

DOPPLER-LIDAR-TRANSFERNORMAL ZUR WINDGESCHWINDIGKEITSMESSUNG: AKTUELLER ENTWICKLUNGSSTAND

DOPPLER-LIDAR TRANSFER NORMAL FOR WIND VELOCITY MEASUREMENTS: CURRENT DEVELOPMENT STATUS

M. Eggert, H. Müller, H. Többen

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland

Schlagworte: Doppler-Lidar, Wind-Lidar, bistatisch, rückführbar

Key words: Doppler-Lidar, Wind-Lidar, bistatic, traceable

Abstract

Wesentliche Grundlage bei der Planung von Windparks sind sogenannte Windpotentialanalysen zur Bewertung der Windverhältnisse am beabsichtigten Standort. Zusammen mit der vermessenen Leistungskurve der dort aufzustellenden Windkraftanlagen kann die im Jahresmittel zu erwartende produzierte elektrische Energie berechnet werden, welche unerlässlich zur Beurteilung der Rentabilität eines Windparks ist.

Die sowohl für Windpotentialanalysen als auch für Leistungskurvenvermessungen erforderliche Erfassung von Windgeschwindigkeitsprofilen in Höhe der Rotorblätter werden bislang mit rückgeführten (von akkreditierten Kalibrierlaboratorien kalibrierten), an Messmasten montierten Anemometern durchgeführt. Mit zunehmender Nabenhöhe neuer Windenergieanlagen wird der Aufwand hinsichtlich der Messmastenerstellung beträchtlich, so dass bereits wirtschaftlichere Alternativen mit Fernmessverfahren auf Basis von Doppler-Lidar-Systemen untersucht werden. In der Windenergiebranche publizierte Untersuchungsergebnisse weisen auf vielversprechende Möglichkeiten und Einsatzpotentiale der Lidar-Technik hin, doch fehlen hier noch geeignete Verfahren zur messtechnischen Rückführung.

Die in der Windenergiebranche eingesetzten Wind-Lidar-Systeme enthalten üblicherweise eine gemeinsame Sende-/Empfangsoptik, so dass Sende- und Empfangsstrahl übereinander liegen (monostatisch, monoaxial). Bei diesem Verfahren wird die Strömungsgeschwindigkeitskomponente in Strahlrichtung mit einer Höhenauflösung von ca. 20 m gemessen, wobei der Strahl zur vollständigen Erfassung des Geschwindigkeitsvektors in verschiedene Richtungen geschwenkt wird. Sowohl aufgrund der räumlichen Auflösung, als auch aufgrund möglicher Verfälschungen des Messergebnisses durch Strömungsinhomogenitäten über den Schwenkbereich des Strahls, können in komplexem Gelände (z.B. Hügel) Messabweichungen bis zu 10 % auftreten, die eine Rückführung von Lidar-Windgeschwindigkeitsmessungen mit der geforderten Messunsicherheit bisher noch nicht zulassen.

Der Einsatz bistatischer Doppler-Lidar-Systeme mit räumlich getrennten Sende- und Empfangseinrichtungen erlaubt räumliche Auflösungen im Kubikzentimeterbereich und die vektorielle Erfassung der Geschwindigkeit an einem einzelnen Messort. Dieser Beitrag beschreibt den aktuellen Entwicklungsstand eines solchen Systems, welches sowohl zum Einmessen eines konventionellen Systems im jeweiligen Gelände, als auch selbst für die Erstellung rückgeführter Windpotentialanalysen und Leistungskurven genutzt werden soll.

Einleitung

Kohärente Doppler-Lidar-Systeme werden bereits vielfältig für Messungen von Windgeschwindigkeiten eingesetzt. Sie beruhen auf der Detektion der bei der Streuung von Laserlicht an von der Strömung mitgeführten Partikeln entstehenden Dopplerfrequenz durch Rückmischung mit dem Sendelaser. Kommerzielle Wind-Lidar-Systeme besitzen eine gemeinsame Sende- und Empfangseinheit, so dass sich das ausgesendete und empfangene Licht entlang derselben Achse bewegt (monostatisch, monoaxial) und folglich das Streulicht aller Partikel entlang des Strahls den Empfänger trifft. Eine Selektion des zu messenden Entfernungsbereichs wird je nach Aufbau bei gepulst arbeitenden Systemen anhand der Laufzeit, bei kontinuierlich sendenden Systemen mithilfe einer Strahlfokussierung festgelegt. In beiden Fällen beträgt die Entfernungsaufösung im gewünschten Messbereich typischerweise etwa 20 m (Harris 2001). Somit ergibt sich eine Mittelung über einen großen Entfernungsbereich, welche zusätzlich von der Verteilung der Partikelkonzentration beeinflusst wird.

Da diese Systeme ausschließlich die Strömungsgeschwindigkeitskomponente in Strahlrichtung messen, wird der Strahl zur Erfassung aller drei Geschwindigkeitskomponenten in verschiedene Richtungen geschwenkt (Abb. 1 links). Dies erfolgt üblicherweise mithilfe einer rotierenden Keilplatte, so dass der Strahl innerhalb eines Messzyklus einen Konus beschreibt (Ando 2008). Da bei diesen Verfahren Geschwindigkeiten an unterschiedlichen Orten gemessen werden, setzt die genaue Bestimmung eines resultierenden Geschwindigkeitsvektors eine homogene Strömung voraus, was in komplexem Gelände in der Regel nicht gegeben ist (Eggert 2011). Hier können Messabweichungen bis über 10 % entstehen (Foussekis 2011).

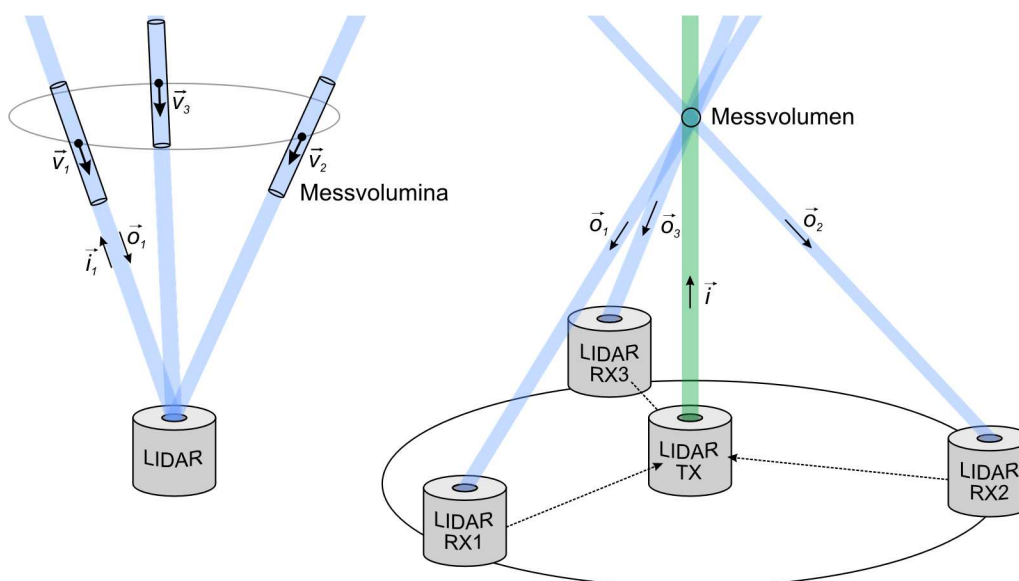


Abb. 1: Mehrkomponentige Strömungsgeschwindigkeitsmessung mit konventionellen, monostatischen Wind-Lidar-Systemen (links) und einem bistatischen System (rechts).

Sowohl aufgrund der ausgedehnten Messvolumina, als auch aufgrund der Messabweichungen in komplexen Geländestrukturen, sind die bislang mit kommerziell erhältlichen Lidar-Systemen durchgeführten Windmessungen im Rahmen der geforderten Messunsicherheiten nur bedingt mit Messungen von Anemometern an Messmasten vergleichbar und hinsichtlich einer Rückführbarkeit kritisch zu bewerten. Im Rahmen einer Lidar-Neuentwicklung auf Basis eines bistatischen Systems (Abb. 1 rechts) sollen diese Nachteile ausgeschlossen werden.

Prinzip des bistatischen Doppler-Lidar-Verfahrens

Ein bistatisches Lidar-System mit räumlich deutlich vom Sender getrennten Empfängern besitzt ein klar abgegrenztes Messvolumen im Kubikzentimeterbereich, gegeben durch den Überlappungsbereich des Sendestrahls mit den Empfangskegeln der Empfänger („Empfangsstrahlen“). Die Messhöhe wird hierbei folglich nicht durch ein Empfangszeitfenster festgelegt, sondern durch die Justage der Empfänger. Laufzeitmessungen erlauben hierbei die Bestimmung der Messhöhe und dienen der Sicherstellung, dass alle drei Empfangsstrahlen den Sendestrahl in der gleichen Höhe schneiden, so dass drei Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit, jeweils in Richtung der Winkelhalbierenden zwischen Sende- und Empfangsstrahl, gleichzeitig an einem Ort gemessen werden können. Die gemessene Geschwindigkeit ist dabei direkt auf die kalibrierbaren Größen der Laserwellenlänge, der Zeitbasis zur Frequenz- und Laufzeitbestimmung sowie der Empfängergeometrie rückführbar.

Die Herausforderung bei einem bistatischen Lidar-System besteht in der geringeren Empfangsleistung des Streulichts. Zum einen durchqueren wenig Streupartikel das relativ kleine Messvolumen, zum anderen muss Strahlung aus einer schwach ausgeprägten Nebenkeule der Streustrahlung detektiert werden. Der Nachteil der geringeren Anzahl von Partikeln wird jedoch teilweise dadurch kompensiert, dass sich diese in dem kleinen Messvolumen weitaus gleichförmiger bewegen als innerhalb des über einen großen Höhenbereich ausgedehnten Messvolumens eines konventionellen Wind-Lidar-Systems, so dass sich das empfangene Frequenzspektrum auf eine deutlich schmalere Bandbreite konzentriert.

Aufbau des bistatischen Systems

Das geplante bistatische System (Abbildung 2) besitzt ebenso wie konventionelle Systeme einen schmalbandigen Masterlaser, dessen Licht mithilfe eines Akusto-optischen Modulators (AOM) frequenzverschoben und anschließend verstärkt wird. Eine Modulation mit mehreren Frequenzen und Auswertung der Phasenbeziehung der Empfangssignale erlaubt eine Messung der Laufzeit und damit die Bestimmung der jeweiligen, durch die Justage der Empfangsoptik gewählten Messhöhe. Durch die Verwendung rauscharmer optischer Vorverstärker (Rauschzahl 1 dB bei Polarisationsfilterung) und optischer Quadraturdemodulatoren lässt sich die Empfangsempfindlichkeit erhöhen.

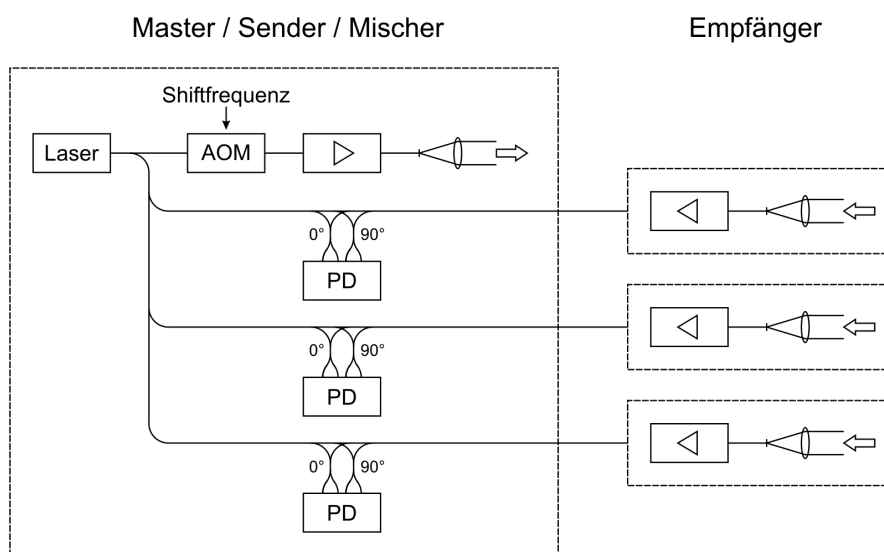


Abb. 2: Schematischer Aufbau des bistatischen Systems

Zur Auswertung wird das Empfangssignal, um die Dopplerfrequenz bis zu 10 MHz relativ zur AOM-Frequenz von 75 MHz verschoben, mittels Analog-Digital-Wandlern (ADC) abgetastet (Abbildung 3). Anschließend werden die Signale digital gefiltert, heruntergemischt und mittels schneller Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzbereich übertragen. Eine Vorverarbeitung in programmierbarer Logik (FPGAs) erlaubt die Echtzeitauswertung der Daten mit einer FFT-Auflösung in der Größenordnung von 1 kHz.

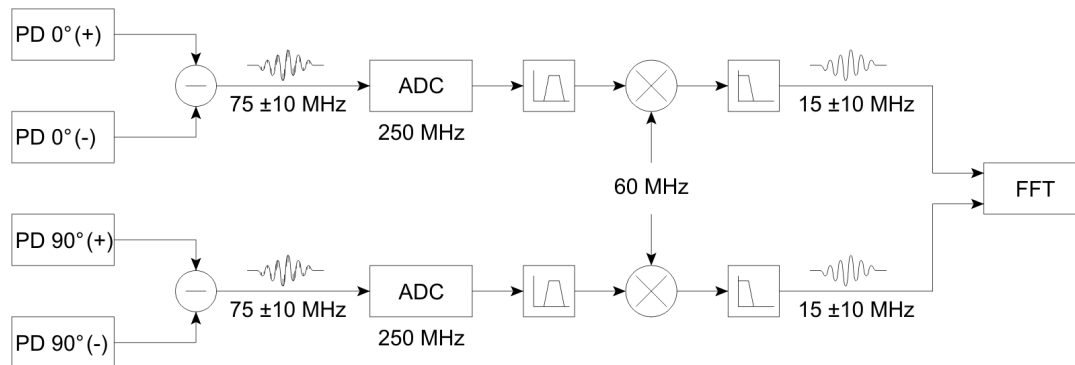


Abb. 3: Schema der Signalvorverarbeitung

Abbildung 4 zeigt das in Singlemode-Faseroptik aufgebaute Testsystem mit Sender und Empfänger für eine Geschwindigkeitskomponente. Aufgrund der derzeit noch auf 1 W begrenzten Sendeleistung befinden sich Sende- und Empfangsoptik dicht zusammen, damit der Überlappungsbereich von Sende- und Empfangsstrahl große Messvolumina erzeugt und das Streulicht möglichst vieler Partikel empfangen werden kann. Im Vordergrund sind zwei Sende- und Empfangsoptiken zu erkennen: Die Optik mit 30 mm Empfangsapertur (links) dient dem Vergleich mit den von Harris (2001) publizierten Ergebnissen, während die Optik mit 75 mm Empfangsapertur (rechts) eine elektronisch verstellbare Fokussierung und Strahlverkipfung enthält, welche eine automatische Strahljustage ermöglichen soll.

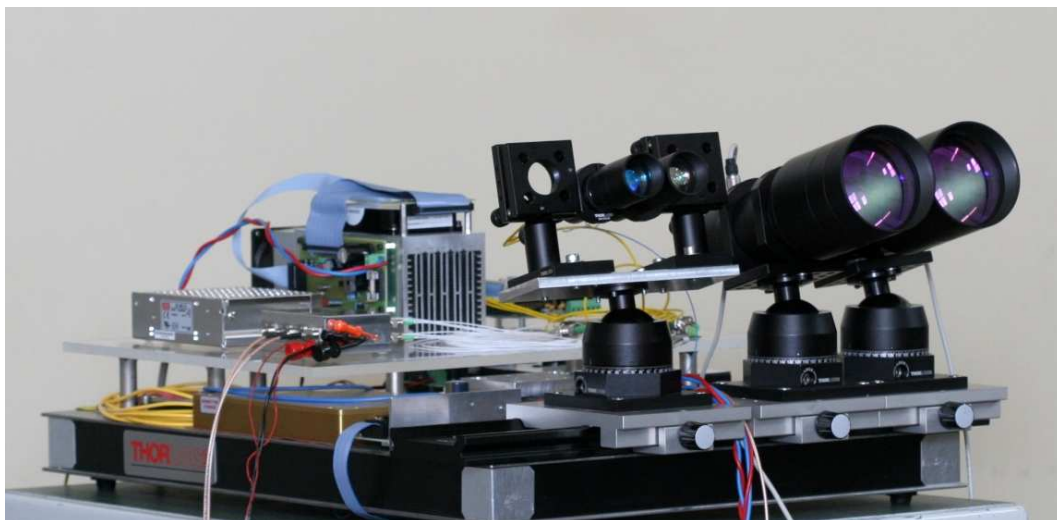


Abb. 4: Lidar-Testsystem mit unterschiedlichen Sende-/Empfangsoptiken

Messergebnisse

Um verschiedene Verfahren der Auswertung miteinander vergleichen zu können, wurden die Empfangssignale zunächst nicht im FPGA vorverarbeitet, sondern mittels einer Transientenrecorderkarte direkt im PC aufgezeichnet. Die maximale Signaldauer war hierbei, gegeben durch den Speicher der Karte, auf 140 ms begrenzt.

Da das hier beschriebene System hinsichtlich Wellenlänge und Sendeleistung mit dem von Harris (2001) identisch ist, bietet sich ein Vergleich mit dessen Messergebnissen an. Hierzu wurden die Sende- und Empfangsoptik mit jeweils 30 mm Durchmesser dicht nebeneinander platziert (36 mm Abstand der Mittelpunkte) und auf 20 m Entfernung justiert, so dass sich eine Messvolumenlänge von ca. 1 m ergab. Zur Auswertung der Signale wurden 1024 Spektren über Intervalle aus jeweils 34 μ s gemittelt, was hinsichtlich Auflösung und Mittelung der von Harris beschriebenen Signalverarbeitung im analogen SAW-Spektrumanalysator gleicht. Das so erfasste Spektrum (Abbildung 5 links) entspricht hinsichtlich Bandbreite und Signal-Rausch-Verhältnis weitestgehend dem von Harris gezeigten.

Die digitale Signalverarbeitung ermöglicht jedoch auch eine Anpassung an die gegebenen Signale. So erscheint es sinnvoller, die Zeitintervalle, aus denen die Spektren berechnet werden, an die erwartete Transitzeit eines Partikels im Messvolumen anzupassen und auf eine Mittelung zu verzichten. Daher wurden anschließend Spektren über Intervalle von jeweils 1 ms aus dem identischen, aufgezeichneten Empfangssignal berechnet. Aus diesen Spektren (eines davon exemplarisch rechts in Abbildung 5 gezeigt) ist ersichtlich, dass sich in nahezu jedem Intervall aus 1 ms mehrere Partikel gleichzeitig im Messvolumen befanden. Die nur jeweils 1-2 kHz breiten Signale einzelner Partikel erlauben eine weitaus präzisere Bestimmung der Dopplerfrequenz als die gemittelten Spektren geringer Frequenzauflösung.

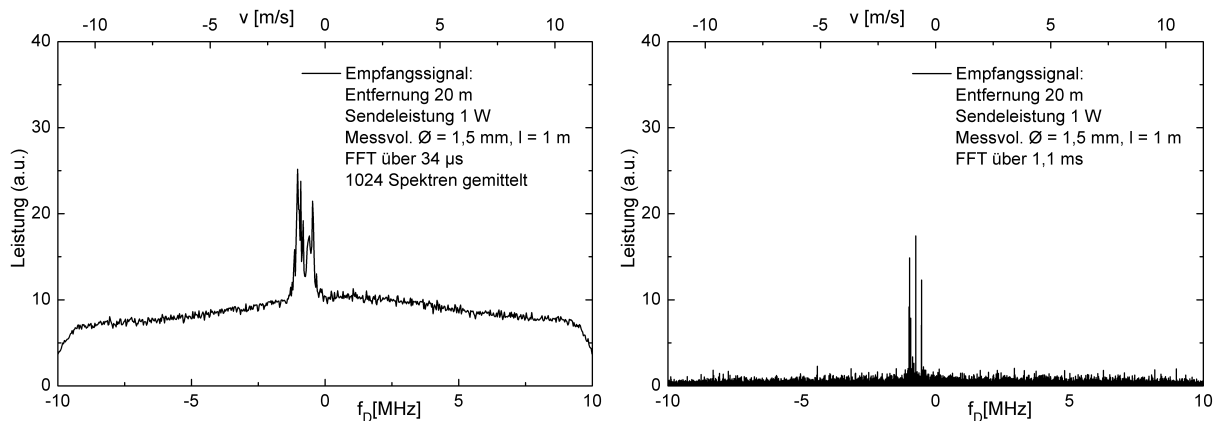


Abb. 5: Spektren der Empfangssignale bei großem Messvolumen nach unterschiedlicher Auswertung

Hierbei zeigt sich auch bereits bei einer Messvolumenlänge von 1 m eine deutliche Streuung der Partikelgeschwindigkeit. Dies ist besonders relevant, wenn später aus drei Geschwindigkeitsvektoren unter spitzen Winkeln horizontale Geschwindigkeiten zu ermitteln sind. Daher wurde anschließend der Abstand zwischen Sende- und Empfangsoptik auf 200 mm vergrößert, um die Messvolumenlänge bei gleichem Messabstand zunächst auf ca. 15 cm zu reduzieren. In der Mittelung (Abbildung 6 links) zeigt sich bereits ein deutlich schmaleres Spektrum. Gleichzeitig sind in der Auswertung mit angepassten Zeitintervallen nur noch in etwa einem fünftel der Intervalle Partikelsignale zu erkennen (exemplarisch rechts in Abbildung 6), mehrere Partikel in einem Intervall sind sehr selten zu finden.

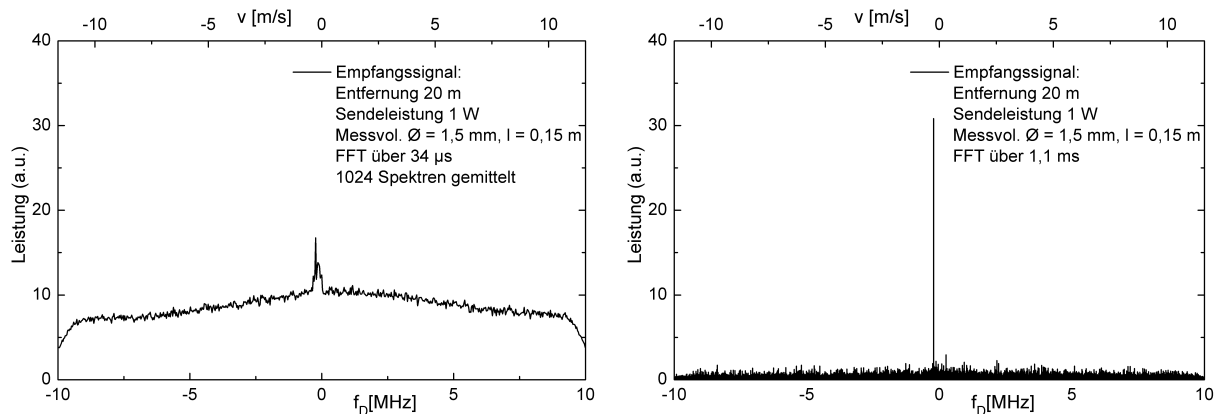


Abb. 6: Spektren der Empfangssignale bei kleinem Messvolumen nach unterschiedlicher Auswertung

Je kürzer die Messvolumenlänge wird - bei Abständen zwischen Sender und Empfänger in der Größenordnung der Messhöhe wird sie nur noch wenige Millimeter betragen - desto seltener werden Partikelsignale zu empfangen sein. Umso wichtiger wird jedoch auch eine an die Verweildauer des Partikels im Messvolumen angepasste Auswertung, denn das beste Signal-Rausch-Verhältnis wird erreicht, wenn das auszuwertende Intervall möglichst das gesamte Streulichtsignal eines Partikels, aber kein unnötiges Rauschen enthält.

Zusammenfassung

Die mit einem ersten Testaufbau des Doppler-Lidar-Systems mit 1 W Sendeleistung erhaltenen Partikel-Streulichtsignale aus langen Messvolumina in einer Entfernung von 20 m entsprechen der Literatur. Für den Aufbau des geplanten Systems mit drei Empfängern ist jedoch ein großer Abstand zwischen Sender und Empfänger notwendig, der zu weit kürzeren Messvolumina und damit zu geringeren Datenraten führen wird. Auch wenn eine Datenrate im Sekundenbereich noch für Geschwindigkeitsmessungen ausreichen würde, wäre eine Strahljustage damit sehr erschwert. Mithilfe eines anzuschaffenden Faserverstärkers mit 30 W Ausgangsleistung kann auch das Streulicht kleinerer Partikel genutzt werden, so dass auch bei kleinen Messvolumina und großen Messentfernungen eine ausreichende Datenrate erwartet wird. Nach Fertigstellung kann das rückführbare Doppler-Lidar-System zur Untersuchung der Geländeabhängigkeit und standortabhängigen Kalibrierung konventioneller Lidar-Systeme dienen oder direkt für rückgeführte Windpotentialanalysen genutzt werden.

Literatur

Abdelazim, S., Santoro, D., Arend, M., Moshary, F., Ahmed, S., 2010: „Development of All-fiber coherent Doppler LIDAR system for wind sensing“, 15th Symposium on Meteorological Observation and Instrumentation, 90th Annual AMS Meeting, Atlanta

Ando, T., Kameyama, S., Hirano, Y., 2008: „All-fiber Coherent Doppler LIDAR technologies at Mitsubishi Electric Corporation“, 14th International Symposium for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1, No. 012011

Eggert, M., Müller, H., Többen, H., 2011: „Konzeption eines Doppler-Lidar-Transferrnormals zur Windgeschwindigkeitsmessung“, Proceedings der 19. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 45/1-45/6

Foussekis, D., 2011: „Measurements & inter-comparisons in Complex Terrain“, Upwind Deliverable D6.6.1-B

Harris, M., Constant, G., Ward, C., 2001: „Continuous-wave bistatic laser Doppler wind sensor“, Appl. Opt., No. 40, 1501–1506