

## **Zeitaufgelöste, vektorielle Vergleichsmessungen zwischen dem Doppler-LIDAR-Transferstandard der PTB und konventionellen LIDAR-Systemen**

### **Time resolved wind vector comparison measurements between the PTB LIDAR transfer standard and a conventional LIDAR-system**

**C. Gutsmuths, M. Eggert, H. Müller, H. Többen**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland

Schlagworte: Doppler-LIDAR, Wind-LIDAR, bistatisch, orts aufgelöst, 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 Windpotentialanalysen zur Bewertung der Windverhältnisse am beabsichtigten Standort und den Leistungskurvenvermessungen der aufzustellenden Windkraftanlagen. Die Erfassung von Windgeschwindigkeiten wird bislang mit kalibrierten Anemometern an Messmasten durchgeführt. Aufgrund des beträchtlichen wirtschaftlichen Aufwands hinsichtlich des Aufbaus von Messmasten wurden bereits 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 nutzen üblicherweise eine gemeinsame Sende-/Empfangsoptik, so dass die Sende- und Empfangsachse identisch ist (monostatisch, monoaxial). Um mit diesen LIDAR-Systemen einen vollständigen Geschwindigkeitsvektor bestimmen zu können, muss die Optik in verschiedene Richtungen geschwenkt werden. Sowohl durch die resultierende Höhengauflösung von typischerweise etwa 20 m, als auch durch mögliche Verfälschungen der Messergebnisse durch Strömungsinhomogenitäten über den Schwenkbereich des Strahls, können in komplexem Gelände Messabweichungen in der Größenordnung von 10 % auftreten. Aus diesem Grund ist eine Rückführung von Wind-LIDAR-Systemen mit den geforderten Messunsicherheiten bisher generell noch nicht möglich.

Der Einsatz eines bistatischer Doppler-LIDAR-Systems mit räumlich getrennten Sende- und Empfangseinrichtungen erlaubt hingegen räumliche Auflösungen im Kubikzentimeterbereich und die vektorielle Erfassung der Geschwindigkeit von einzelnen Partikeln. Dieser Beitrag beschreibt die Konzeption und den Aufbau eines solchen bistatischen Doppler-LIDAR-Systems, welches zur Charakterisierung konventioneller Systeme im Gelände genutzt werden soll. Mit dem bistatischen-Lidar-System an zwei Standorten mit unterschiedlicher Geländestruktur durchgeführte Windgeschwindigkeitsmessungen werden vorgestellt und mit den zeitgleich aufgezeichneten Messwerten eines kommerziellen Lidar-Systems verglichen und diskutiert.

## Einleitung

Kohärente Doppler-LIDAR-Systeme werden bereits vielfältig für Messungen von Windgeschwindigkeiten eingesetzt. Sie beruhen auf der Detektion einer Interferenz aus einem ausgekoppelten Teil des Sendelichtes mit dem dazu kohärenten empfangenen Licht, welches von Partikeln rückgestreut und damit gegenüber dem ausgesendeten Licht dopplerverschoben ist. Kommerzielle Wind-LIDAR-Systeme haben einen monoaxialen Aufbau, das heißt die optischen Achsen von Sende- und Empfangsstrahl sind identisch. Folglich wird das Streulicht aller Partikel entlang des Sendestrahls auch vom Empfänger detektiert. Je nach Aufbau wird eine Entfernungselektion mittels Laufzeitmessung oder Fokussierung vorgenommen. 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. Das ist in komplexem Gelände jedoch in der Regel nicht gegeben (Eggert 2011), so dass hier Messabweichungen in der Größenordnung von 10 % entstehen können (Bingöl 2009, Foussekis 2011).

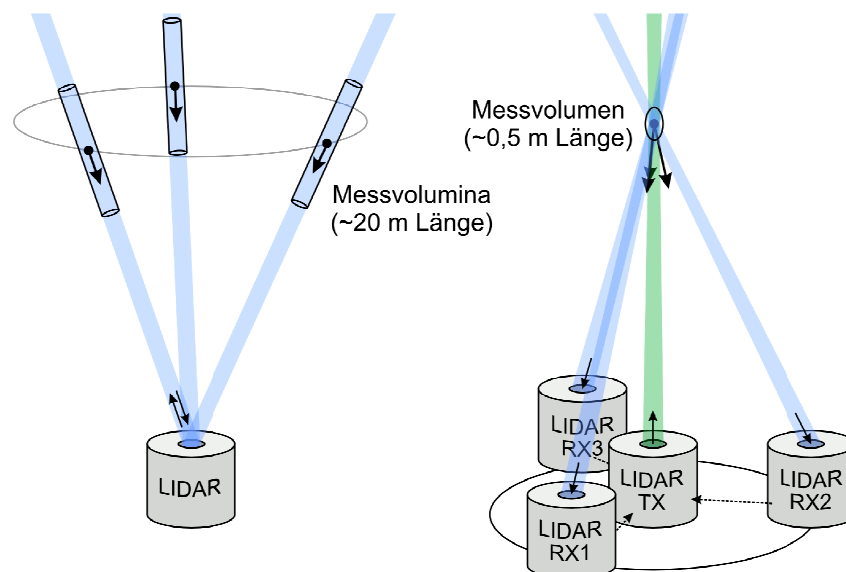


Abb. 1: Vektorielle Strömungsgeschwindigkeitsmessung mit konventionellen, monostatischen Wind-LIDAR-Systemen (links) und einem bistatischen System (rechts).

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 als 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 (TX) getrennten Empfängern (RX) besitzt ein durch die Geometrie des Aufbaus örtlich aufgelöstes Messvolumen. Dies wird erreicht, indem nur Streulicht von Partikeln empfangen wird, die sowohl vom TX-Strahl beleuchtet als auch vom RX-Strahl beobachtet werden. So beträgt das Messvolumen für eine Messbasis (RX ->TX) von 1 m und eine Beobachtungshöhe von 100 m nur  $10 \text{ cm}^3$  ( $\varnothing$  5 mm, Länge 0,6 m). Durch Laufzeitmessungen wird die Höhe des Messvolumens bestimmt. Zur Feinjustage der Optiken werden spezielle Positioniersysteme, Messverfahren und Auswertestrategien verwendet um sicherzustellen, dass alle drei RX-Strahlen die Achse des TX-Strahl im gleichen Punkt schneiden. So können die drei Geschwindigkeitskomponenten an einzelnen Partikeln gleichzeitig gemessen werden. Die gemessene Geschwindigkeit ist dabei direkt über die Laserwellenlänge, die Zeitbasis zur Frequenz- und Laufzeitbestimmung sowie die Geometrie zur Position der RX-Module rückführbar.

Die Herausforderung bei einem bistatischen LIDAR-System besteht in der sehr geringen Empfangsleistung des Streulichts. Einerseits durchqueren nur wenige 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 Streulichtspektren jeweils auf eine sehr schmale Bandbreite konzentrieren (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 akustooptischen Modulators (AOM) frequenzverschoben und anschließend mit einem Faserverstärker verstärkt wird. Das mit drei Empfängern detektierte, dopplerverschobene Streulicht interferiert mit dem Licht des Masterlasers. Anschließend wird das Schwebungssignal an den Photodetektoren mithilfe von Messkarten im PC digitalisiert und ausgewertet (Eggert 2013).

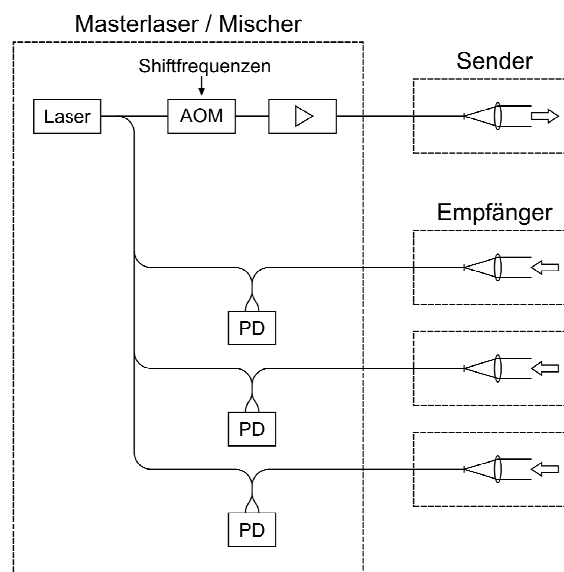


Abb. 2: Schematischer Aufbau des bistatischen Systems

Abbildung 3 zeigt den aktuellen Zustand des Systems (30.05.2015). Zur Erhöhung der Mobilität wurde der gesamte, gegenüber dem Vorjahr (Eggert 2014) unveränderte optische Aufbau auf einen PKW-Anhänger montiert. Weiterhin wurde das System in ein wetterfestes und klimatisiertes Gehäuse mit konstanter Umgebungstemperatur eingebaut, welche Voraussetzung für eine reproduzierbare und stabile Ausrichtung der RX-Strahlen ist. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Ausrichtung waren Messungen bislang nur bei bestimmten Wetterbedingungen möglich und benötigten eine regelmäßige Nachjustage, was während der Messung zu einer reduzierten Datenrate führte und die ständige Anwesenheit eines Systembetreuers erfordert hat. Mithilfe der nun gleichbleibenden Umgebungsbedingungen des optischen Aufbaus sind längerfristige, autonome Messungen geplant.



Abb. 3: Transportables LIDAR-System

## Messungen

Zur Einsatzerprobung des LIDAR-Systems wurde eine Reihe von Vergleichsmessungen durchgeführt. Im Vorjahr wurden diesbezüglich erste Resultate präsentiert (Eggert 2014, Vergleichsmessung gegen ein Ultraschallanemometer auf 10 m Höhe). An dieser Stelle sollen nun die Ergebnisse der Messreihe PTB-LIDAR gegen ein konventionelles LIDAR-System (WindCube) vorgestellt werden.

Hierfür wurden Vergleichsmessungen an den in Abb. 4 gekennzeichneten Orten durchgeführt. Die Hauptwindrichtung während der Messung war in Abb. 4 von links unten nach rechts oben. Der mit ,1' gekennzeichnete Messort wurde für die Messung im flachen Gelände genutzt und an dem mit ,2' markierten Ort wurden die Messung für das komplexe Gelände vorgenommen.



Abb. 4: Umgebungsansicht der Messorte

An beiden Orten wurden die zwei LIDARs mit einem Abstand von ca. 10 m zueinander aufgestellt und haben dort in 100 m Messhöhe gemessen.

Abb. 5 und 6 zeigen die Ergebnisse einer jeweils einstündigen Messung an den beiden ausgewählten Messorten. Im flachen Gelände ist eine gute Übereinstimmung der 60 min Mittelung zu erkennen (Abweichung weniger als 1 %). Die 60 min Mittelwerte der Messung im komplexen Gelände weichen dagegen stark voneinander ab (Abweichung ca. 15 %).

Desweiteren ist zu erkennen, dass die Messergebnisse des WindCube und des PTB-LIDARs im flachen Gelände sehr gut übereinstimmen, wenn im Messbereich über mehrere Minuten stabile Windbedingungen herrschen (zu sehen in Abb. 5, im Zeitraum zwischen 45-60 min). Bei böigen Bedingungen hingegen, wie in Abb. 5, im Zeitraum zwischen 15-30 min, nimmt die Abweichung auch im flachen Gelände zu (bis zu 50 % Abweichung der 10 s Mittelwerte). Zu erklären ist dies mit der Messstrategie der monostatischen LIDARs: Während das PTB-LIDAR den gesamten Geschwindigkeitsvektor zur gleichen Zeit am selben Ort an einem Streupartikel ermittelt, müssen die monostatischen LIDARs die einzelnen Geschwindigkeitskomponenten an verschiedenen Orten und meist zu unterschiedlichen Zeiten bestimmen. Zum korrekten Betrieb eines monostatischen LIDARs wird daher ein konstantes homogenes Strömungsfeld für die gesamte Dauer der Erfassung aller Komponente vorausgesetzt. Da diese Bedingungen im komplexen Gelände nicht erfüllt wurden, ist in der Differenz der Ergebnisse beider Systeme eine relative Standardabweichung von 32 % zu beobachten.

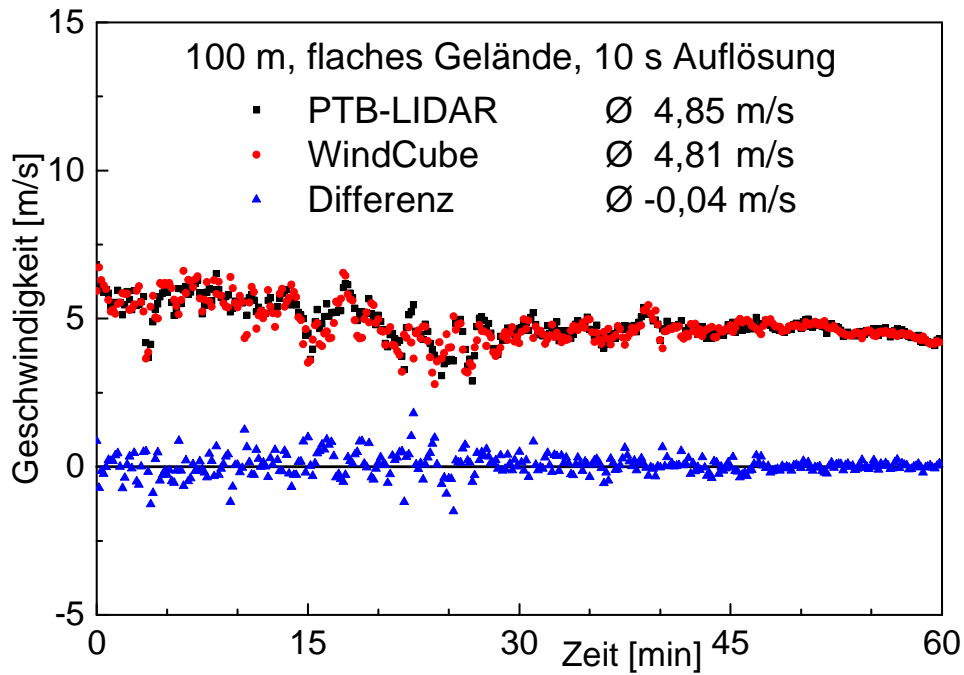


Abb. 5: Messergebnisse in flachem Gelände, mittlere Abweichung (60 min) <1 %

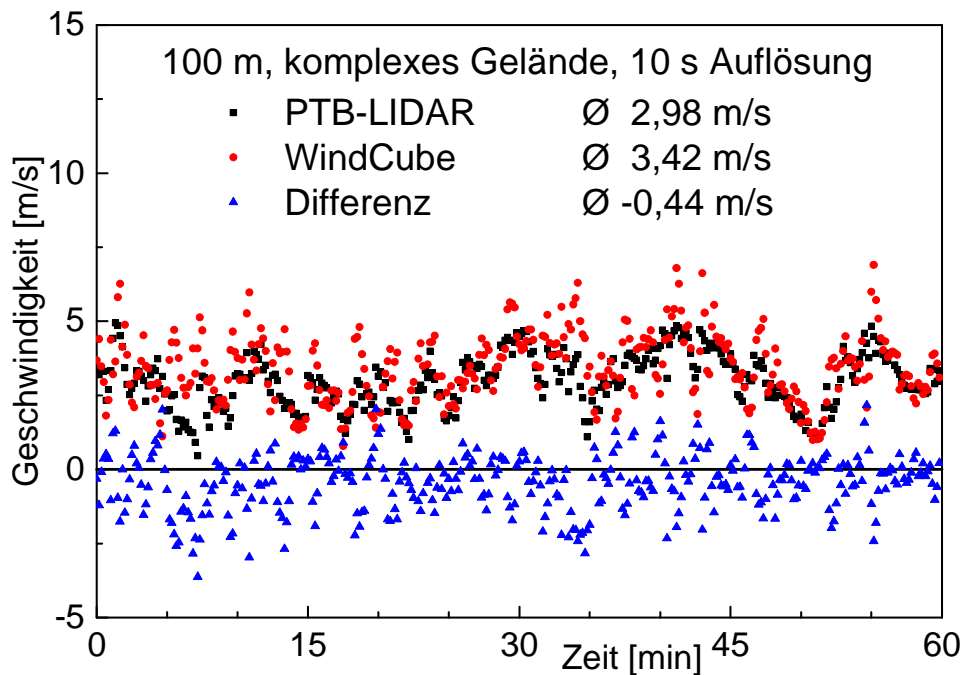


Abb. 6: Messergebnisse in komplexem Gelände, mittlere Abweichung (60 min) 15 %

## Zusammenfassung

Die Vergleichsmessungen zwischen einem WindCube als Vertreter der monostatischen LIDARs und dem bistatischen PTB-LIDAR haben gezeigt, dass bei Messungen in flachem Gelände und mit über längere Zeiträume (ca. 10 min) statischen, homogenen (nicht böigen) Windverhältnissen nur geringe Abweichungen zwischen den Messergebnissen auftreten. Messungen unter langanhaltenden böigen Windverhältnissen im flachen Gelände erfordern weitere Untersuchungen, um Abweichung größer als 2 % ausschließen zu können.

Der Einsatz monostatischer LIDAR-Systeme für Messungen in komplexem Gelände ist aufgrund der hier nicht erfüllbaren Voraussetzung eines zeitlich und räumlich homogenen Strömungsfeldes auch bei Anwendung einer geländeabhängigen Kalibrierung äußerst kritisch zu bewerten.

Mit der Weiterentwicklung des Wind-LIDAR-Systems der PTB konnten die Mobilität und die Wetterbeständigkeit soweit erhöht werden, dass es für den Außeneinsatz bereit ist und Vergleichsmessungen mit anderen Messsystemen an deren Einsatzort ermöglicht.

## Literatur

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, vektoriel- len Windgeschwindigkeitsmessung“, Proceedings der 21. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 43/1-43/7

Eggert M., Gutsmuths C., Müller H., Többen H., 2014: „Zeitaufgelöste, vektorielle Vergleichsmessung zwischen dem Doppler-LIDAR-Transfernormal der PTB und einem Referenz-Ultraschallanemometer“, Proceedings der 22. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 11/1-11/8

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