

Anwendung von Sodar-Messungen in der Windenergienutzung

The use of sodars in respect to wind energy applications

Albers, Axel; Klug, Helmut; DEWI

Summary

Wind measurements with good temporal and spatial resolution are indispensable to characterise the site conditions for the installation of wind turbines or wind parks, especially in coastal or complex terrain, as well as to study the wind and turbulence fields around existing wind turbines and the relationship between these fields and the operating parameters of the turbine itself (loads, power output). Typically such measurements are carried out using special tall masts. However, for hub heights larger than about 50 m, mast measurements become more and more impracticable due to the high installation expenditure and the lack of mobility. Remote sensing techniques based on the propagation of sound waves (sodar=sound detection and ranging) are considered to be an alternative to mast measurements, because they do not require high installation expenditure, do not cause any flow distortion and they provide continuous information not only at a few selected levels but over the full height range of interest. Doppler sodars are used for about twenty years, but their application to wind energy relevant problems has been surprisingly limited in the past [1-3]. Therefore in 1994, the European Community supported the project SODAR for Siting and Operating of Wind Energy Converters (SOSOWEC) in the framework of the Joule 2 programme to introduce the method of acoustic remote sensing to the wind energy society.

The SOSOWEC project, which was co-ordinated by DEWI, showed that sodar systems are able to provide reliable wind measurements in the vicinity of wind turbines with high temporal and vertical resolution over a height range between about 20 m and 150 m and over a wind speed range up to about 12-15 m/s. Direct comparisons between sodar measurements and mast mounted cup anemometers led to correlation coefficients greater than 0.91 and average deviations in the wind speed from 0.1 m/s in flat terrain to 0.6 m/s in complex terrain. The average deviation in the determination of the wind direction was about 3°. The project confirmed, that the mobility and flexibility of sodar systems provides a lot of advantages when compared to meteorological masts, especially for measurements at heights above 50-60m.

After the general suitability of the sodar technique for wind energy applications has been shown, a future project proposed to the European Union focuses on the demonstration, how different wind energy relevant tasks, e.g. power curve measurements, can be solved using acoustic sounders, and on the further adaptation of sodar systems to these purposes.

1. Einleitung

Für meßtechnische Untersuchungen von Windkraftanlagen (WKA) sowie für die Charakterisierung von Standortbedingungen sind Messungen des Wind- und Turbulenzfeldes unersetzlich. Bislang wurden in Fragen der Windenergienutzung Windmessungen zumeist mit auf Masten installierten Sensoren durchgeführt. Mit dem Trend zu größeren WKA werden Mastmessungen zunehmend impraktikabel, da der Aufwand für die Mastinstallation überproportional mit der Masthöhe anwächst. Ferner haben die fest installierten Masten den Nachteil, nur für gesonderte Windrichtungen der Meßaufgabe entsprechend positioniert zu sein. Auf der Suche nach alternativen Windmeßmethoden erscheint vor allem die indirekte Windmessung mit Hilfe des akustischen Fernsondierungsverfahrens (Sodar=Sound detection and ranging) geeignet, da mit vergleichsweise geringem Aufwand eine hohe Informationsdichte und Datenverfügbarkeit erreichbar wird. Doppler-Sodar-Geräte werden seit etwa 20 Jahren betrieben, jedoch sind in Verbindung mit Fragen der Windenergienutzung international bisher nur wenige Einsätze bekannt [1-3]. Um die Sodar-Technik für die Windenergienutzung zugänglich zu machen, wurde 1994 im Rahmen des Joule 2 Programms von der Europäischen Gemeinschaft das vom DEWI koordinierte Projekt SODAR for Siting and Operating of Wind Energy Converters (SOSOWEC) unterstützt [4], welches Hauptbestandteil dieser Berichterstattung sein soll.

2. Funktionsweise von Sodars

Bei der Sodar-Technik werden vom Boden ausgesandte Schallwellen aufgrund von Inhomogenitäten des akustischen Brechungsindex in der atmosphärischen Grenzschicht reflektiert und dann am Boden

wieder empfangen. Die Inhomogenitäten des akustischen Brechungsindex entstehen durch kleinräumige, turbulente Strukturen des Wind- bzw. Temperaturfeldes. Der Schall erfährt durch den Transport mit dem mittleren Wind eine Doppler-Verschiebung in der Frequenz, aus welcher auf die Windgeschwindigkeit in dem jeweiligen Streuvolumen geschlossen werden kann. Die Frequenzverschiebung ist der momentanen Windgeschwindigkeit radial in Ausbreitungsrichtung des Schallstrahls proportional. Durch eine geeignete Positionierung und Ausrichtung mehrerer Sende- und Empfangsantennen kann eine Bestimmung aller drei Komponenten des Windvektors erreicht werden. Im Gegensatz zu Mastmessungen, bei denen der Wind nur auf diskreten Höhen gemessen wird, ermöglichen Sodars eine instantane Windfeldbestimmung über den gesamten Höhenbereich.

Bei dem klassischen Sodar werden die drei Antennensysteme, entsprechend der drei Raumrichtungen, nacheinander betrieben, wobei die Schallaussendung und der Empfang jeweils mit ein und derselben Antenne erfolgen (monostatischer Betrieb). Die Wiederholrate der Messung hängt von der Schallausbreitungsgeschwindigkeit und dem erwünschten Höhenbereich ab. Für eine Maximalhöhe von 200 m ist eine Wiederholrate von 5 Sekunden typisch. Die Messung der drei Windgeschwindigkeitskomponenten erfolgt somit in räumlich verschiedenen Streuvolumina und zu verschiedenen Zeitpunkten, wodurch eine Mittlung der Daten über ca. 10 einzelne Meßzyklen erforderlich wird.

Eine Erhöhung der zeitlichen Auflösung kann durch die Verwendung getrennter Antennen für die Schallaussendung und den Empfang (bistatischer Modus), eine Erhöhung der Schallfrequenz oder durch die Verwendung geringfügig unterschiedlicher Schallfrequenzen für die drei Raumrichtungen erreicht werden. Ferner kann durch eine räumliche Trennung der Antennen auf dem Boden ein identisches Streuvolumen für alle drei Windkomponenten erzielt werden.

Doppler-Sodar-Geräte finden bislang vor allem in der Umweltüberwachung und Meteorologie ihre Anwendung [5]. Entsprechend ist der Höhenbereich heute kommerziell erhältlicher Geräte in der Größenordnung 50-500 m und somit kaum dem für die Windenergie interessanten Bereich bis ca. 150 m angepaßt. Um den Bereich 20 - 150m abzudecken, können sogenannte Minisodars eingesetzt werden. Diese arbeiten mit einer erhöhten Schallfrequenz von ca. 4-6 kHz - klassisches Sodar: 1.5-2.5 kHz - und erreichen eine Höhenauflösung von ca. 1-10 m sowie eine Zeitauflösung von ca. 1 Sekunde.

3. Ergebnisse des SOSOWEC-Projektes

Im Rahmen des SOSOWEC-Projektes haben das Fraunhofer-Institut für atmosphärische Umweltforschung, Institutsteil Berlin, die Universität Athen, die Universität Oldenburg sowie der italienische Konzern Alenia unter der Koordination des DEWI Meßkampagnen mit Sodars in verschiedenen Windparks und an größeren WKA im In- und Ausland durchgeführt. Windmessungen mittels Sodar konnten stromaufwärts und in der Nachlaufströmung (Wake) von Windenergiekonvertern bis zu einem Minimalabstand von ca. einem Rotordurchmesser von den untersuchten WKA erfolgreich vollzogen werden. Dabei zeigte sich, daß Sodars sowohl zur Ermittlung der mittleren Windgeschwindigkeit und Windrichtung als auch zur Messung der Turbulenz über den vollen Höhenbereich der Rotoren selbst großer WKA mit einer Höhenauflösung von unter 10 m geeignet sind. In Abb. 1 ist exemplarisch die Vermessung der Nachlaufströmung der nahe Wilhelmshaven installierten WKA Aeolus II (92 m Nabenhöhe, 3000 kW Nennleistung) per Sodar wiedergegeben.

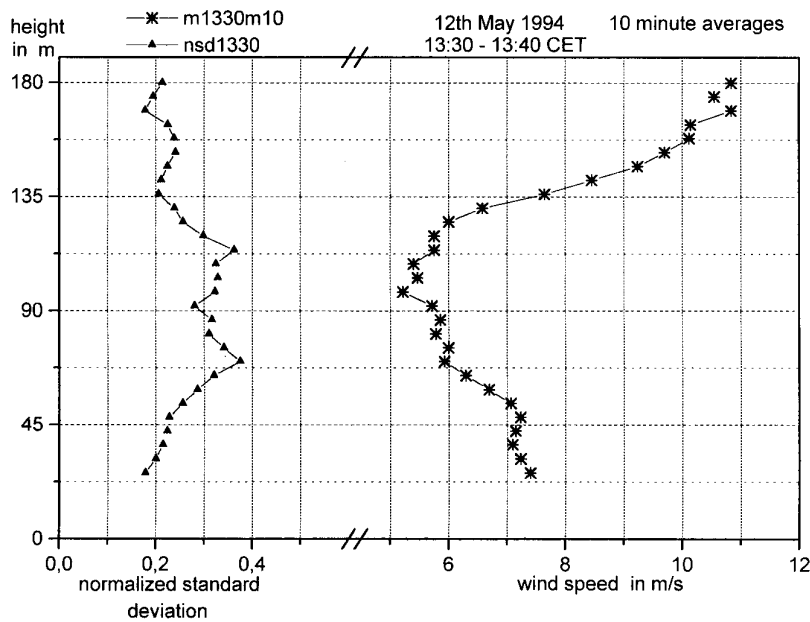


Abb. 1: Windmessungen via Sodars ca. zwei Rotordurchmesser stromabwärts des Aeolus II. Dank der guten Höhenauflösung des Sodars konnten die vertikalen Profile der mittleren Windgeschwindigkeit (rechts) sowie der Turbulenzintensität (links) detailliert gemessen werden. Der Einbruch der mittleren Windgeschwindigkeit sowie die erhöhte Turbulenz auf Höhe der Rotors (50-130 m) ist deutlich zu erkennen.

Fig. 1: Wind measurements by Sodars about two rotor diameters downstream of the Aeolus II. Due to their good height resolution sodars allow detailed measurements of vertical profiles of the wind speed (right) and turbulence intensity (left) in wakes. From the measurements the wind speed deficit and increased turbulence intensity at rotor level (50-130 m) is obvious.

Folgende generelle Ergebnisse konnten während des SOSOWEC-Projektes erzielt werden:

- Klassische Sodars konnten nach einer Anpassung der Betriebsparameter erfolgreich eingesetzt werden. Durch eine Abstimmung insbesondere der Schallfrequenz war der Höhenbereich auf die Meßaufgabe einzustellen und eine Beeinflussung der Messung durch die Schallemission der Windkraftanlagen zu vermeiden.
- Die große Mobilität und Flexibilität von Sodars-Systemen wurde unter Beweis gestellt. Änderungen der Positionen der Sodars wie auch der Antennenkonfigurationen waren innerhalb einer Stunde durchführbar. Aufgrund der Mobilität konnten Spezialaufgaben wie Wakemessungen oder Messungen vor dem Rotor sehr zügig durchgeführt werden, weil die Position schnell der aktuellen Windrichtung nachgeführt werden konnte.
- Unterschiedliche Antennenkonfigurationen konnten für die verschiedenen Meßaufgaben gefunden werden. Die klassische Anordnung dreier Antennen nebeneinander (Messung der drei Windkomponenten) eignet sich für die Bestimmung des Windprofils in großer Entfernung von Windkraftanlagen. Hingegen erlaubt die Platzierung der drei Antennen an unterschiedlichen Orten die Bestimmung des Windvektors in einer bestimmten Höhe (z.B. Nabenhöhe) in dem gleichen Volumen. Diese Konfiguration eignet sich für Messungen in unmittelbarer Nähe des Rotors. Schließlich können die drei Antennen völlig separat zur gleichzeitigen Messung jeweils der gleichen Windkomponente an unterschiedlichen Orten eingesetzt werden. Somit ist es z. B. möglich in verschiedenen Abständen vom Rotor mit nur einem Sodars gleichzeitig zu messen, um die Wake einer WKA zu bestimmen.

Die wesentlichen Eigenschaften von Sodars-Messungen im Vergleich zu Mastmessungen im Hinblick auf Anwendungen in der Windenergienutzung sind in Tabelle 1 zusammengetragen.

Eigenschaft	Mast	Sodars
Höhenbereich	10-60 m (darüber aufwendig)	15-200 m
Höhenauflösung	5-20 m, steigende Kosten mit höherer	gleichzeitige Messung auf ca.

	Auflösung	30 Höhen ohne Kostenanstieg
Zeitauflösung	1-20 Hz	0.1-1 Hz
Meßprinzip	Punktmessung	Volumenmittlung
Positionierung	fest	mobil
Aufwand	exponentiell mit Höhe steigend; Baugenehmigung	unabhängig vom Höhenbereich; keine Genehmigung erforderlich
Beeinflussung der Messung	Beeinflussung der Sensoren durch Umströmung des Mastes	keine Beeinflussung der Strömung wegen Bodenmontage

Tab. 1: Eigenschaften von Mast- und Sodar-Messungen.

Tab. 1: Operating characteristics of mast and sodar for wind measurements.

Um die Genauigkeit der Sodar-Messungen zu überprüfen, wurden im SOSOWEC-Projekt direkte Vergleiche mit auf Masten montierten Schalensternanemometern in einem Windgeschwindigkeitsbereich von 1 m/s bis ca. 18 m/s durchgeführt. In Abb. 2 und Abb. 3 sind per Mastmessung und Sodar simultan aufgenommene Zeitreihen bzw. Höhenprofile der Windgeschwindigkeit dargestellt. Im allgemeinen konnte eine gute Übereinstimmung beider Meßprinzipien sowohl bzgl. der Windgeschwindigkeitsmessung als auch hinsichtlich der Windrichtungsbestimmung festgestellt werden. So waren die aus den Vergleichsmessungen gebildeten Korrelationskoeffizienten durchweg über 0.91 und die mittleren Abweichungen beider Messungen betragen in der Windgeschwindigkeit 0.1 m/s in flachem Gelände bis 0.6 m/s in komplexem Gelände bzw. ca. 3 Grad in der Windrichtung. Bei der Beurteilung dieser Werte ist zu berücksichtigen, daß geringfügige Unterschiede der Meßergebnisse schon auf der Verschiedenartigkeit der Prinzipien - Volumenmittlung und Punktmessung - beruhen können und nicht unbedingt einen Meßfehler der Sodars bedeuten. Ferner ist zu bedenken, daß auch die Anemometermessungen mit Fehlern in der Größenordnung der gemessenen Abweichungen - z. B. bedingt durch Kalibrationsfehler und Störungen des Windfeldes durch Mast und Ausleger - behaftet sein können. Angesichts der räumlichen Ausdehnung von WKA-Rotoren dürfte die mit Sodars verbundene Volumenmittlungsmethode für die meisten Anwendungen relevantere Ergebnisse liefern als eine Punktmessung.

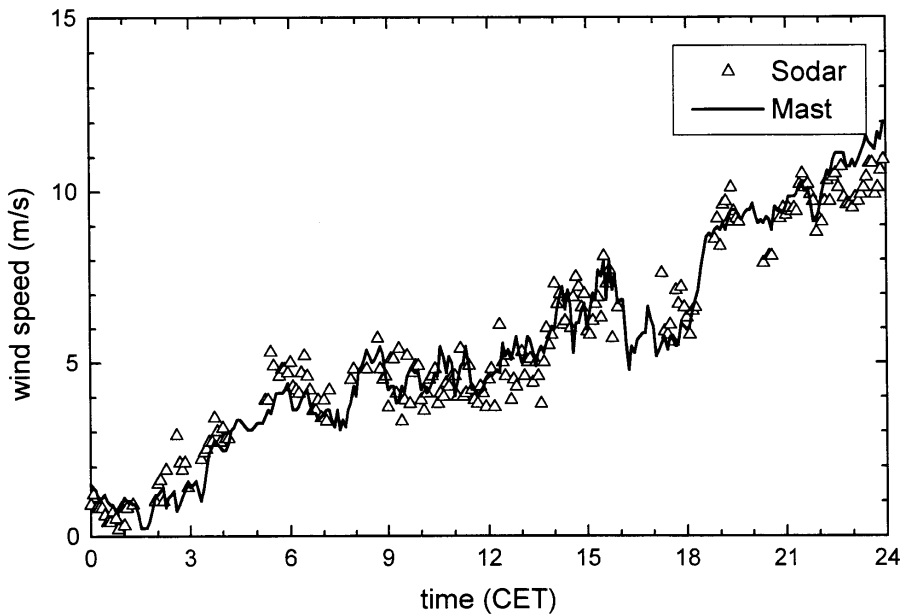


Abb. 2: Vergleich von Sodar-messungen mit auf Masten montierten Schalensternanemometern auf einer Höhe von 90 m.

Fig. 2: Comparison of wind measurements by Sodar and mast mounted cup anemometers at a height of 90 m.

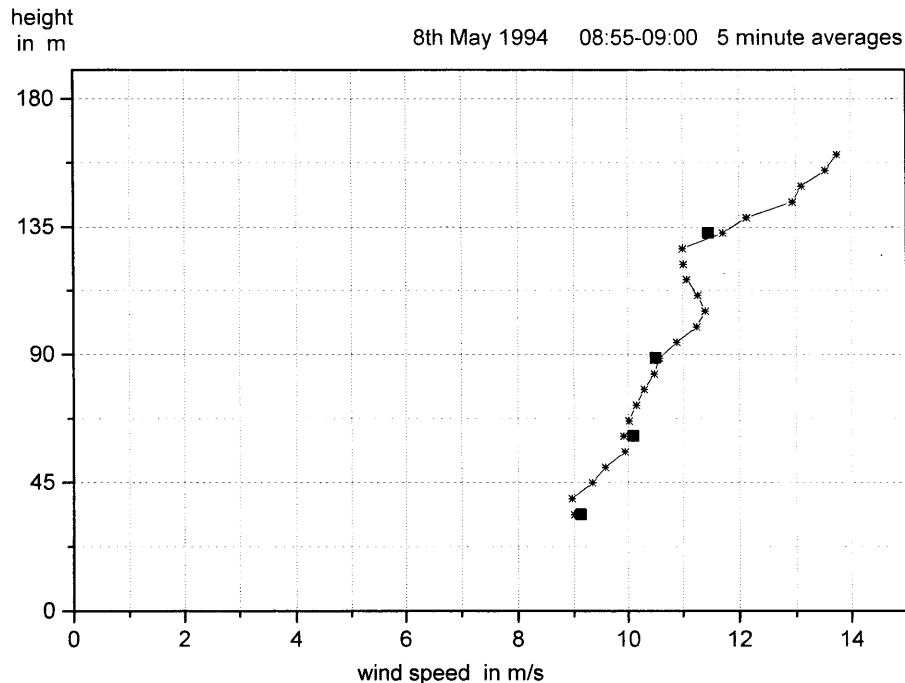


Abb. 3: Mittels Sodar (*) und Meßmast (■) gemessenes Höhenprofil der Windgeschwindigkeit.
Fig. 3: Vertical profile of the wind speed measured by sodar and mast mounted cup anemometers.

4. Schlußfolgerungen

Das SOSOWEC-Projekt hat die Tauglichkeit von Sodar-Systemen als verlässliches Windmeßinstrument mit hoher zeitlicher und vertikaler Auflösung über einen Höhenbereich von 20-150 m in dem für die Windenergienutzung besonders wichtigen Windgeschwindigkeitsbereich bis ca. 12-15 m/s bewiesen. Die Mobilität und Flexibilität bietet viele Vorteile im Vergleich zu Meßmasten, vor allem für Messungen in Höhen über 50-60 m. Bei der Europäischen Union wurde ein Folgeprojekt beantragt, bei dem die Anwendung von Sodars für konkrete Meßaufgaben wie z. B. Leistungskurvenvermessungen, sowie die weitere Anpassung von Sodar-Systemen an Anforderungen der Windenergie im Vordergrund stehen.

5. Literatur

- [1] Högström, U.; Asimakopoulos, D. N.; Kambezidis, H.; Helmis, C. G.; Smedman, A.: A field study of the wake behind a 2 MW wind turbine. *Atmos. Environm.* 22 (1988), 803-820.
- [2] Kambezidis, H.; Asimakopoulos, D. N.; Helmis, C. G.: Wake measurements behind a horizontal-axis 50 kW wind turbine. *Solar & Wind Technol.*, 7 (1990), 177-184.
- [3] Schomburg, A.; Klug, H.; Mellert, V.; de Witt, U.; Waldl H. P.: Einsatz eines Mini-Sodars zur Untersuchung von Turbulenz in einem Windpark. DEWK 92 Tagungsband(1992), 125-129.
- [4] Albers, A.; Asimakopoulos, D. N., Berteotti, C., Beyrich, F.; Handwerker, J.; Helmis, C. G., Kalaß, D.; Klug, H., Mellert, V.; Schomburg, A., Tombrou, M., Waldl, H. P., Weisensee, U.: SODAR for Siting and Operating of Wind Energy Converters, SOSOWEC, report, (JOU2-CT93-0424). DEWI, February 1995.
- [5] Beyrich, F.: On the use of sodar data to estimate mixing height. *Appl. Phys. B*.