

# Zeitlich und räumlich hoch aufgelöste SODAR Messungen des Windvektors

M. Freitag, J. Handwerker, V. Mellert

FB Physik, Arbeitsgruppen Akustik und Energie- und Halbleiterforschung,  
Carl von Ossietzky Universität, 26111 Oldenburg, Postfach 2503,  
Tel. 0441-798-3338, Fax 0441-798-3326

## Zusammenfassung

Erste Messungen mit einem speziell für den Einsatz im Bereich Windenergie konstruierten SODAR werden vorgestellt. Mit diesem SODAR kann der vollständige Windvektor über ein ganzes Höhenprofil mit einer räumlichen Auflösung von ca. 3,5 m und einer zeitlichen Auflösung von ca. 20 s vermessen werden. Die Höhe des Profils ist zur Zeit durch die Richtcharakteristik der Empfänger beschränkt.

## 1. Einleitung

Als akustisches Fernerkundungsverfahren für Windgeschwindigkeiten ist das SODAR<sup>1</sup> in mancher Hinsicht Meßmasten überlegen: es ist mobil, erzeugt keinen Mastschatten, liefert stets ein Profil der Windgeschwindigkeit statt einer Einzelpunktmessung und kann bei feiner räumlicher Auflösung größere Höhen erreichen. Mit der Entwicklung zu immer größeren Nabenhöhen und größeren Rotordurchmessern wird es schwieriger, mit Meßmasten Informationen z.B. über das einströmende Windfeld zu erlangen. Es wird fraglich, ob Windmessungen nur auf Nabenhöhe noch ausreichend sind (siehe z.B. [3]).

Um den Windvektor zu vermessen, werden normalerweise drei monostatisch arbeitende SODAR-Antennen verwendet, die an einem Ort stehen und in unterschiedliche Richtungen orientiert sind. Jede Antenne ermittelt eine Komponente der Windgeschwindigkeit. Aus Ihnen wird der Windvektor berechnet.

Die Streuvolumina, die von den einzelnen Antennen „gesehen“ werden, liegen bei dieser Anordnung

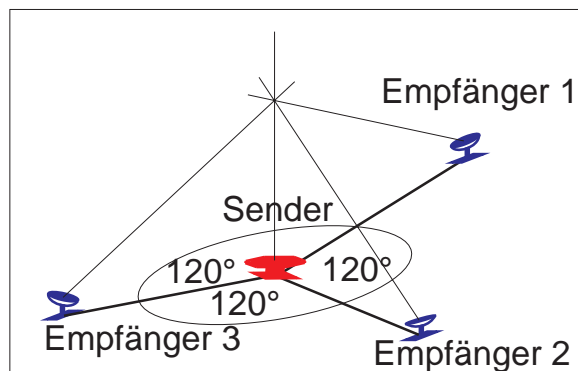


Abb. 1: Anordnung der Antennen. Wenn die drei Empfänger unter 120° um den Sender verteilt sind, wird der Meßfehler minimal. Die Anordnung kann jedoch auch den örtlichen Gegebenheiten angepaßt werden.

relativ weit auseinander. Bei der Berechnung des Windvektors aus den gemessenen Komponenten, geht man davon aus, daß an den Streuorten gleiche Windverhältnisse herrschen. In einfachem Gelände sind deshalb verhältnismäßig lange Mittelungszeiten ( $\approx 5$  min) nötig. In komplexem Gelände oder in der Nachlaufströmung von Windenergiekonvertern wird diese Bedingung nicht erfüllt.

An der Universität Oldenburg wird deshalb ein SODAR entwickelt, mit dem die drei Komponenten der Windgeschwindigkeit an sehr dicht beieinander liegenden Orten (Streuvolumina) gemessen werden.

## 2. Aufbau

Dieses SODAR besteht aus nur einem Sender und drei Empfängern (siehe [4]). Der Sender, der mit

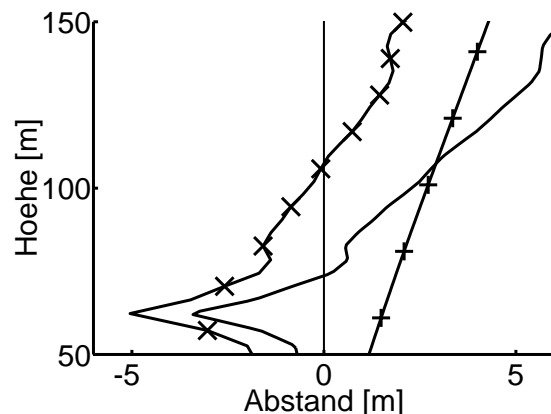
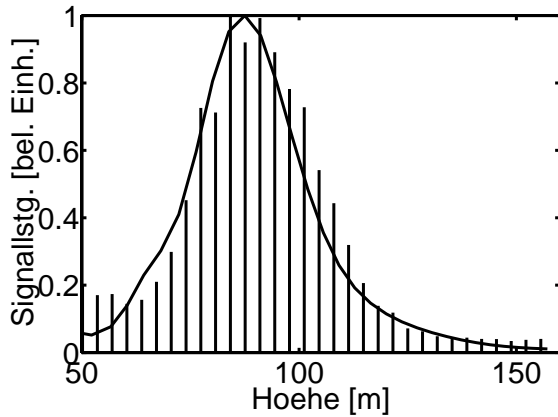


Abb. 2: Verschiebung der Streuvolumina gegen die Hauptachse des Senders. Mit „+“ gekennzeichnet ist der Einfluß des Windes, mit „x“ der Einfluß der Richtcharakteristik der Empfänger. Wenn der Wind gerade aus der Richtung kommt, in der der Empfänger vom Sender aus gesehen steht, addieren sich die beiden Effekte so, wie es die glatte Kurve andeutet.

<sup>1</sup>Zum Meßprinzip des SODAR siehe z.B. [1, 2]

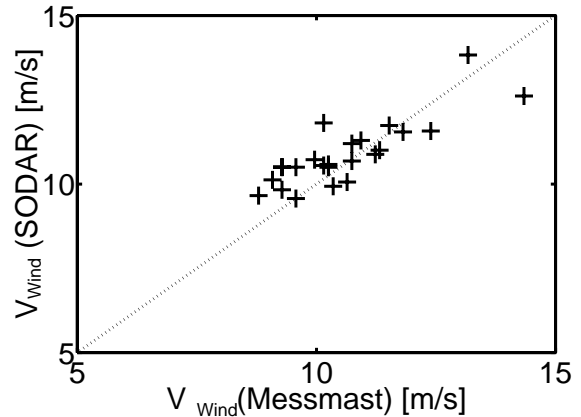


**Abb. 3:** Signalleistung in Abhängigkeit von der Meßhöhe (Empfänger 1). Die durchgezogene Linie wurde gerechnet, die senkrechten Linien sind gemessen. Der Verlauf der Signalleistung ist fast ausschließlich durch die Richtcharakteristik des Empfängers gegeben. Sie beschränkt den Meßbereich auf etwa 70 m bis 115 m Höhe.

einer sehr scharfen („bleistiftförmigen“) Richtcharakteristik ausgestattet ist, strahlt den Schallpuls senkrecht nach oben ab. Die Empfänger aus Richtmikrofonen werden um jeweils etwa  $120^\circ$  versetzt sternförmig um den Sender angeordnet. Der Abstand der Empfänger zum Sender entspricht etwa der gewünschten Meßhöhe. Sie sind so geneigt, daß sich die Hauptachsen aller Empfänger mit der des Senders in der mittleren Meßhöhe kreuzen. (Siehe Abb. 1.)

Mit jedem Empfänger wird die Projektion der Windgeschwindigkeit auf die Winkelhalbierende zwischen Sender und Streuort bzw. Empfänger und Streuort gemessen. Zu diesem Zweck muß die Lage des Streuvolumens genau bekannt sein. Sie wird im wesentlichen durch die Hauptachse des Senders gegeben. Abweichungen davon ergeben sich durch zwei Effekte:

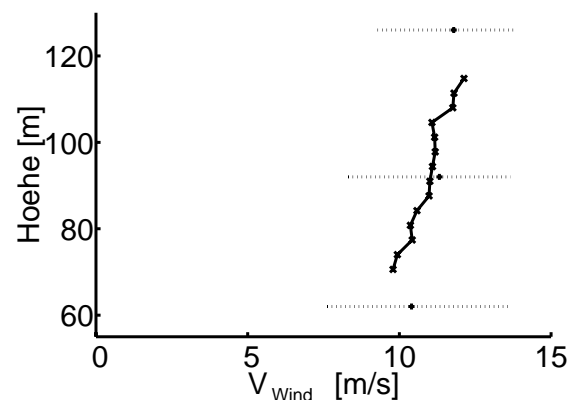
1. Der Wind „verbiegt“ die Hauptachse um einen Winkel, der etwa dem Verhältnis von Windgeschwindigkeit zu Schallgeschwindigkeit entspricht in die Richtung, in die der Wind weht. Bei einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 10 m/s weicht die effektive Hauptachse um etwa  $1,7^\circ$  von der Senkrechten ab (siehe Abb. 2).
2. Da die Empfänger eine scharfe Richtcharakteristik haben, wird auch ohne den Einfluß des Windes das Streuvolumen von der Senderachse in Richtung der Empfängerachse verschoben, d.h. unterhalb des Kreuzungspunktes ist das Streuvolumen zum Empfänger hin verschoben, oberhalb vom Empfänger weg (siehe Abb. 2).



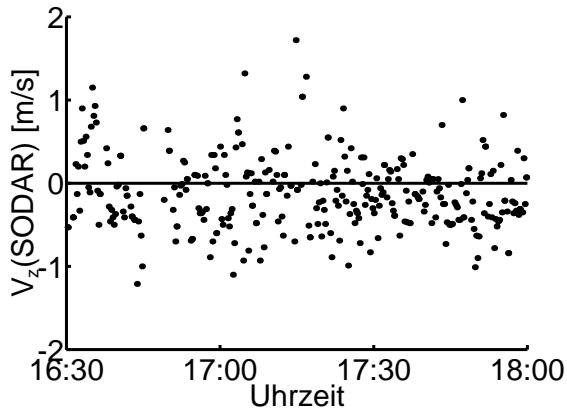
**Abb. 4:** Vergleich der Windgeschwindigkeit in 92 m Höhe zwischen SODAR und DEWI-Meßmast im Jade-Windpark. Gezeigt sind 5 min-Mittel. Der SODAR-Sender stand etwa 85 m nördlich vom Meßmast. Die Windrichtung war Westen.

Der erste Effekt tritt auch bei monostatisch arbeitenden SODAR auf. Er ist abhängig von der Windgeschwindigkeit. Der zweite Effekt tritt nur bei bistatisch arbeitenden Systemen auf und hängt nur von der Konfiguration des SODAR, insbesondere von den Richtcharakteristiken der Antennen, nicht aber von den äußeren Bedingungen ab. Beide Effekte müssen berücksichtigt werden, da sie den Winkel, unter dem das Streuvolumen erscheint, beeinflussen.

Mit dieser Anordnung ist es im Prinzip möglich, aus Einzelpulsen (Wiederholrate  $\approx 1$  s) ein Profil des Windvektors (räuml. Auflösung  $\approx 3,4$  m) zu vermessen, da die Signale im (fast) gleichen Streuvolumen an den gleichen



**Abb. 5:** Beispiel für ein Profil der horizontalen Windgeschwindigkeit (5 min-Mittel). Die durchgezogene Linie wurde vom SODAR gemessen. Die räumliche Auflösung von 3,4 m ist markiert. Zusätzlich sind die Vergleichswerte des Meßmastes in 62 m, 92 m und 126 m gekennzeichnet. Die gestrichelten Linien markieren die minimale und die maximale Geschwindigkeit, die der Meßmast in diesem Zeitraum gemessen hat.



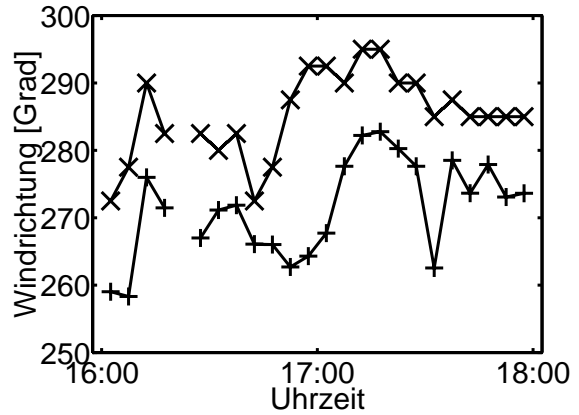
**Abb. 6:** Mit dem SODAR gemessene vertikale Komponente der Windgeschwindigkeit in 90 m Höhe in 20 s-Auflösung.

Inhomogenitäten gestreut wurden. Eine Mittelung über mehrere Pulse wird nur noch zur Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses und damit zur Steigerung der Genauigkeit der Messung benötigt.

Insbesondere ist auch eine Messung in inhomogenen Umgebungen, also z.B. in der Nachlaufströmung eines Windenergiekonverters, möglich.

### 3. Vergleichsmessung

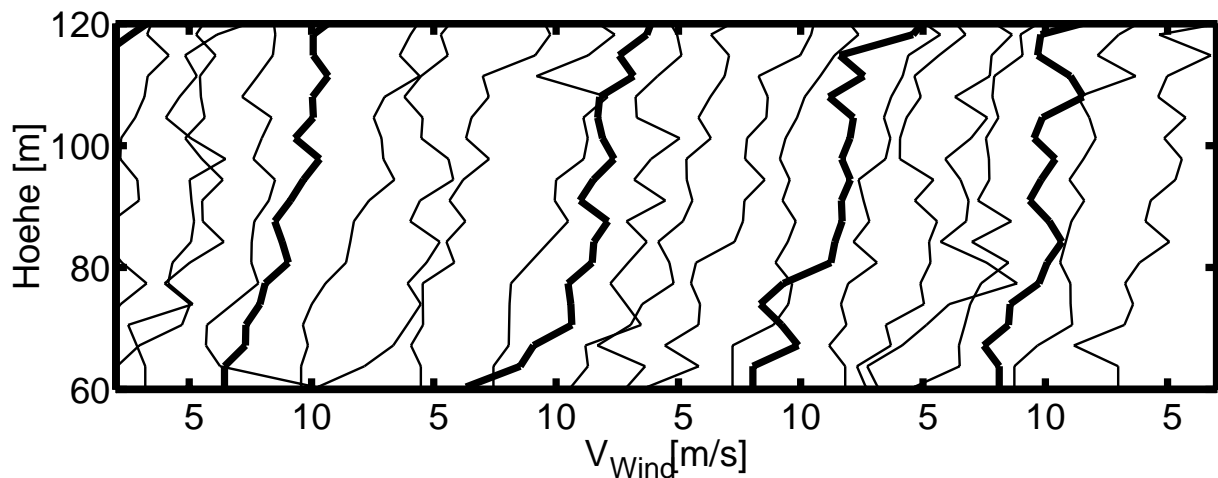
Am 27. September 1996 haben wir eine Vergleichsmessung zwischen dem SODAR und dem 130 m-Meßmast des DEWI im Jade-Windpark durchgeführt. Der Schnittpunkt der Hauptachsen von Sender und Empfängern wurde bei 90 m Höhe gewählt. Die Richtcharakteristik der Empfänger reduziert dabei den auswertbaren Höhenbereich



**Abb. 7:** Vergleich der gemessenen Windrichtung zwischen SODAR (92 m Höhe, „+“) und dem Meßmast (62 m Höhe, „x“). Ein zeitunabhängiger Offset kann durch abweichende Feststellung der Nordrichtung begründet sein.

des SODAR auf etwa 70 m bis 115 m. (Siehe Abbildung 3).

Der Meßmast liefert Windgeschwindigkeitsdaten in einer zeitlichen Auflösung von 5 min. Ein Vergleich der in 90 m Höhe gemessenen horizontalen Windgeschwindigkeit ist in Abb. 4 gezeigt. Das SODAR stand dabei etwa 85 m nördlich vom Meßmast, Windrichtung war Westen. Ein Beispielprofil der Windgeschwindigkeit macht die hohe räumliche Auflösung, die mit dem SODAR erzielt werden kann, deutlich (Abb. 5). Die vom SODAR ermittelte vertikale Komponente der Windgeschwindigkeit ist in Abb. 6 in 20 s-Auflösung angegeben. Der Mittelwert der vertikalen Windgeschwindigkeit beträgt  $-0.08 \text{ m/s}$ , die Standardabweichung  $0.61 \text{ m/s}$ . Diese Werte sind plausibel, jedoch nicht durch Vergleichsmessungen überprüft.



**Abb. 8:** Mit dem SODAR gemessene Profile der horizontalen Windgeschwindigkeit. Die Profile kennzeichnen einen 20 s-Mittelwert, die räumliche Auflösung beträgt 3,4 m. Die an der Abszisse angegebenen Zahlenwerte beziehen sich auf die dick hervorgehobenen Profile. Aufeinander folgende Profile sind um  $2 \text{ m/s}$  gegeneinander verschoben.

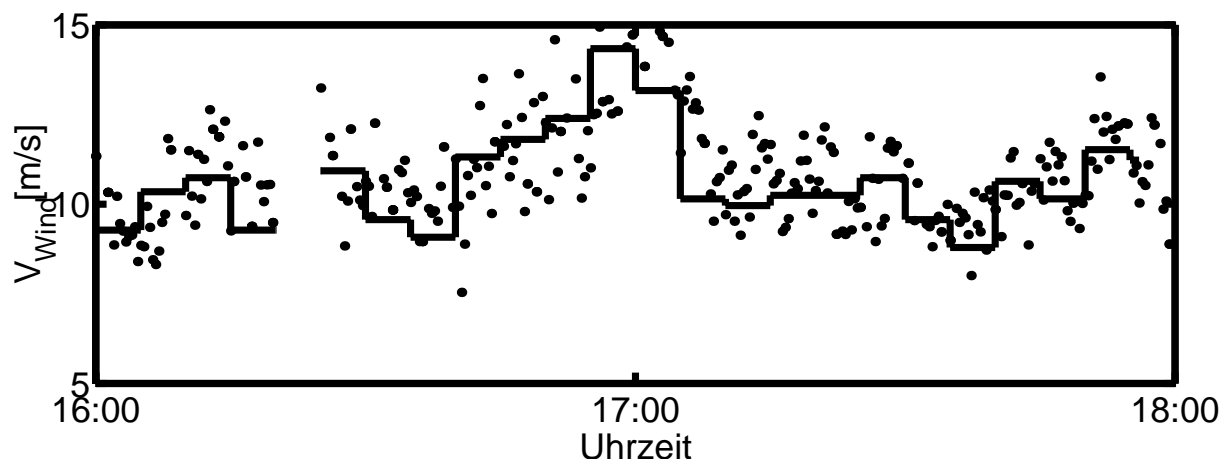


Abb. 9: Zeitreihen der Windgeschwindigkeit in 92 m Höhe. Durchgezogen die Messung des Meßmastes in 5 min-Auflösung, gepunktet die mit dem SODAR gemessene Windgeschwindigkeit in 20 s-Auflösung.

Im Vergleich der Windrichtungen (Abb. 7) ist deutlich ein systematischer Versatz von ca.  $10^\circ$  zwischen SODAR und Meßmast zu erkennen. Dieser kann daher rühren, daß es nahezu unmöglich ist, einen Windrichtungsgeber in 60 m Höhe auf einem 2 m langen Ausleger genau zu justieren. Von diesem Versatz abgesehen, passen die Windrichtungen relativ gut zusammen.

Die zeitliche Auflösung des SODAR hängt im wesentlichen vom Signal/Rausch-Verhältnis der Signale ab. Die Umgebungslautstärke bei der hier vorgestellten Messung entsprach realistischen Bedingungen im Windpark: 300 m vom Standort des Senders entfernt arbeiteten die Monopteros des Jade-Windparks. Die über 20 s gemittelten Profile der Windgeschwindigkeit sind in Abb. 8 dargestellt. In Abb. 9 sind die in 90 m Höhe gemessenen Geschwindigkeiten als Zeitreihe mit den entsprechenden 5 min-Mittelwerten des Meßmastes verglichen.

#### 4. Ausblick

Um den auswertbaren Höhenbereich des SODAR zu vergrößern, werden Mikrofone mit einer in vertikaler Richtung breiteren Richtcharakteristik entwickelt. Dadurch würde gleichzeitig die Verschiebung des Streuvolumens von der Hauptach-

se des Senders deutlich reduziert werden, so daß die Streuvolumina voll zur Deckung kommen. (Die Verschiebung durch den Wind betrifft alle drei Empfänger gleich.)

#### Danksagung

Wir möchten uns herzlich für die freundliche Unterstützung des DEWI, das die Daten des Meßmastes zur Verfügung gestellt hat, bedanken.

#### Literatur

- [1] F. Beyrich u.a.: *Messung des Wind- und Turbulenzfeldes im Jade-Windpark mittels SODAR*, Tagungsband DEWEK '94 (1994), 229-234
- [2] J. Handwerker u.a.: *SODAR hoher Auflösung zur Vermessung von bodennahen Windprofilen*, Tagungsband DEWEK '94 (1994), 445-449
- [3] A. Albers u.a.: *Einfluß verschiedener meteorologischer Parameter auf das Leistungsverhalten großer Windenergiekonverter*, Tagungsband DEWEK '96 (1996)
- [4] J. Handwerker u.a.: *Akustische Antennen hoher Richtwirkungen für SODAR-Anwendungen*, Fortschritte der Akustik, DAGA '95, Saarbrücken, (1995) 715-718