

Doppler-Lidar-Transfornormal zur ortsaufgelösten, vektoriellen Windgeschwindigkeitsmessung

Doppler-Lidar-Standard For Spatially Resolved Wind Vector Measurements

M. Eggert, H. Müller, H. Többen

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland

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

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

Kurzfassung

Wesentliche Grundlage bei der Planung von Windparks ist eine Abschätzung ihrer Rentabilität, berechnet aus sogenannten Windpotentialanalysen zur Bewertung der Windverhältnisse am beabsichtigten Standort und den Leistungskurvenvermessungen der dort aufzustellenden Windkraftanlagen. Die hierfür erforderliche Erfassung von Windgeschwindigkeitsprofilen in Höhe der Rotorblätter wird bislang mit rückgeführten (von akkreditierten Kalibrierlaboratorien kalibrierten), an Messmasten montierten Anemometern durchgeführt. Aufgrund des beträchtlichen Aufwands hinsichtlich der Messmastenerstellung wurden bereits wirtschaftlichere Alternativen mit Fernmessverfahren auf Basis von Doppler-Lidar-Systemen untersucht. 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) und zur vollständigen Erfassung des Geschwindigkeitsvektors in verschiedene Richtungen geschwenkt werden. Sowohl aufgrund der resultierenden Höhengauflösung von typischerweise etwa 20 m, als auch aufgrund möglicher Verfälschungen des Messergebnisses durch Strömungsinhomogenitäten über den Schwenkbereich des Strahls, können in komplexem Gelände Messabweichungen in der Größenordnung von 10 % auftreten, die eine Rückführung von Lidar-Windgeschwindigkeitsmessungen bisher noch nicht mit der geforderten Messunsicherheit zulassen.

Der Einsatz bistatischer Doppler-Lidar-Systeme mit räumlich getrennten Sende- und Empfangseinrichtungen erlaubt hingegen räumliche Auflösungen im Kubikzentimeterbereich und die vektorielle Erfassung der Geschwindigkeit an einem einzelnen Messort. Dieser Beitrag beschreibt die Konzeption und den Aufbau eines solchen bistatischen Doppler-Lidar-Systems, welches sowohl zum Einmessen eines konventionelles Systems im jeweiligen Gelände, als auch selbst für die Erstellung rückgeführter Windpotentialanalysen und Leistungskurven genutzt werden soll. Vektorielle Windmessungen anhand der mit mehreren Empfängern aufgenommenen Streulicht-Spektren von Einzelpartikeln in einem Arbeitsabstand von bis zu 100 m werden diskutiert.

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 in der Größenordnung von 10 % entstehen (Bingöl 2009, Foussekis 2011).

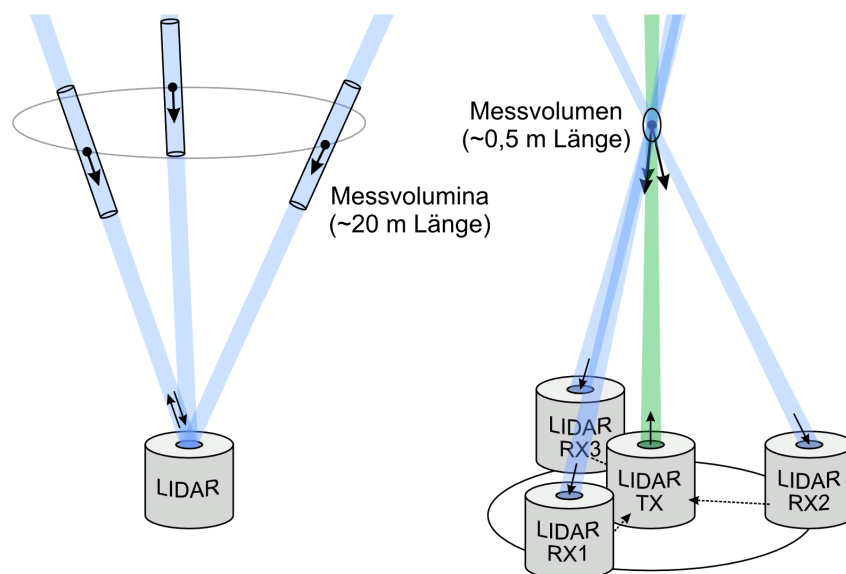


Abb. 1: Vektorielle Strömungsgeschwindigkeitsmessung mit konventionellen, monostatischen Wind-Lidar-Systemen (links) und einem bistatischen System (rechts).

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 mit Durchmesser im Millimeter- und Länge im Dezimeterbereich, 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 Geschwindigkeitskomponenten, jeweils in Richtung der Winkelhalbierenden zwischen Sende- und Empfangsstrahl, an einem Ort bzw. an einzelnen Partikeln gleichzeitig 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 sehr geringeren Empfangsleistung des Streulichts. Einerseits durchqueren nur wenig Streupartikel das vergleichsweise kleine Messvolumen, andererseits muss Licht abseits der stark ausgeprägten Rückstreurichtung detektiert werden. Der Nachteil der geringeren Anzahl von Partikeln relativiert sich jedoch bei der Betrachtung von Einzelpartikeln, da sich deren Streulichtspektrum jeweils auf eine sehr schmale Bandbreite konzentriert (vgl. Eggert 2012), während die Dopplereffrequenzen der vielen Partikel aus dem ausgedehnten Messvolumen eines konventionellen Wind-Lidar-Systems weit gestreut sind.

Aufbau des bistatischen Systems

Das aufgebaute 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 zueinander erlaubt eine Messung der Laufzeit und damit die Bestimmung der jeweiligen, durch die Justage der Empfangsoptik gewählten Messhöhe.

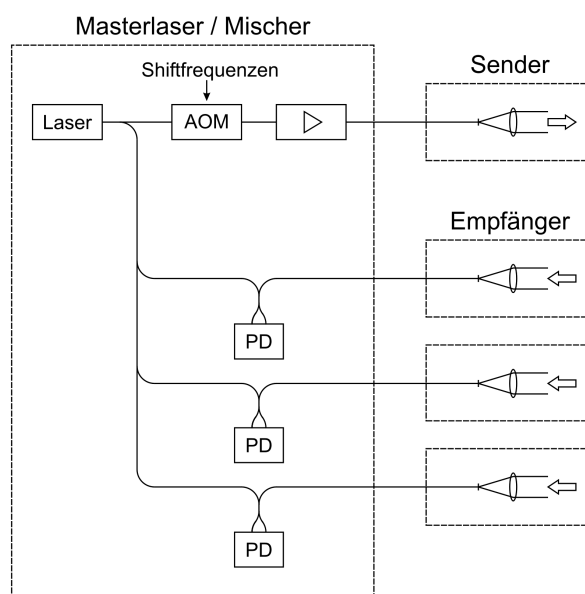


Abb. 2: Schematischer Aufbau des bistatischen Systems

Zur Auswertung wird das um die Dopplerfrequenz von bis zu 10 MHz relativ zur AOM-Frequenz von 75 MHz verschobene Empfangssignal mittels Analog-Digital-Wandlern (ADCs) 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) soll zukünftig eine Echtzeitauswertung der Daten mit einer FFT-Auflösung in der Größenordnung von 1 kHz erlauben.

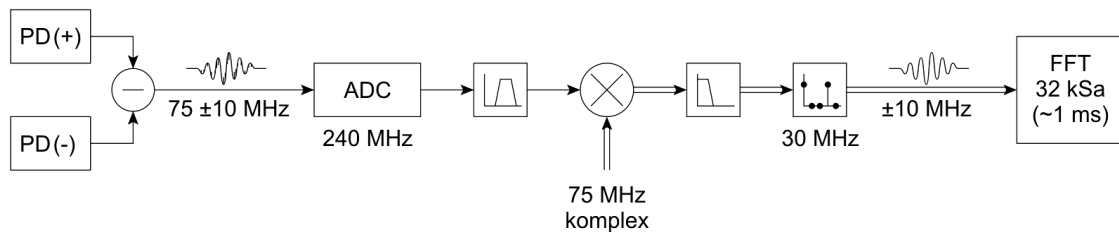


Abb. 3: Prinzip der Signalvorverarbeitung

Abbildung 4 zeigt das in Singlemode-Faseroptik aufgebaute Testsystem mit einem Sender und zwei Empfängern zur versuchsweise gleichzeitigen Detektion von Streulicht einzelner Partikel. Der Durchmesser der Optiken beträgt 30 mm und ihr Abstand hier jeweils 400 mm, wobei in den folgenden Messungen auch Abstände von jeweils 800 mm genutzt werden. Im Vordergrund befinden sich der Breadboardaufbau mit Faserlaser, Modulator, Mischer und Detektoren, sowie darunter ein faseroptischer Verstärker (EDFA) mit 30 W optischer Ausgangsleistung.

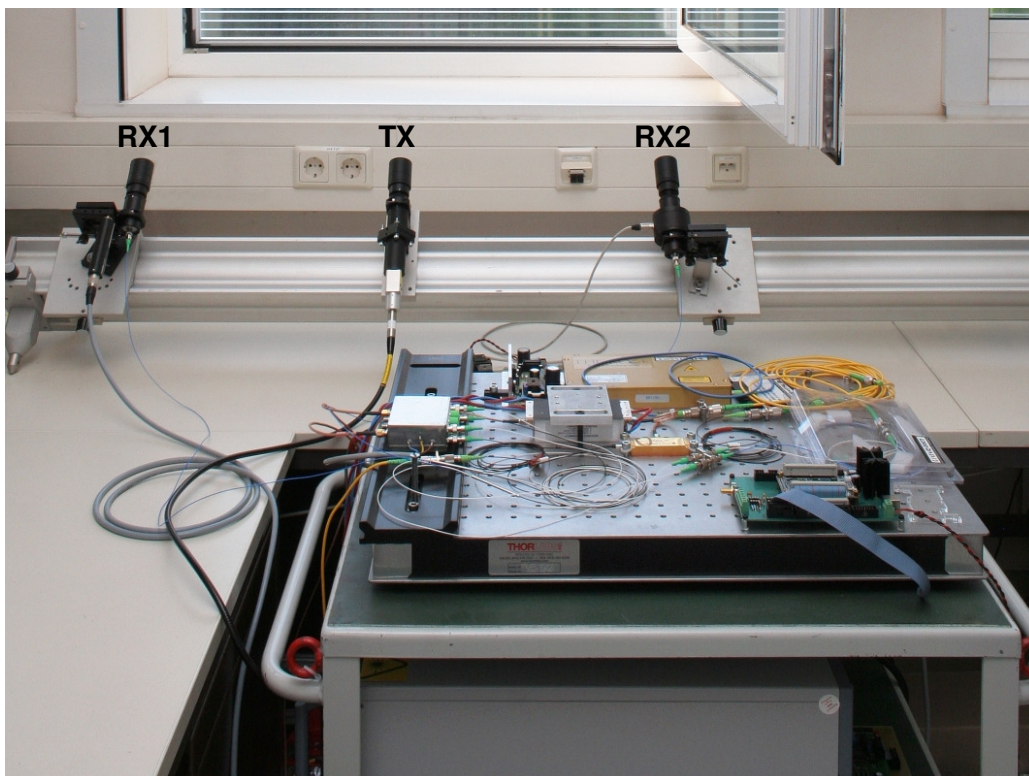


Abb. 4: Lidar-Testsystem mit einer Sendeoptik (TX) und zwei Empfangsoptiken (RX1, RX2)

Messergebnisse

Um die Ergebnisse verschiedener Auswerteverfahren miteinander vergleichen zu können, werden die Empfangssignale zunächst nicht in FPGAs vorverarbeitet, sondern mittels einer Transientenrecorderkarte direkt im PC aufgezeichnet. Die zuvor mit einer Sendeleistung von 1 W erzielten Empfangssignale waren mit den von Harris (2001) dokumentierten vergleichbar, anschließend wurde die Auswertung hinsichtlich einer Verweildauer der Partikel im Messvolumen in der Größenordnung von 1 ms optimiert (Eggert 2012).

Auch bei einer Sendeleistung von 30 W hat sich gezeigt, dass eine akzeptable Messrate nur mit vergleichsweise geringem Abstand zwischen Sende- und Empfangsoptiken, also mit Empfängern nahe der Rückstreuquelle zu erzielen ist. Bei einem Linsendurchmesser von 30 mm und einer Entfernung von 100 m zum Messvolumen beträgt der maximale sinnvolle Abstand zwischen Sende- und Empfangsoptik etwa 2 m. Aufgrund des somit entstehenden spitzen Winkels zwischen den Empfangsrichtungen sind die Dopplerfrequenzen bezüglich der vertikalen Geschwindigkeitskomponente um Größenordnungen empfindlicher als bezüglich der horizontalen. Folglich bewirken bereits geringe Schwankungen in der vertikalen Strömungskomponente, wie sie durch Turbulenz in diesen bodennahen Luftschichten entstehen, große Schwankungen in den entstehenden Dopplerfrequenzen. Eine hochaufgelöste Bestimmung der horizontalen Komponente ist folglich nur möglich, indem die in mehreren Empfangsrichtungen auftretenden Dopplerfrequenzen ein- und desselben Partikels miteinander verglichen werden.

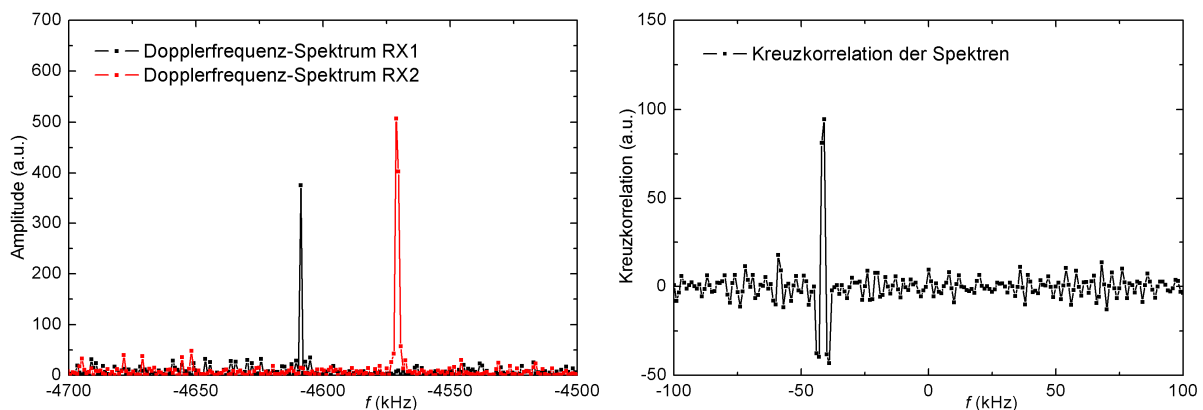


Abb. 5: Ausschnitt der Empfangssignal-Spektren zweier Empfänger (links) und Ergebnis der Kreuzkorrelation zwischen den Ableitungen beider Spektren (rechts).

Ein 200 kHz breiter Ausschnitt der 20 MHz breiten Empfangssignal-Spektren ist in Abbildung 5 dargestellt. Er enthält die Streulichtsignale eines Partikels in 100 m Messentfernung, aufgenommen mit zwei Empfängern. Aus der Differenz der Dopplerfrequenzen, entsprechend dem Maximum der Kreuzkorrelation zwischen beiden Spektren, kann auf die Geschwindigkeitskomponente in Querrichtung geschlossen werden. Gegeben durch die Geometrie ergibt sich bei einer Frequenzauflösung von 1 kHz in dieser Messung eine Geschwindigkeitsauflösung von etwa 0,1 m/s am Einzelpartikel.

In einer weiteren Messung wurde die Querkomponente der Geschwindigkeit in 50 m Messentfernung über einen Zeitraum von einer Stunde aufgezeichnet. Gleichzeitig wurde mithilfe einer Modulation des Sendesignals eine Laufzeitmessung durchgeführt, die daraus resultierende Entfernung der Partikel ist zusammen mit ihrer Geschwindigkeit in Abbildung 6 dargestellt.

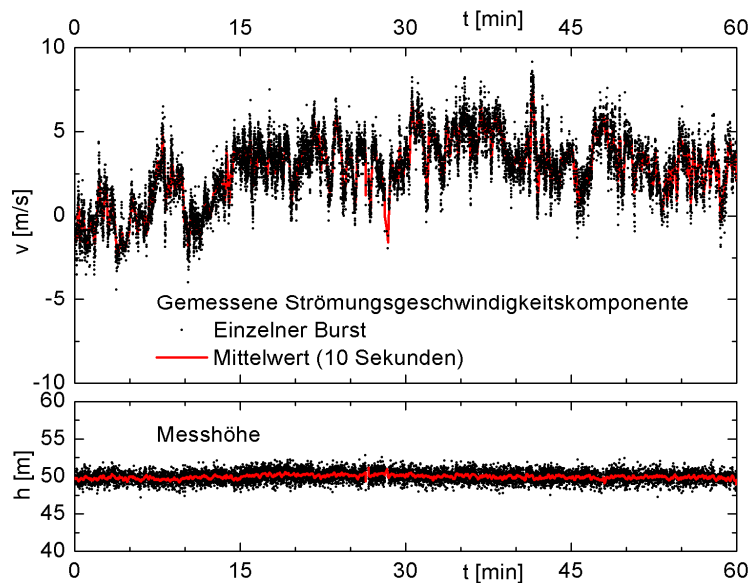


Abb. 6: An einzelnen Partikeln gemessene Geschwindigkeitskomponente (oben) und ihre gleichzeitig erfasste Messentfernung (unten)

Obwohl bei der Signalverarbeitung mittels Transientenrecorderkarte im PC lediglich Spektren etwa jedes hundertsten Millisekunden-Intervalls berechnet werden können, weist diese Messung mit durchschnittlich vier ausgewerteten Partikeln je Sekunde bereits jetzt eine höhere Zeitauflösung auf als konventionelle Lidar-Systeme auf Basis rotierender Strahlen.

Zusammenfassung

Anhand des Lidar-Testsystems konnte das Verfahren zur Bestimmung einer Geschwindigkeitskomponente in Querrichtung aus den mit zwei Empfängern aufgenommenen Streulichtsignalen von Einzelpartikeln verifiziert werden. Mithilfe eines dritten Empfängers können die Geschwindigkeiten von Einzelpartikeln zukünftig vollständig vektoriell erfasst werden. Der Aufbau elektromechanisch verstellbarer Optiken zur automatischen Justage und Nachführung befindet sich in Planung.

Nachdem die Sendeleistung des Lidar-Testsystems von bislang 1 W auf 30 W erhöht werden konnte, wurden auch mit vergleichsweise kleinen Send- und Empfangsoptiken, sowie mit einer rechenzeitaufwendigen Auswertung im PC, bereits Messraten im Sekundenbereich in Messhöhen bis 100 m erreicht. Zukünftig soll die Messrate mithilfe größerer Optiken und einer Empfangssignal-Vorauswertung in FPGAs nochmals deutlich erhöht werden, um auch Messungen in größeren Höhen zu ermöglichen.

Nach Inbetriebnahme der größeren Optik und der schnelleren Auswertung könnte auch der Abstand von Send- und Empfangsoptiken nochmals angepasst werden. Größere Abstände führen zu einer feineren Geschwindigkeitsauflösung, aufgrund der niedrigeren Empfangsleistung aber auch zu einer geringeren Messrate. Sinnvollerweise sollte die Streuung der tatsächlichen Geschwindigkeit von Einzelpartikeln mit in die Auslegung des Systems einbezogen werden, um höchste Messraten bei einer angepassten Auflösung zu erreichen.

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

Bingöl, F., Mann, J., Foussekis, D., 2009: „Conically scanning lidar error in complex terrain“, Meteorologische Zeitschrift, Vol. 18 Nr. 2, 189-195

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

Eggert, M., Müller, H., Többen, H., 2012: „Doppler-Lidar-Transfornormal zur Windgeschwindigkeitsmessung: Aktueller Entwicklungsstand“, Proceedings der 20. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 10/1-10/6

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