Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik"
9. – 11. September 2014, Karlsruhe

Zeitaufgelöste, vektorielle Vergleichsmessungen zwischen dem Doppler-Lidar-Transfernormal der PTB und einem Referenz-Ultraschallanemometer

Time resolved wind vector comparison measurements between the PTB Lidar transfer standard and a calibrated ultrasonic anemometer

M. Eggert, C. Gutsmuths, 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 Erfassung von Windgeschwindigkeiten wird bislang mit kalibrierten Anemometern an Messmasten durchgeführt. Aufgrund des beträchtlichen Aufwands hinsichtlich der Messmastenerstellung wurden bereits wirtschaftlichere Alternativen mit Fernmessverfahren auf Basis von Doppler-Lidar-Systemen untersucht. Bisherige 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 Höhenauflösung 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 werden diskutiert und Vergleichsmesungen mit einem kalibrierten Ultraschallanemometer vorgestellt.

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 Entfernungsauflösung 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).

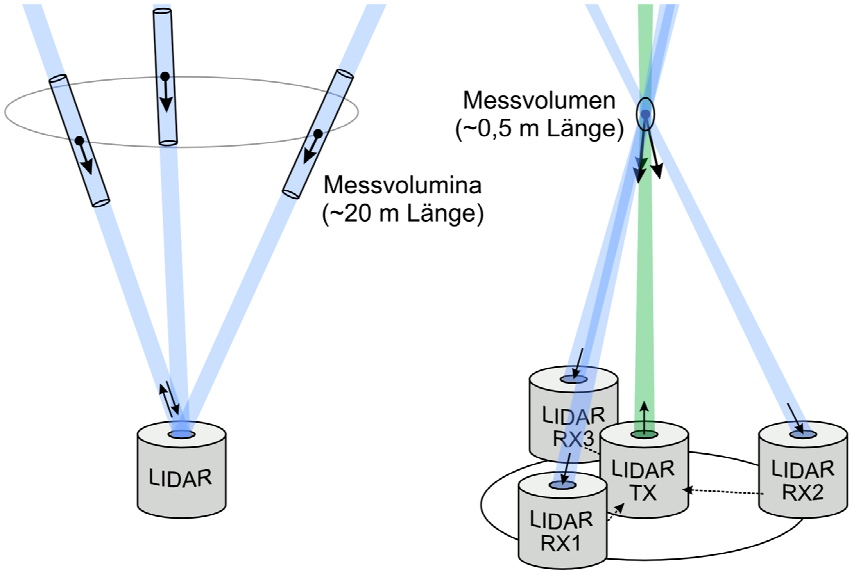

Abb. 1: Vektorielle Strömungsgeschwindigkeitsmessung mit konventionellen, monostatischen Wind-Lidar-Systemen (links) und einem bistatischen System (rechts).

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 wenige Streuparktikel 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 Dopplerfrequenzen der vielen Partikel aus dem ausgedehnten Messvolumen eines konventionellen Wind-Lidar-Systems weit gestreut sind.

Aufbau des bistatischen Systems

Das aufgebaute bistatische System besitzt ebenso wie konventionelle Systeme einen schmalbandigen Masterlaser, dessen Licht mithilfe eines akusto-optischen Modulators (AOM) frequenzverschoben und anschließend verstärkt wird. Das mit drei Empfängern aufgenommene, dopplerverschobene Streulicht wird mit dem Licht des Masterlasers zurückgemischt und die an den Photodetektoren entstehenden Signale mithilfe von Messkarten im PC digitalisiert und ausgewertet (Eggert 2013).

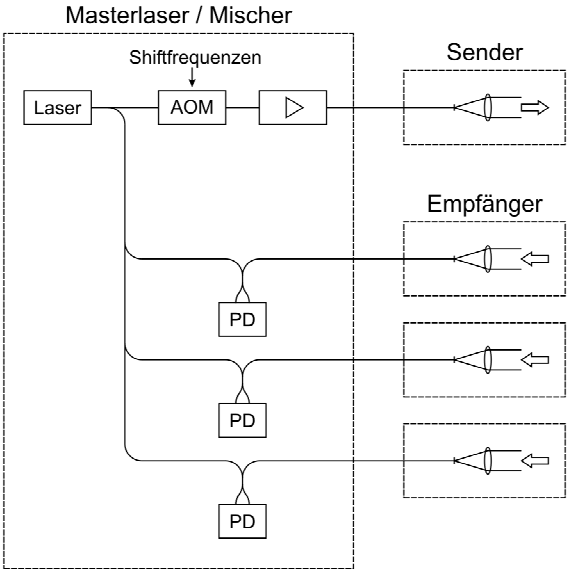

Abb. 2: Schematischer Aufbau des bistatischen Systems

Abbildung 3 zeigt das aufgebaute System mit Sende- und Empfangsoptiken von 50 mm Durchmesser und einem variablen Abstand zwischen Sendeoptik und Empfangsoptiken von 500 mm bis 1000 mm. Alle Optiken verfügen über eine schrittmotorgesteuerte Fokussierung, die Empfangsoptiken können darüber hinaus schrittmotorgesteuert geneigt und geschwenkt werden.

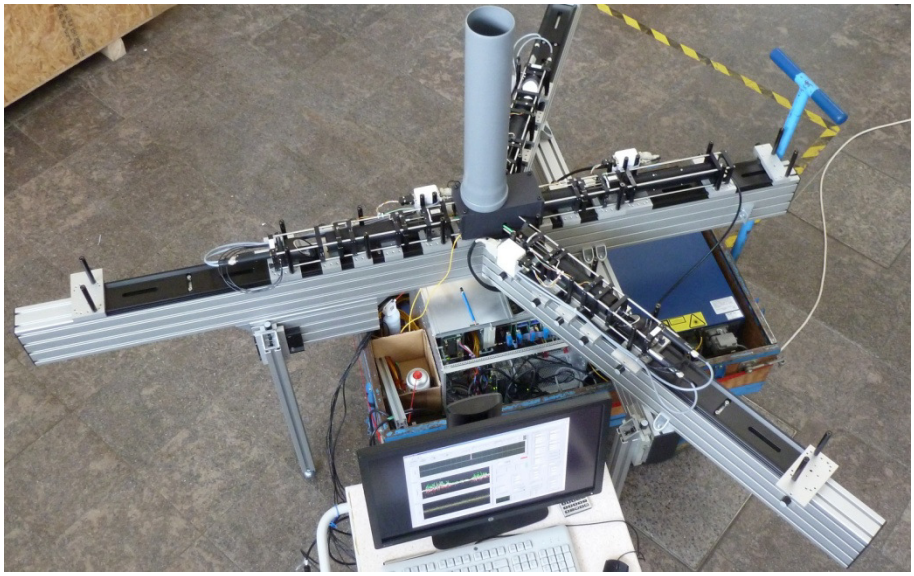

Abb. 3: Transportables Lidar-System

Um die Geschwindigkeiten einzelner Partikel vektoriell bestimmen zu können, müssen die Strahltaillen der Empfänger in drei Dimensionen mit der Strahltaille des Senders überlagert werden. Angesichts ihres Durchmessers – beispielweise etwa 5 mm in 100 m Messhöhe – erfordert dies einen sehr stabilen und reproduzierbar verstellbaren optomechanischen Aufbau. Um dieses zu überprüfen, wurden die Fokuseinstellungen schrittweise verändert und dabei die Amplituden der Streulichtsignale jeweils über einen horizontalen Schwenk der Empfangsoptiken aufgezeichnet und ihre Lage miteinander verglichen. Wie die Bildschirmkopie unseres Steuerungsprogramms in Abbildung 4 exemplarisch für einen Empfangskanal zeigt, bleibt die Lage des Messvolumens über viele Schwenks stabil.

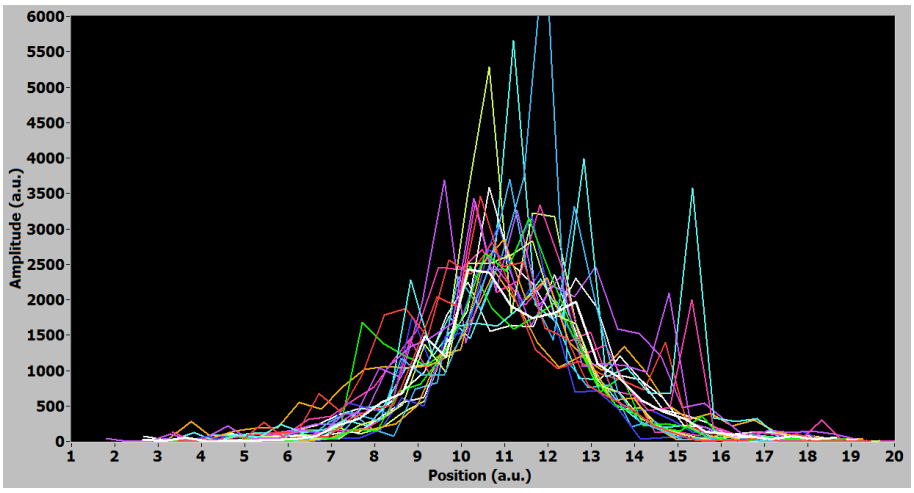

Abb. 4: Amplituden des Empfangssignals über viele Schwenks der Empfangsoptik bei gleichzeitiger Verstellung von Sende- und Empfangsfokus

Messungen

Zur Einsatzerprobung des Lidar-Systems wurden Vergleichsmessungen mit einem kalibrierten Ultraschall-Anomemeter in einer gestörten Strömung durchgeführt. Hierzu wurde das Ultraschall-Anemometer in 10 m Höhe an einem Masten direkt neben einem Gebäude montiert und das Messvolumen des Lidar-Systems etwa einen Meter davon entfernt in der gleichen Höhe ausgerichtet

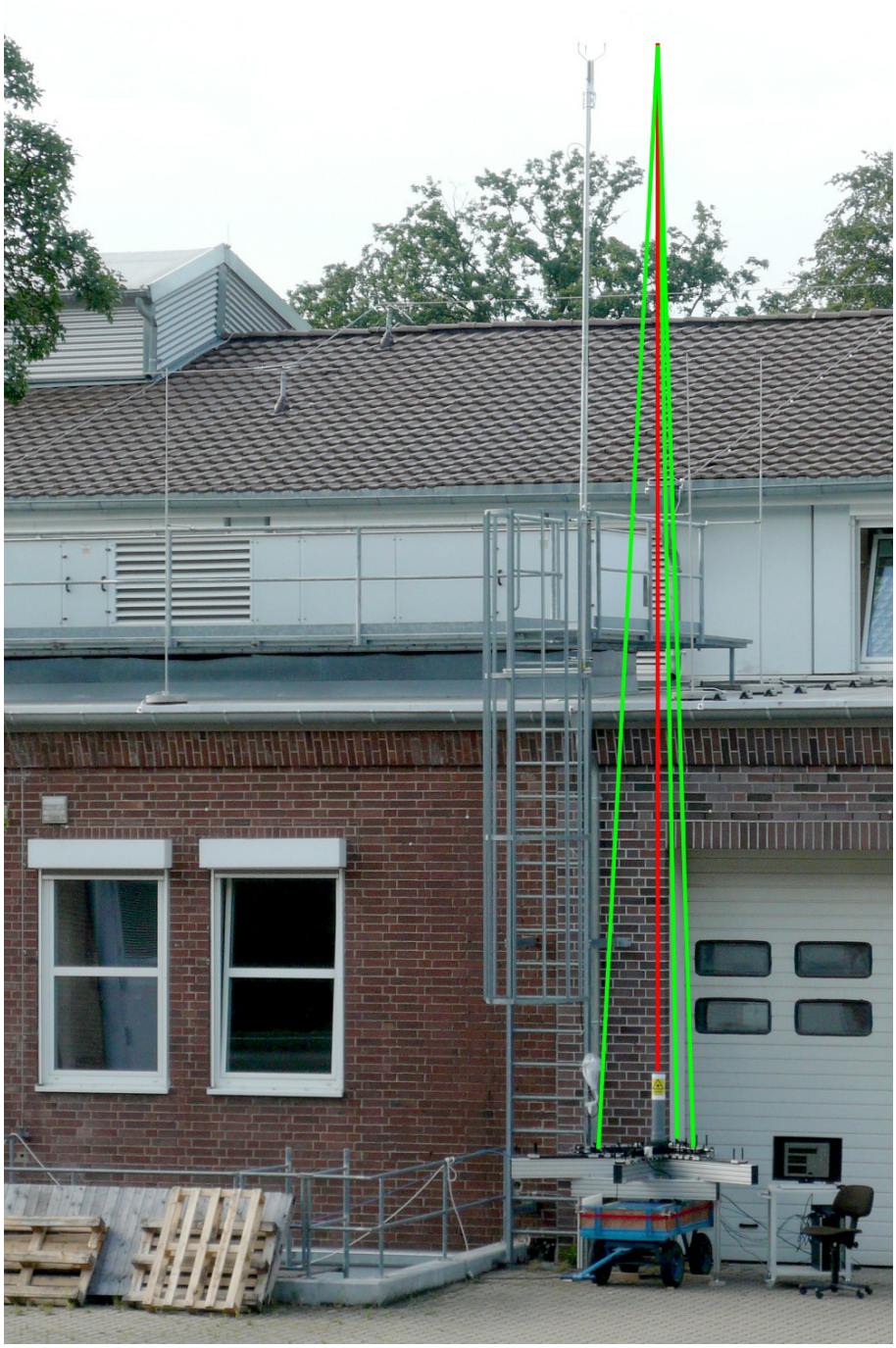

Abb. 5: Aufbau der Vergleichsmessung zwischen Ultraschall-Anemometer und PTB-Lidar mit eingezeichnetem Strahlengang des Lidar-Systems

Die Messergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Messungen sowohl für den Betrag als auch für die Richtung der gemessenen Windgeschwindigkeiten. In Abbildung 6 ist hierzu das Ergebnis der gesamten Messung von einer Stunde Dauer in minütlichen Mittelwerten zusammengefasst, in Abbildung 7 ist ein Zeitausschnitt von 5 Minuten in der Messauflösung von 1 Hz dargestellt.

Auch die Mittelwerte der Geschwindigkeit über eine Stunde – 1,93 m/s gemessen mit dem Lidar-System gegenüber 1,85 m/s gemessen mit dem Ultraschall-Anemometer – zeigen angesichts des Abstands zwischen beiden Systemen und der gestörten Strömung eine gute Übereinstimmung.

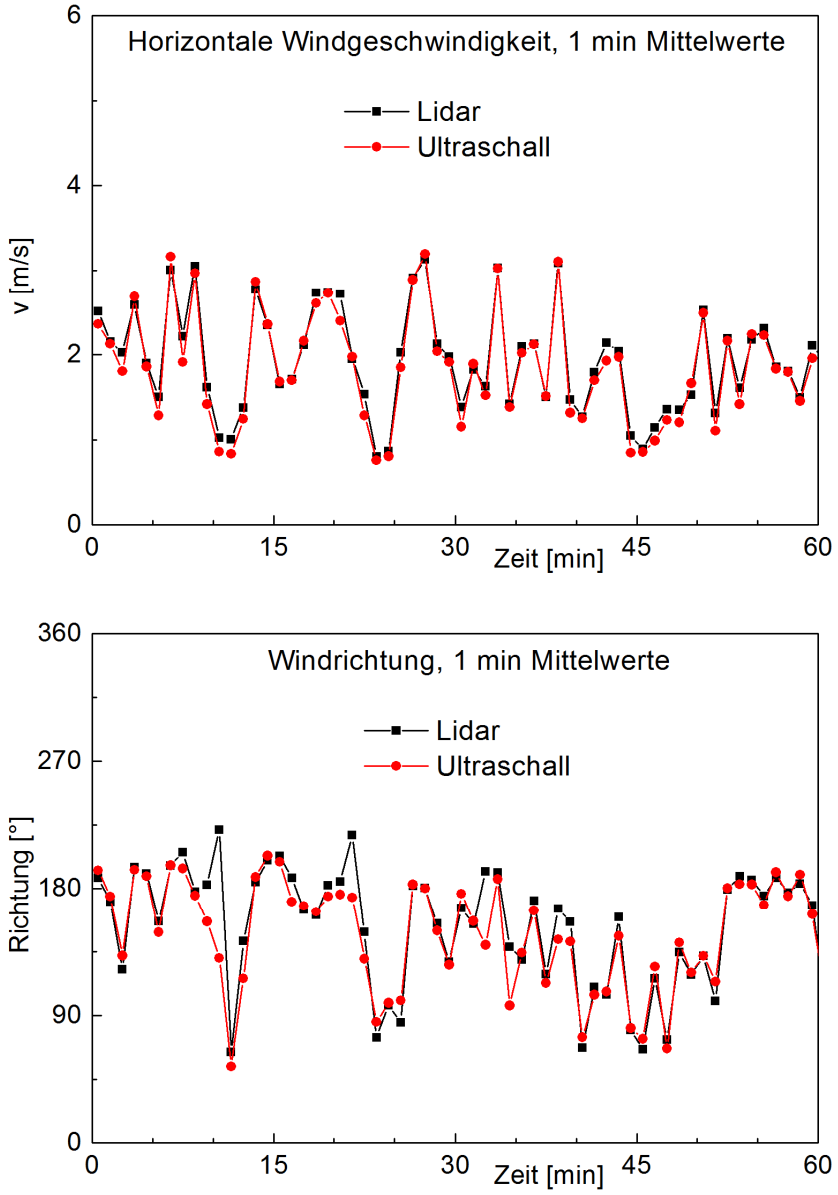

Abb. 6: Betrag und Winkel der gemessenen Strömung, gemittelt über 1 Minute

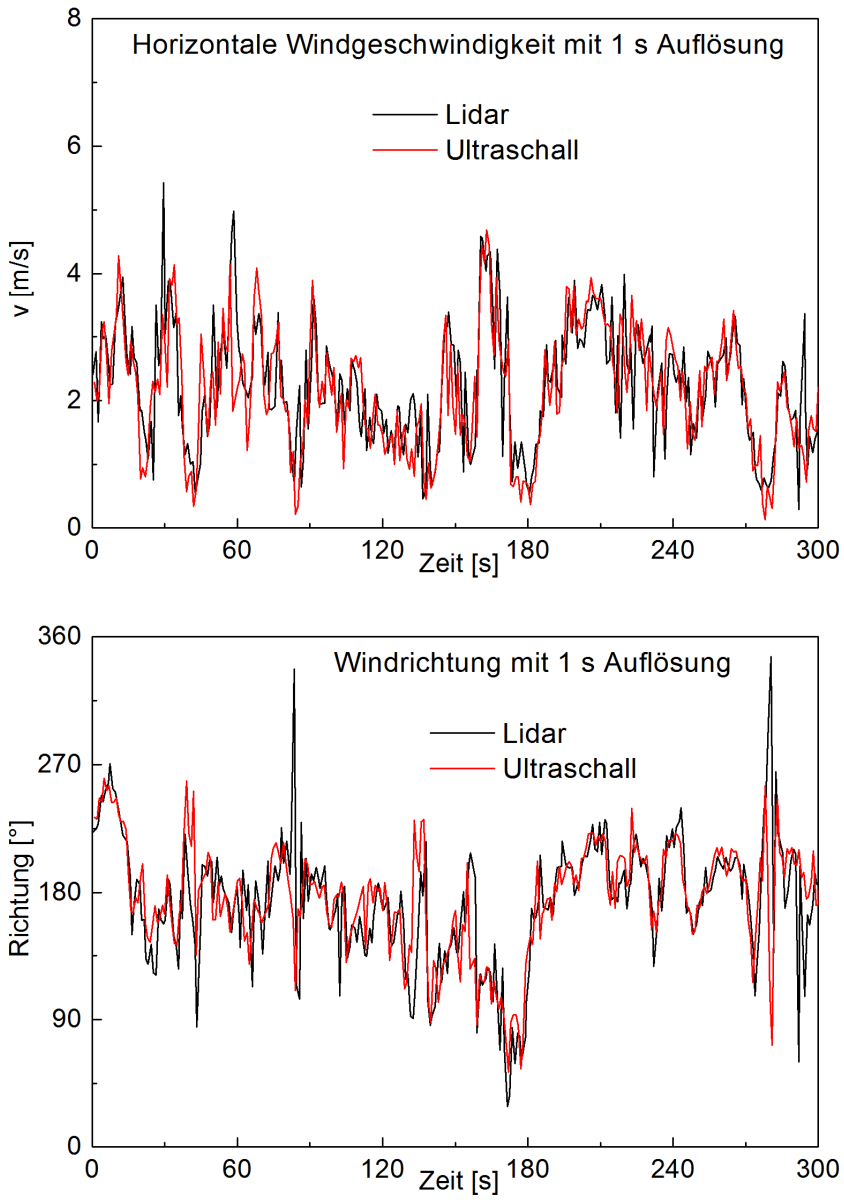

Abb. 7: Betrag und Winkel der gemessenen Strömung, Auflösung 1 Sekunde

Zusammenfassung

Mit dem realisierten transportablen Wind-Lidar-System der PTB konnten bereits Messungen des Windgeschwindigkeitsvektors in Messhöhen von bis zu 200 m vorgenommen werden. Hierzu wurden die von drei Empfangsoptiken simultan detektierten Streulichtsignale einzelner Aerolsole zur Bestimmung des Windvektors mittels Korrelationsalgorithmen ausgewertet, wobei die automatisierte Fokussierung und Justierung der das Messvolumen bildenden Strahlen bereits eine hinreichende Stabilität für erste Vergleichsmessungen mit kalibrierten kommerziellen Anemometern zuließ.

Die vorgestellten Vergleichsmessungen zwischen dem PTB-Lidar und einem kalibrierten Ultraschallanemometer sind ein erster Schritt auf dem vielversprechenden Entwicklungsweg des PTB-Lidar-Systems zu einem Bezugsnormal für auf die SI-Einheiten rückgeführte Windgeschwindigkeitsmessungen in großen Messhöhen.

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-Transfernormals zur Windgeschwindigkeitsmessung“, Proceedings der 19. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 45/1-45/6

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

Eggert, M., Müller, H., Többen, H., 2013: „Doppler-Lidar-Transfernormal zur ortsaufgelösten, vektoriellen Windgeschwindigkeitsmessung“, Proceedings der 21. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 43/1-43/7

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