

Windmessung mit optischer Fernerkundung

Wind Measurements by Optical Remote Sensing

S. Emeis, Institut für Meteorologie und Klimaforschung – Atmosphärische Umweltforschung (IMK-IFU), Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Kreuzeckbahnstr. 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen, stefan.emeis@imk.fzk.de



Zusammenfassung

Windkraftnutzung bedarf präziser Windmessungen. Die bisher hierfür eingesetzte in situ-Messtechnik mit Schalensternanemometern auf Messmasten stößt bei den zukünftig relevanten Nabenhöhen der Windkraftanlagen an technische und finanzielle Grenzen. Optische Fernmessverfahren vom Boden aus, die das vertikale Windprofil bis in einige hundert Meter Höhe erfassen können, stellen einen möglichen Ausweg aus dieser Problematik dar. Hier sollen die Grundprinzipien dieser Messtechnik erläutert und einige Verfahren (LIDAR, Laser-Doppler-Anemometer) genauer vorgestellt werden.

1 Problemstellung

Windmessungen für die Windkraftnutzung wurden bisher überwiegend mit Schalensternanemometern (SSA) vorgenommen. Diese liefern bei sorgfältiger Kalibration, die auch die Turbulenzintensität korrekt berücksichtigt, recht genaue Werte der horizontalen Windgeschwindigkeit. Diese Messungen sind allerdings nur für ein relativ kleines Messvolumen, das durch die räumlichen Dimensionen des Messgeräts bedingt ist, repräsentativ. Der windsenkrechte Querschnitt des Messvolumens ist um ca. 6 Größenordnungen kleiner als die Rotorfläche heutiger großer Windkraftanlagen. Die Windrichtung kann aus Messungen mit dem SSA nicht bestimmt werden.

Ein weiterer Nachteil der in situ-Messtechnik mit SSA ist die Notwendigkeit der Errichtung von hohen Masten für die Dauer der Messung, auf die die Geräte montiert werden müssen. Die Aufstellung solcher Masten stellt bei den heute realisierten Nabenhöhen großer Windkraftanlagen einen erheblichen Kosten- und Zeitfaktor dar. Da größere Masten auch massiver als kleinere ausgelegt werden müssen, steigt auch die Beeinflussung der Messung durch den Mast. Zum Dritten kann die vertikale Windkomponente mit SSA nicht separat erfasst werden, sie beeinflusst aber bei einigen Typen die Messung der horizontalen Windgeschwindigkeit. Mit zunehmender Messhöhe ist eine Zunahme der vertikalen Windkomponente zu erwarten. Es ist auch nicht klar, ob Windkraftanla-

Summary

The use of wind energy requires precise wind measurements. The hitherto existing in situ-techniques with cup anemometers mounted on masts will meet mechanical and financial limits at future hub heights. Ground-based optical remote sensing methods that measure the vertical profile of wind speed up to some hundred metres height may be a way out from these problems. This paper will discuss the basic principles of anemometry by remote sensing and will present some optical methods (lidar, lidar-Doppler-anemometry) in more detail.

1 Problems

Wind measurements for wind energy purposes have been performed so far mainly with cup anemometers. After diligent calibration considering correct turbulence intensities these devices deliver precise wind data. However, due to the size of the anemometer, these measurements are representative for a quite small air volume only. The cross-section perpendicular to the mean wind direction is about six orders of magnitude smaller than the rotor area of today's wind turbines. Additionally, the wind direction can not be measured by cup anemometers.

A further disadvantage of in situ-techniques is the necessity of erecting tall masts at least up to the hub height for the measurement campaigns. The installation of such masts is very costly and time-consuming and needs permits from the respective authorities. Additionally, tall masts have larger cross-sections than small masts; thus the influence of the masts on the measurements increases with hub height. Moreover, cup anemometers cannot measure the vertical wind component separately. It is expected that the magnitude of this wind component that can influence the wind measurements with some types of cup anemometers, increases with hub height. Further, it is not clear whether cup anemometers and wind turbines react equally to vertical wind components. Therefore, the separate measurement of this component is desirable. Finally, turbulence intensity is decreasing with height, therefore cup

efficient assistance

**DEWI Group: Worldwide Services
and Research in Wind Energy**



DEWI Group:

DEWI - Deutsches Windenergie-Institut GmbH *
Ebertstraße 96 · D-26382 Wilhelmshaven
Tel. +49 (0) 4421 - 4808-0 · Fax +49 (0) 4421 - 4808-43
Email: dewi@dewi.de · Internet: www.dewi.de

DEWI Spain - Deutsches Windenergie-Institut GmbH
Sucursal en España · Calle Nueva, 8 · Oficina 15
E-31192 Mutilva Alta (Navarra) · Spain
Tel. +34 948 - 292 510 · Fax +34 948 - 152 445
Email: dewi.spain@dewi.es

DEWI-OCC - Offshore and Certification Centre GmbH
Am Seedeich 9 · D-27472 Cuxhaven
Tel. +49 (0) 4721 - 5088-0 · Fax +49 (0) 4721 - 5088-43
Email: mail@dewi-occ.de

DEWI do Brasil - Engenharia de Energia Eólica Ltda.
Av. Nove de Julho, 95 · Edifício Center 9, Sala 74
São José dos Campos - SP, CEP 12.243-000 Brazil
Tel: +55 12 3911 7694 · Fax: +55 12 3923 6817
Email: dewi@dewi.com.br

DEWI France
1 bd Vivier Merle · F-69443 Lyon Cedex 03, France
Tel: +33 (0) 472 114001 · Fax +33 (0) 472 114007
Email: info@dewi-france.fr

*) The accreditation is only valid for the DEWI locations, test and calibration methods specified in the certificates. The certificates are available on request.

gen und SSA in gleicher Weise auf die vertikale Windkomponente reagieren, so dass eine Messung dieser Komponente wünschenswert ist. Letztlich muss bei SSA die bei der Kalibrierung verwendete Turbulenzintensität berücksichtigt werden. Werden SSA beispielsweise in größeren Messhöhen bei deutlich geringeren Turbulenzintensitäten eingesetzt, so liefern sie auf Grund der Kalibration zu niedrige Windgeschwindigkeiten.

2 Fernmessverfahren

Die eben beschriebenen Nachteile und Probleme der in situ-Messtechnik zur Windmessung können mit auf der Fernmesstechnik basierenden Verfahren vermieden werden. Im Gegensatz zur in situ-Messung mit SSA, die direkt von der strömenden Luft angetrieben werden, sind Fernmessverfahren berührungslose Verfahren: die Messgeräte stehen nicht im direkten Kontakt mit dem Messvolumen und beeinflussen dieses auch nicht. Allerdings sind diese Verfahren indirekt, das erhaltene Signal muss erst in die Windgeschwindigkeit umgerechnet werden. Die zur Wahl stehenden aktiven Fernmessverfahren senden ein wohl definiertes Signal aus, welches teilweise aus der Atmosphäre zurückgestreut wird. Akustische Signale von SODAR-Geräten mit einer Wellenlänge von ca. 10 cm werden primär an turbulenzbedingten Temperaturfluktuationen und starken Temperaturgradienten in der Atmosphäre gestreut. Elektromagnetische Signale gleicher Wellenlänge von Windprofilern werden an turbulenzbedingten Feuchtefluktuationen und solche mit zwei bis drei Größenordnungen kürzeren Wellenlängen von Wetterradar-Geräten an Regentropfen gestreut. Optische Signale von einem Wind-Lidar, die nochmals eine um drei Größenordnungen kürzere Wellenlänge haben, werden überwiegend an Staubteilchen gestreut. Aus der Dopplerverschiebung der Frequenz zwischen ausgesandtem und rückgestreutem Signal kann dann die Windgeschwindigkeit in Strahlrichtung (radiale Windkomponente) abgeleitet werden. Diese Frequenzänderung ist proportional zum Quotienten aus Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsgeschwindigkeit des Messsignals. Die Ableitung ist absolut und bedarf aus physikalischer Sicht keiner Eichung. Allerdings müssen die Auswerteelektronik kalibriert und Störeinflüsse wie z.B. ground clutter berücksichtigt werden. Die Entfernung des rückstreuenden Atmosphärenvolumens wird in der Regel aus der Signallaufzeit bestimmt. Werden alle drei räumlichen Windkomponenten benötigt, so muss man kurz nacheinander in mindestens drei verschiedene Richtungen sondieren und danach mit Hilfe trigonometrischer Beziehungen aus den radialen die gewünschten horizontalen Windkomponenten und die vertikale Windkomponente be-

anemometers will tend to yield too low wind speed values if they have been calibrated for higher turbulence intensities.

2 Remote Sensing Methods

The aforementioned disadvantages and problems with in situ wind measurement techniques can be avoided by applying remote sensing techniques. Unlike cup anemometers that are directly driven by the moving air, remote sensing instruments measure contactlessly. The instruments do not interact with the air volume whose characteristics are to be determined. Remote sensing methods are indirect methods; the received signal has to be converted into wind speed information afterwards. All available techniques rest upon sending a well defined signal that is partly backscattered from the atmosphere. Acoustic pulses from a sodar having a typical wavelength of about 10 cm are reflected by turbulence-induced temperature fluctuations and strong temperature gradients in the atmosphere. Electro-magnetic signals of the same wavelength from windprofilers are scattered at turbulence-induced moisture fluctuations. Pulses from weather radars which have wavelengths that are two to three orders of magnitude shorter are dispersed by rain drops. Optical signals from wind lidars whose wavelength is even smaller by another three orders of magnitude will be reflected from dust particles floating in the air. The (radial) wind component along the line of sight can be derived from the Doppler shift between the emitted and the backscattered signal frequency. This frequency shift is proportional to the ratio of the wind speed and the propagation speed of the detecting signal. The deduction of wind speed from the Doppler shift is along a clear physical principle and requires no gauging. However, the electronics of the instrument needs calibration and disturbing influences like ground clutter have to be taken into account. The distance between the instrument and the scattering air volume is usually determined from the signal travel time. If all three components of the wind have to be measured then successive soundings have to be made in three different directions shortly after each other. The wind components can subsequently be computed from the radial velocities applying trigonometric relations. Sodars and wind profilers perform these three-dimensional wind soundings by emitting to the above three to five beams inclined to each other by about 15° to 20°. Radars and lidars usually scan a cone with a comparable aperture angle. In radar technology this scanning mode is also called VAD mode (velocity azimuth display mode). For the data evaluation it has to be assumed that the wind field is homogeneous over the horizontal distance en-

rechnen. Bei SODAR-Geräten und Windprofilern sendet man typischerweise drei bis fünf Strahlen, die gegeneinander um 15° bis 20° geneigt sind, nach oben aus, bei Radar-Geräten und Wind-Lidaren tastet man typischerweise einen Konus mit einem vergleichbaren Öffnungswinkel ab (bei Radargeräten nennt man diese Arbeitsweise VAD mode (velocity azimuth display mode)). Für die Auswertung muss die horizontale Homogenität des Windfeldes über die von den Messstrahlen eingeschlossene horizontale Distanz vorausgesetzt werden. Fernmessungen des Windes liefern somit verfahrensbedingt Messwerte, die für ein größeres Luftvolumen repräsentativ sind. Dies erschwert die direkte Vergleichbarkeit mit Daten von Schalensternanemometern, ist aber für die Anwendung bezüglich der Windkraft geeigneter, da das Messvolumen und das die Rotorebene einer Windkraftanlage durchsetzende Luftvolumen von vergleichbarer Größenordnung sind.

Anfangs hat man sich bei der Windfernmessstechnik auf akustische Verfahren (SODAR) konzentriert, da die die Windgeschwindigkeit nur um ein bis zwei Größenordnungen übersteigende Schallgeschwindigkeit eine leicht messbare große relative Frequenzänderung durch den Dopplereffekt bewirkt sowie eine hohe vertikale Auflösung (5 bis 10 m) und eine sehr niedrige unterste Messhöhe (10 bis 30 m) ermöglicht. Daher ist der technische und elektronische Aufwand für das akustische Verfahren gegenüber den optischen und elektromagnetischen Verfahren wesentlich geringer und daher preisgünstiger. Dafür müssen jedoch Einschränkungen bei der Datenverfügbarkeit hingenommen werden. Zwar zeigen alle vier genannten Verfahren (SODAR, Windprofiler, Radar, Wind-Lidar) Abhängigkeiten von den Rückstreuungseigenschaften der Atmosphäre, so dass keines der Verfahren eine hundertprozentige Datenverfügbarkeit garantieren kann, aber am stärksten ist diese Abhängigkeit beim Radar, welches nur bei Niederschlag verwertbare Ergebnisse liefert. Ein SODAR versagt bei fehlender Turbulenz und geringen Temperaturgradienten, was häufig in den Morgen- und Abendstunden zu ungenügenden Reichweiten führt. Ein Windprofiler hat nur bei sehr trockenen Luftmassen Probleme und die Lidartechnik wird in der Regel nur durch starken Regen, Nebel und Wolken limitiert.

Ein großer Vorteil optischer Verfahren ist die gute Fokussierbarkeit des Messstrahls, da die Lichtwellenlänge um viele Größenordnungen kleiner als die Öffnung des Messgerätes ist und Beugungserscheinungen daher vernachlässigt werden können. Nebenkeulen wie bei den anderen drei Verfahren treten nicht auf, Hindernisse und bewegte Objekte in Gerätenähe stören somit nicht und eine seitliche Abschirmung des Geräts

closed by the beams or the cone. Thus, remote sensing methods due to their design yield values that are characteristic for larger air volumes. This fact hampers the direct intercomparison with cup anemometer data, but on the other hand remote sensing methods are very likely more suited for wind energy applications because the air volume scanned by the measurement device and the air volume which passes through the rotor plane of a wind turbine are of comparable size.

Initially, remote sensing of wind was mainly done with acoustic methods (SODAR), because the speed of sound which is only one to two orders of magnitude larger than the wind speed leads to relatively large Doppler shifts that are easily detectable. Additionally this method offers a high vertical resolution (5 to 10 m) and a small lowest range gate (10 to 30 m). Thus the technical and electronic efforts for the application of the acoustic method are considerably lower and cheaper than for the respective optical and electromagnetic methods. The advantages are neutralised by the limited data availability of the acoustic method. In fact, none of the remote sensing methods (SODAR, wind profiler, radar wind-lidar) can guarantee a one hundred percent data availability due to the backscattering properties of the atmosphere. The strongest dependence with respect to wind measurements is found with the radar technique that delivers reasonable data only in case of rain. A SODAR fails in situations with missing turbulence and low temperature gradients. These situations lead quite often to a low range of a SODAR around dawn and dusk. A wind profiler usually suffers from very dry air masses only, and the lidar technique is hampered by strong rain, fog, and clouds.

An advantage of optical remote sensing methods is the good possibility to focus a light beam because the wave length of light is several orders of magnitude smaller than the aperture of the sensing instrument. Thus diffraction is negligible. Side lobes which are characteristic for the other three sensing methods do not appear and a lateral shielding is not necessary. Optical methods have no negative influence on the environment. They do not produce noise or electromagnetic stray fields and they are not disturbed by these disturbances.

Until recently optical methods like electromagnetic methods had the disadvantage of a quite low vertical resolution of about 50 m and large lowest range gates of several hundreds of metres. The vertical resolution is limited by the pulse duration which cannot be minimised unboundedly. The lowest range gate is caused by the unavoidable switching between transmitting and receiving. A

wie bei den anderen drei Verfahren ist nicht notwendig. Zudem belasten optische Verfahren die Umwelt auch nicht durch Geräusche oder elektromagnetische Felder, und sie selbst werden durch Störgeräusche oder vorhandene Felder nicht beeinflusst.

Optische Verfahren hatten lange Zeit genauso wie die elektromagnetischen Verfahren gegenüber den akustischen Verfahren den großen Nachteil, dass nur Vertikalauflösungen im Bereich von 50 m und unterste Messhöhen von einigen hundert Metern möglich waren. Die Entfernungsauflösung ist im Wesentlichen durch die Pulslänge begrenzt, die nicht beliebig minimiert werden kann. Die unterste Messhöhe wird durch die notwendige Umschaltung von Senden auf Empfangen und durch die Vermeidung der Blendung des Gerätes durch extrem hohe Rückstreuintensitäten in Gerätenähe bedingt. Durch Erweiterung des Öffnungswinkels des vom Lichtstrahl überstrichenen Konus konnte man den Nachteil der schlechten Entfernungsauflösung teilweise kompensieren, musste hierfür aber noch größere Messvolumina als bei der akustischen Technik in Kauf nehmen. Diese Umstände haben den Einsatz der optischen Technik auf die Scherwindbestimmung an Flughäfen konzentriert, aber die Verwendung für Fragen der Windenergie bisher weitgehend verhindert (siehe auch VDI 3786-14). Mittlerweile haben die Weiterentwicklung der Lasertechnologie und der Auswerteelektronik sowie die Anwendung innovativer Verfahren zur Entfernungszuordnung des rückgestreuten Signals diese Probleme etwas reduziert, so dass die optische Fernmessung des Windes auch für die Windkraftnutzung interessanter wird. Bei Verwendung von infrarotem Licht sind diese Verfahren auch als augensicher einzustufen, eine für den längeren automatischen Einsatz notwendige Voraussetzung. Im Folgenden soll zunächst die derzeit verfügbare optische, auf der Dopplerverschiebung beruhende Messtechnik genauer vorgestellt werden. Dabei werden drei unterschiedliche Methoden der Entfernungsbestimmung angesprochen. Anschließend wird auch noch kurz auf ein zweites optisches Messprinzip der Geschwindigkeitsmessung, die Laser-Doppler-Anemometrie, eingegangen.

2.1 Doppler-Wind-Lidar

2.1.1 Entfernungszuordnung aus der Signallaufzeit

Eine Übersicht über Stand der Lidar-Technik zur Wind- und Turbulenzmessung mit einer Entfernungsbestimmung über die Laufzeitmessung geben Davies et al. (2003). Das bei dieser Übersicht näher vorgestellte Gerät der vormaligen britischen Defence Evaluation and Research Agency

larger lowest range gate also helps to beware the instrument of blinding by extremely high backscatter intensities from nearby reflecting objects. Enlargement of the aperture angle of the conus formed by the rotating light beam led to a partial compensation for the bad range resolution. But this had to be payed for by an even larger measurement volume. These drawbacks had so far limited the use of optical remote sensing techniques for wind speed mainly to the determination of wind shear at airports (see also VDI 3786-14). In the meantime, enhancements in laser technology, in electronic signal processing, and innovative means of range determination for backscattered signals have decreased these problems. Therefore optical wind measurement techniques have become more interestingly for wind energy issues. Furthermore, the usage of infrared light makes this technology eye-save, a mandatory requirement for an automatic measurement technique running unattended for longer time periods. In the following the currently available optical remote sensing methods which are based on the analysis of the Doppler shift are presented. Different methods for the range determination will be addressed. Finally, a second procedure for optical wind speed measurements, the laser-Doppler-anemometry, will be shortly introduced.

2.1 Doppler Wind Lidar

2.1.1 Range Determination by Signal Delay

An overview over the state of the art of lidar techniques for wind and turbulence measurements using signal delay for the range determination is given by Davies et al. (2003). The instrument of the former British Defence Evaluation and Research Agency (DERA) that is presented in some detail in this overview uses infrared light at 10.6 μm and has a range resolution of 112 m. A possible solution for the problem of large measurement volumes due to conical scanning with these techniques may be the Dual-Doppler lidar technique. Here two identical lidars look into the same air volume from two different positions. Such an attempt using two of the abovementioned 10.6 μm lidars (belonging to the University of Salford and to Qinetiq, the latter emerged out of DERA in 2001) is described in Collier et al. (2005). This study was directed to the improvement of urban dispersion modeling.

Up to now only very few studies exist which report on optical wind measurements for wind energy issues. One of these has been the application of the newly developed ETL HRDL (Environmental Technology Laboratory (NOAA, Boulder) High Resolution Doppler Lidar) during the CASES-99 campaign for the measurement of low-level jets

(DERA) misst im Infraroten bei 10,6 μm und hat eine Entfernungsauflösung von 112 m. Einen möglichen Ausweg aus dem Problem des großen Messvolumens durch die azimutalen Scanverfahren mit großem Öffnungswinkel (VAD mode) stellt die Dual-Doppler Lidar-Technik dar, bei der zwei identische Lidare von zwei verschiedenen Positionen in ein und dasselbe Luftvolumen blicken. Einen solchen Versuch, bei dem zwei der zuvor erwähnten 10,6 μm -Geräte eingesetzt wurden (die der Universität von Salford und der Firma Qinetiq (2001 aus der DERA hervorgegangen) gehören), beschreiben Collier et al. (2005), haben aber urbane Schadstoffausbreitungsmodelle als Anwendung im Visier.

Bisher gibt es nur wenige Studien, in denen direkt über optische Windmessungen für Fragen der Windenergienutzung berichtet wird. Hierzu zählt der Einsatz des neu entwickelten ETL HRDL (Environmental Technology Laboratory (NOAA, Boulder) High Resolution Doppler Lidar) während der Messkampagne CASES-99 zur Messung von niedertroposphärischen Strahlströmen (Low-Level Jets, Banta et al. 2002). Das im Infraroten bei 2,2 μm arbeitende HRDL weist bei senkrechtem Einsatz eine untere Messhöhe von 250 m und eine minimale Vertikalauflösung von 30 m auf. Die erforderliche Höhengauflösung von ca. 10 m wurde hier durch die Abtastung eines in die Hauptwindrichtung gelegten Höhen-Entfernungs-

(Banta et al. 2002). The HRDL operates at 2.2 μm in the infrared part of the light spectrum, has a lowest range gate of 250 m and a minimal vertical resolution of 30 m. The required vertical resolution of 10 m in this study has been reached by operating the instrument in a RHI (range height indicator) mode, i.e. scanning a range height cross section parallel to the incident wind direction.

2.1.2 Range Determination by Beam Focussing

Recently the British company Qinetiq has designed and built a transportable wind lidar measuring in the near infrared at 1.575 μm , which is about 1.5 m high and weighs 150 kg. The determination of the range is done by focussing the light beam and not by signal delay. According to the company five different measuring heights between 5 and 150 m above ground can be programmed. The profile of the three-dimensional wind vector is yielded by scanning a cone with 30° aperture once a second. From this information can be inferred that the diameter of the measurement volume is 173 m at 150 m height. Precise values for data availability and vertical resolution have not been made public until now. According to Harris et al. (2001) strong reflections from particles outside the focal range (e.g. due to smoke or fog) can falsify the results considerably. An inter-comparison exercise with a cup anemometer at 80 m above ground on the test range of the Danish

querschnitts erreicht (beim Radar nennt man die analoge Vorgehensweise RHI mode (range height indicator mode)).

2.1.2 Entfernungszuordnung über Strahlfokussierung

Die britische Firma Qinetiq hat kürzlich ein transportables Gerät (ca. 150 kg schwer und 1,5 m hoch) auf den Markt gebracht, dass im nahen Infrarot bei 1,575 μm misst. Die Höhenzuordnung erfolgt nicht mehr über die Laufzeit sondern durch Fokussierung des Lichtstrahls (nach Herstellerangaben können bis zu 5 Höhen zwischen 5 und 150 m über Grund einprogrammiert werden). Die drei Komponenten des Windvektors werden durch Scannen eines Konus einmal pro Sekunde erfasst. Der Öffnungswinkel dieses Konus beträgt 30°, daraus folgt in 150 m Höhe ein horizontaler Durchmesser des Messvolumens von 173 m. Genaue Werte für die Datenverfügbarkeit und die vertikale Auflösung der Daten liegen bisher nicht öffentlich vor. Stark streuende Teilchen außerhalb des Fokalbereichs (z. B. Rauch oder Nebel) könnten die Messungen deutlich verfälschen (Harris et al., 2001). Einzelne Vergleichsmessungen mit einem Schalensternanemometer in 80 m Höhe auf dem Testfeld des Forschungszentrum Risø in Høvsøre haben eine sehr gute Übereinstimmung erbracht (Albers und Smith, 2005).

Diese kompakte Technik birgt auch das Potential, wenn man auf das konusförmige Scannen verzichtet und nur die Komponente des Windes in Strahlrichtung bestimmt, horizontale Windsondierungen stromauf von Windkraftanlagen vorzunehmen. Bei einer Windgeschwindigkeit von 15 m/s ergibt eine Fokussierung auf 150 m Abstand eine „Vorwarnzeit“ zur Adaptierung der Windkraftanlage von 10 Sekunden, bei 25 m/s noch eine von 6 Sekunden. Das Gerät kann hierzu auf der Gondel einer Windkraftanlage montiert werden, die gelegentliche Unterbrechung des Lichtstrahls durch die Rotorblätter der Turbine ist bei der hohen Abtastfrequenz des Geräts nicht von Bedeutung.

2.1.3 Weitere Ansätze zur Entfernungszuordnung

Ansätze, die Entfernungszuordnung nicht über die Signallaufzeit oder eine Strahlfokussierung sondern über die bei medizinischen Untersuchungen erfolgreich eingesetzte optische Kohärenz Tomographie (OCT) vorzunehmen, haben bisher noch nicht zu einem anwendungstauglichen Gerät geführt (Bennett et al., 2004).

2.2 Laser-Doppler-Anemometrie

Ein weiteres, auf Aerosolrückstreuung basierendes Verfahren zur Windmessung stellt die Laser-

research centre Risø in Høvsøre has yielded a very good agreement (Albers and Smith, 2005).

This compact technique bears the potential to measure horizontally oncoming gusts upstream of a wind turbine at hub height. For such a purpose the conical scanning must be abandoned and only the wind component parallel to the line of sight can be determined. Assuming a wind speed of 15 m/s and a focussing of the beam at 150 m distance permits a warning time of 10 seconds in order to adapt the turbine. With 25 m/s wind speed the warning time is still 6 s. For this purpose the instrument can be mounted on top of the nacelle. Due to the high scanning rate the short interruptions of the beam by the blades of the turbine will not impede the measurement.

2.1.3 Further Attempts for Range Determination

In addition to signal delay and beam focussing further attempts have been made to enhance the range resolution of optical remote sensing. Bennett et al. (2004) report on an approach to use optical coherent tomography (OCT) which has been applied quite successfully in medical examinations. This research has not led to a viable method for meteorological purposes so far.

2.2 Laser-Doppler Anemometry

A further method to measure the wind that is based on aerosol backscatter is laser-Doppler anemometry (LDA). LDA is an active monostatic method bearing on the interference of two coherent laser beams. The instrument emits by the utilisation of a beam splitter two coherent beams which cross each other in some distance (at most about 100 m) from the device. At the position of the cross-over emerges an interference pattern (the frequency of the resulting beat is also called Doppler frequency which explains the name of this measurement technique). Aerosol particles floating in the air passing this cross-over point are alternately illuminated or remain dark. From the frequency of this flashing-up the air speed perpendicular to the bars of the interference pattern can be determined. Both velocity components can be derived with this technique by producing a second pattern which is turned by 90° with respect to the first one. Boundary layer applications of this technique which has been designed primarily for wind tunnel flow measurements are not yet known. Most probably the range of this technique is not sufficient for this purpose.

3 Conclusions and Outlook

The use of optical techniques to measure the wind for wind energy issues is still at its beginnings. Since recently one instrument is commercially

Doppler-Anemometrie dar. Das Laser-Doppler-Anemometer (LDA) ist ein aktives, monostatisches, nur punktuell messendes Fernerkundungsverfahren, das auf der Interferenz zweier kohärenter Laserstrahlen beruht. Das Gerät erzeugt mittels eines Strahlteilers zwei kohärente Strahlenbündel, die sich in einigem Abstand (maximal ca. 100 m) vor dem Gerät kreuzen. Im Kreuzungsbereich entsteht ein Interferenzmuster (die Frequenz der bei der Interferenz entstehenden Schwebung wird auch als Doppler-Frequenz bezeichnet, daher der Name der Messtechnik). Fliegt nun ein reflektierendes Aerosolpartikel durch dieses periodische Muster, so wird es abwechselnd beleuchtet oder bleibt dunkel. Aus der Frequenz des Aufleuchtens dieses Partikels kann auf die Geschwindigkeitskomponente senkrecht zu dem Muster geschlossen werden. Erzeugt man mit einer zweiten Wellenlänge ein zum Ersten um 90° gedrehtes Interferenzmuster, so können beide zur Strahlrichtung senkrechten Geschwindigkeitskomponenten bestimmt werden. Anwendungen dieses hauptsächlich für Windkanalströmungen eingesetzten Verfahrens zur Ermittlung von vertikalen Windprofilen in der atmosphärischen Grenzschicht sind bisher nicht bekannt, vermutlich ist die räumliche Reichweite des Messverfahrens hierfür auch nicht ausreichend.

3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Nutzung optischer Windmessverfahren für Fragen der Windkraftnutzung steht noch ganz am Anfang. Erst ein Messsystem steht seit Kurzem kommerziell zur Verfügung, die Erfahrungen mit ihm sind naturgemäß noch sehr gering. Die optische Messtechnik hat unbestrittene Vorteile wie die relativ hohe Datenverfügbarkeit, die Umweltverträglichkeit und die Unempfindlichkeit gegen störende äußere Einflüsse. Dazu kommen Perspektiven für Messanordnungen, die mit anderen Verfahren nicht angedacht werden konnten. Dem steht zur Zeit aber noch ein relativ hoher Anschaffungspreis, eine nur moderate vertikale Auflösung und für den dreidimensionalen Windvektor eine relativ große Volumenmittelung gegenüber. Die nächsten Jahre werden zeigen, in wie weit sich die optische Windmesstechnologie im Windkraftbereich durchsetzen kann.

available. Naturally, experiences with this instrument are still very limited. The optical techniques have clear advantages such as the rather high data availability, the low environmental impact, and the low sensitivity to disturbing external influences. Moreover this technique may offer new measurement geometries which were not thinkable with other remote sensing techniques. On the other hand the price for purchasing the instruments is still quite high, the vertical resolution is only moderate, and for the determination of the three-dimensional wind vector a rather large volume averaging has to be made. The next years will show whether optical techniques will succeed in wind energy technology applications.

4. Literatur

- A. Albers and D. Smith, 2005, Den Wind mit Lasern messen. Erneuerbare Energien, 4/2005, 36-38.
- Banta, R.M., R.K. Newsom, J.K. Lundquist, Y.L. Pichugina, R.L. Coulter, L. Mahrt, 2002: Nocturnal Low-Level Jet characteristics over Kansas during CASES-99. Bound.-Lay. Meteorol., 105, 221-252.
- Bennett, M., S.G. Bradley, S. von Hünenbein, J. Pease, 2004: Comparison of wind profiles measured with sodar and Doppler lidar. Proc. 12th ISARS, 11.-16. Juli 2004 Cambridge (UK), 141-144.
- Collier, C.G., F. Davies, K.E. Bozier, A.R. Holt, D.R. Middleton, G.N. Pearson, S. Siemen, D.V. Willets, G.J.G. Upton, R.I. Young, 2005: Dual-Doppler lidar measurements for improving dispersion models. Bull. Amer. Meteor. Soc., 86, 825-838.
- Davies, F., C.G. Collier, K.E. Bozier, G.N. Pearson, 2003: On the accuracy of retrieved wind information from Doppler lidar observations. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 129, 321-334.
- Harris, M., G. Constant, C. Ward, 2001: Continuous-wave bistatic laser Doppler wind sensor. Appl. Opt., 40, 1501-1506.
- VDI 3786 Blatt 14, 2001: Environmental Meteorology, Ground-based remote sensing of the wind vector - Doppler wind LIDAR. Beuth Verlag, Berlin. 48 pp.
- VDI 3786 Blatt 14, 2001: Umweltmeteorologie, bodengebundene Fernmessung des Windvektors - Doppler-Wind-LIDAR / Environmental Meteorology, Ground-based remote sensing of the wind vector - Doppler wind LIDAR. Beuth Verlag, Berlin 48 S. (Deutsch-englische Ausgabe/German-English issue)