkeit ist demnach bei Windgeschwindigkeiten zwischen 4 m/s und 16 m/s gefordert, da oberhalb dieser Geschwindigkeiten das Leistungsverhalten einer WKA nicht von kleinen Windgeschwindigkeitsänderungen abhängig ist. Eine Kalibration bis zu einer Windgeschwindigkeit von 25 oder gar 40 m/s führt in der Regel zu größeren Meßunsicherheiten im relevanten Windgeschwindigkeitsbereich bis 16 m/s.

Die Abbildung zeigt den gemessenen Zusammenhang zwischen der Luftströmung im Windkanal (Y1) und der abgegebenen Frequenz (Abszisse) des Schalensternanemometers. Der mathematische Zusammenhang, ermittelt nach der Methode der kleinsten quadratischen Abweichung, lautet für den Geschwindigkeitsbereich von 4m/s - 16 m/s :

$$v=0.04806(m)*\text{Frequenz (1/s)} + 0.476 \text{ m/s [m/s]}$$

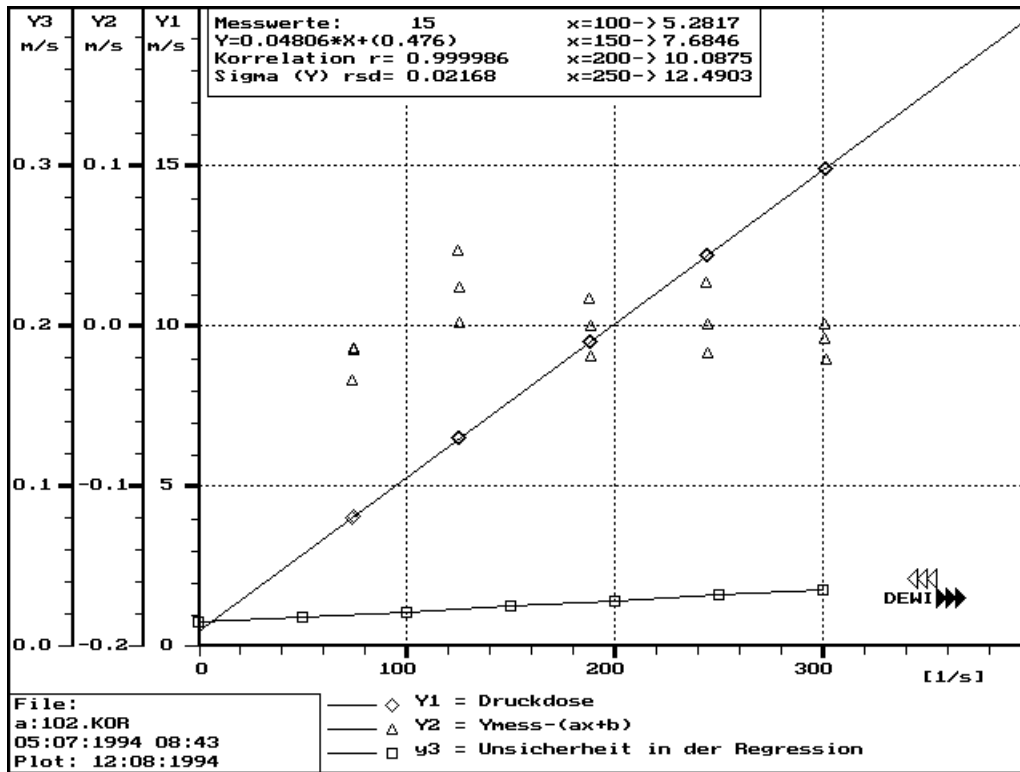


Abb. 1: Beispiel einer durchgeführten Kalibration
 Fig. 1: Example of a realized calibration

Der Korrelationskoeffizient beträgt 0.999986. Die Abweichung der gemessenen Werte (Y2) von der Regressionsgeraden liegt zwischen 0 und max. 0.04 m/s. Der Graph Y3 kennzeichnet die Ungenauigkeit in der angenommenen Linearität des Anemometers, die sich aus einem Steigungsfehler, einem Offsetfehler und der Kovarianz aus beiden Unsicherheiten ergibt [2].

Bei geschlossenen Windkanälen ist eine Korrektur notwendig (blockage-effect), die zusätzliche Unsicherheiten mit sich bringt [8]. Bei offenen Meßstrecken muß gewährleistet sein, daß bei der Umströmung des Anemometers der Randbereich unbeeinflusst bleibt, was vom DEWI ebenfalls durch LDA-Messungen belegt wurde. Bei jeder Kalibration wird vor und nach der Messung der gesamte Meßaufbau mit Hilfe eines Referenzanemometers kalibriert. Hierdurch wird die Stabilität des Meßverfahrens überprüft. Das DEWI hat bei fünfmaliger Wiederholung der Kalibration des selben Anemometers an unterschiedlichen Tagen, inzwischen eine Reproduzierbarkeit mit einer Abweichung von unter 0.1% erreicht (Siehe Tabelle 1).

Datum	a	b	m/s (160 1/s)	Δv (m/s)	%
	-	Mittelwert	8.195	--	--
08.07.94	0.04864	0.406	8.188	- 0.007	- 0.08
17.10.94	0.04873	0.401	8.198	+ 0.003	+ 0.04
18.10.94	0.04877	0.388	8.192	- 0.003	- 0.04
15.11.94	0.04898	0.352	8.189	- 0.006	- 0.07
13.12.94	0.04875	0.397	8.197	+ 0.002	+ 0.02

Tab. 1: Reproduzierbarkeit der vom DEWI durchgeführten Anemometerkalibrationen (DEWI 100)
 a= Steigung, b = Offset

Tab. 1: Reproducibility of an anemometer calibration realized by DEWI (DEWI 100)
 a= gradient, b = offset

Auch werden die vom DEWI benutzten Anemometer vor jedem neuen Einsatz wieder neu kalibriert, um Veränderungen durch die Lagerreibung oder am aerodynamischen Verhalten der Schalen auszuschließen.

Wie innerhalb des EU-Projektes an einem dänischen Institut durchgeführte Messungen zeigten, weist die Lagerreibung einiger Anemometer eine Temperaturabhängigkeit auf, die beim Einsatz der Anemometer vor Ort bei niedrigen Temperaturen zu fehlerhaften Windgeschwindigkeitsmessungen führt. Deshalb sollte für jeden Anemometertyp eine Untersuchung des Temperaturverhaltens durchgeführt werden. Das DEWI hat ein Anemometer im Winkanal auf 0° gekühlt und dann bei einer Geschwindigkeit von 8 m/s im Temperaturbereich 0° bis 20° kalibriert und nachgewiesen, daß dieser Effekt bei dem von DEWI verwendeten Anemometertyp nicht auftritt. Um die Windgeschwindigkeit vor Ort ungestört messen zu können, muß das Anemometer auf die Spitze des Meßmastes befestigt werden. Jede Befestigung seitlich des Mastes mit Auslegern führt zu zusätzlichen Meßfehlern. Da sich z.B. beim 130m-Meßmast des DEWI, mit Hilfe dessen die Leistungskurve der AEOLUSII-3MW-Anlage mit einer Nabenhöhe von 92 m bestimmt wird, eine Befestigung des Anemometers an Auslegern nicht vermeiden ließ, wurde hier eine Kalibration des gesamten Meßmastes durchgeführt (in einer Höhe von 30 m, da die Ausleger in allen Höhen identisch sind). Es wurde in 40 m Abstand ein mobiler 30 m-Mast errichtet und für alle Windrichtungen in 10°-Schritten, der Einfluß des 130m-Meßmastes und der Ausleger untersucht [3].

Am Beispiel der Anemometerkalibration wurde im Rahmen des vom DEWI koordinierten EU-Projektes Anemometerkalibration, das ein Teilprojekt innerhalb eines größeren Harmonisierungsprojektes darstellt, gezeigt, wie durch eine solche Harmonisierung von Meßmethoden ein weiterer Schritt in Richtung Vergleichbarkeit und Zuverlässigkeit der Messungen der am Projekt beteiligten Meßinstitute erreicht werden kann. Es werden derzeit daraus abgeleitete Empfehlungen zur Anemometerkalibration erstellt, die Anfang des Jahres 1996 zugänglich sein werden.

5. Literatur

- [1] Westermann, D.: European Wind Turbine Standards EWTS-IV 94-11 DEWI 1994 Technical Note
- [2] Klug, H.; Westermann, D.: European Wind Turbine Standards EWTS-IV 94-28 DEWI 1994 Progress Report
- [3] Kleihauer, C.: European Wind Turbine Standards EWTS-IV 94-32 DEWI 1994 Technical Note
- [4] ISO 3966: Measurement of fluid flow in closed conduits, 1977
- [5] Rymond S. Hunter: The accuracy of cup anemometer calibration, Wind Engineering Vol. 14, 1982
- [6] EG Report 12/1989 Recommendations on the use of cup anemometry EUEC 25 225/89 National Engineering Laboratory, UK
- [7] NLR Memorandum 2/1992 Calibration of Anemometers in the LST AX-92-003 U National Aerospace Laboratory Netherlands
- [8] Maskell 1965 A Theory of the Blockage Effects

Inserentenliste

Allianz Ingo Gatkowsky , Jever	83	LMW , Groningen, NL	31
AN Maschinenbau , Bremen	7	NES , Langenselbold	2
DEWI , Wilhelmshaven	72,73	Norddeutsche Universitätsgesellschaft ,	
Enercon , Aurich	15	Wilhelmshaven	51
Energie Kontor , Bremen	67	Nordex , Melle	27
eNova , Leer	43	Nordtank , Ostenfeld,	23
Fries & Partner , Hamburg	97	Sonnenenergie und Wärmetechnik , Bielefeld	25
Gotek , Frankfurt	19	Südwind , Berlin	33
Hessen Wind , Wiesbaden	81	Tacke Windtechnik , Salzbergen	5, 9
Husumer Wirtschaftsgesellschaft , Husum	69	Vestas Deutschland , Husum	98
Land un Lüü , Leer	45	WINKRA-RECOM , Hannover	13