

Zeitaufgelöste, vektorielle Vergleichsmessungen zwischen dem Doppler-Lidar-Transferstandard der PTB und einem 135 m hohen Windmessmasten

Time resolved wind vector comparison measurements between the PTB Lidar transfer standard and a 135 m wind met mast

M. Eggert, C. Gutmuths, 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. Aufgrund des beträchtlichen wirtschaftlichen Aufwands von Windmessmasten werden hierfür zunehmend Doppler-LIDAR-Systeme eingesetzt.

Die in der Windenergiebranche genutzten Wind-Lidar-Systeme enthalten üblicherweise eine gemeinsame Sende-/Empfangsoptik (monostatisch), so dass die Sende- und Empfangsachse identisch ist (monoaxial). Da hiermit nur die Erfassung der Geschwindigkeitskomponente in Strahlrichtung möglich ist, muss die Optik in verschiedene Richtungen geschwenkt werden, um einen Geschwindigkeitsvektor bestimmen zu können. Dass die unterschiedlichen Komponenten zwangsläufig zu unterschiedlichen Zeitpunkten und an unterschiedlichen Orten aufgenommen werden, kann in der inhomogenen Strömung in komplexem Gelände zu Messabweichungen in der Größenordnung von 10 % führen. Aus diesem Grund ist eine Rückführung von Wind-LIDAR-Systemen mit den geforderten Messunsicherheiten bisher generell noch nicht möglich.

Der Einsatz eines bistatischen Doppler-Lidar-Systems mit räumlich getrennten Sende- und Empfangseinrichtungen erlaubt hingegen die vektorielle Erfassung der Geschwindigkeit von einzelnen Partikeln und damit eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung. Vergleichsmessungen zwischen einem solchen bistatischen, in der PTB entwickelten und aufgebauten Lidar-System und kalibrierten Schalensternanemometern an einem 135 m hohen Messmasten zeigen eine hohe Übereinstimmung der zeitaufgelöst gemessenen Geschwindigkeiten sowohl in ungestörter Strömung als auch in der Nachlaufströmung einer Windkraftanlage.

Einleitung

Kohärente Doppler-Lidar-Systeme werden bereits vielfältig für Messungen von Windgeschwindigkeiten eingesetzt. Ähnlich einem Referenzstrahl-LDA beruhen sie 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. Kommerziell erhältliche Wind-Lidar-Systeme mit monoaxialem Aufbau messen jedoch prinzipbedingt ausschließlich die Geschwindigkeitskomponente in Strahlrichtung, so dass sie ihren Strahl zur Erfassung eines Geschwindigkeitsvektors in verschiedene Richtungen schwenken (siehe Abbildung 1 links) und somit zwangsweise an verschiedenen Orten und zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessene Komponenten zu einem Vektor verrechnen müssen. In inhomogenen Strömungen, wie sie in komplexem Gelände vorliegen, können dabei Messabweichungen in der Größenordnung von 10 % entstehen (Bingöl 2009, Foussekis 2011). Im Rahmen einer Lidar-Neuentwicklung auf Basis eines bistatischen Systems (Abbildung 1 rechts) werden diese Nachteile ausgeschlossen.

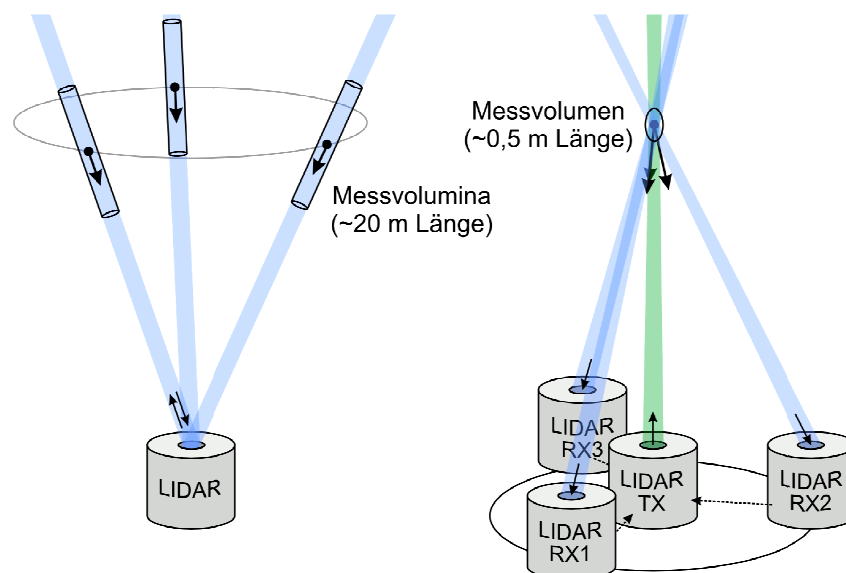


Abb. 1: Vektorielle Strömungsgeschwindigkeitsmessung mit konventionellen, monostatischen Wind-LIDAR-Systemen (links) und einem bistatischen System (rechts)

Das bistatische Doppler-LIDAR-System der PTB

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 Sender und Empfänger in ein- und denselben Ort fokussiert werden, so dass nur Streulicht von Partikeln aus diesem stark begrenzten Volumen empfangen wird. Da die Empfänger das Messvolumen aus unterschiedlichen Richtungen betrachten, können die drei Geschwindigkeitskomponenten von 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 Empfänger rückführbar.

Innerhalb der letzten Jahre wurde ein solches bistatisches System in der PTB entwickelt und aufgebaut (Eggert 2014). Anschließend wurde das System in ein wetterfestes und klimatisiertes Gehäuse mit konstanter Umgebungstemperatur eingebaut, welche Voraussetzung für eine reproduzierbare und stabile Ausrichtung der Optiken ist. Zur Erhöhung der Mobilität wurde das gesamte System auf einem Anhänger montiert (Gutsmuths 2015).



Abb. 2: Transportables LIDAR-System

Durchführung der Vergleichsmessungen

Nach erfolgreichen Tests auf dem Gelände der PTB (Eggert 2014, Gutsmuths 2015) wurden zwei Messkampagnen unter realen Einsatzbedingungen auf dem Auricher Testfeld der Deutsche WindGuard Consulting GmbH unternommen und Vergleichsmessungen mit einem 135 m hohen Windmessmasten durchgeführt.

Bei der ersten Messkampagne wurde das Messvolumen nahe einem auf 100 m Höhe an einem Ausleger montierten Schalensternanemometer positioniert. Während der Messdauer befanden sich Mast und Lidar aufgrund der vorherrschenden Windrichtung überwiegend in der Nachlaufströmung einer benachbarten Windkraftanlage. Bei der zweiten Messkampagne wurde das Lidar-System möglichst nahe dem Zentrum des Mastes aufgestellt, um eine gute Vergleichbarkeit mit dem an der Mastspitze auf 135 m Höhe montierten Schalensternanemometer zu gewährleisten. Bei der während dieser Messung vorherrschenden Windrichtung war die Strömung weitestgehend ungestört. Ferner lagen für den Zeitraum der zweiten Messung auch Daten von einem in der Nähe positionierten konventionellen (monostatischen) Lidar-System vor.



Abb. 3: PTB-Lidar am Windmessmasten

Ergebnisse

Die Messergebnisse wurden entsprechend der Norm IEC 61400-12-1 ausgewertet, wobei die am Messmast montierten, kalibrierten Schalensternanemometer als Referenz behandelt wurden: Zuerst wurden die von Lidar und Messmast ermittelten horizontalen Geschwindigkeiten synchronisiert und über jeweils 10 Minuten gemittelt. Anschließend wurden die gemittelten Geschwindigkeiten anhand der Referenz in Segmente von 0,5 m/s gruppiert und innerhalb dieser Segmente miteinander verglichen.

Die Ergebnisse für 10-Minuten-Mittelwerte aus insgesamt über 24 h Messdauer in einer weitestgehend ungestörten Strömung sind in Abbildung 4a dargestellt: In den Geschwindigkeitsbereichen, in denen 10 oder mehr Mittelwerte aufgenommen werden konnten, beträgt die Abweichung zwischen dem bistatischen Lidar-System der PTB und dem Schalensternanemometer an der Messmastspitze deutlich unter 0,5 %. Auch das kommerziell erhältliche, monostatische Lidar liefert hier Abweichungen unter 1 % gegenüber dem Messmast.

Deutlich anders jedoch stellt sich dieser Vergleich dar, wenn anstatt von 10-Minuten-Mittelwerten die sekundlich gespeicherten Rohdaten ausgewertet werden. Während das bistatistische Lidar-System der PTB nach wie vor über weite Geschwindigkeitsbereiche auf deutlich weniger als 0,5 % mit dem Schalensternanemometer übereinstimmt, verursachen bereits gewöhnliche Böen des ungestörten Windes signifikante Abweichungen der vom monostatischen Lidar gemessenen Geschwindigkeiten, wie in Abbildung 4b dargestellt ist.

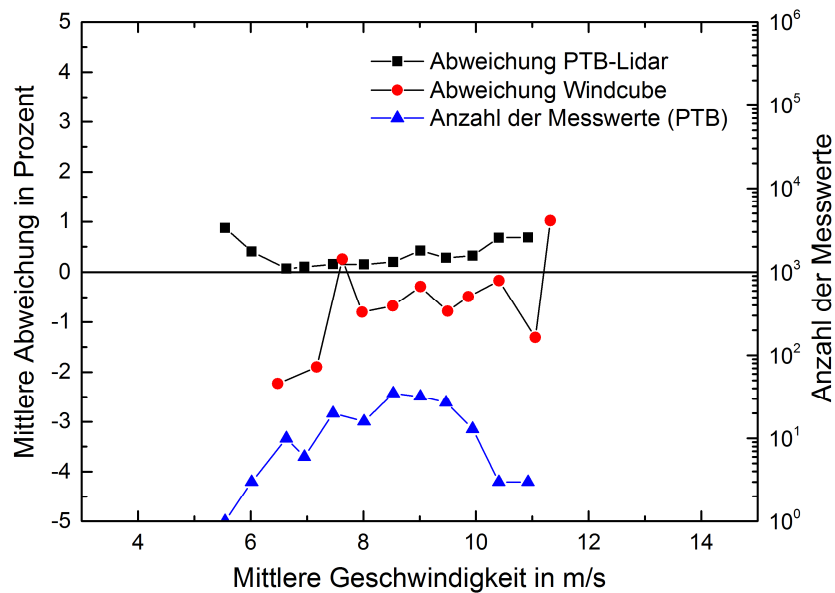


Abb. 4a: Messabweichungen bistatisches (PTB) / monostatisches Lidar zu Messmast; hier 10-Minuten-Mittelwerte in ungestörter Strömung

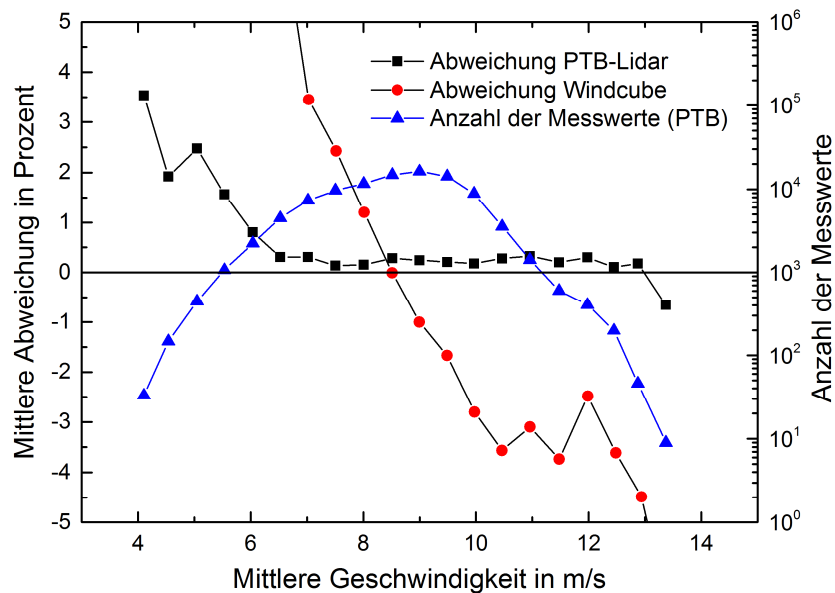


Abb. 4b: Messabweichungen bistatisches (PTB) / monostatisches Lidar zu Messmast; hier 1-Sekunden-Rohdaten in ungestörter Strömung

Im Rahmen der ersten Messkampagne wurde die Strömung im Nachlauf einer Windkraftanlage mit dem bistatischen Lidar-System der PTB und einem Schalensternanemometer an einem Mastausleger auf 100 m Höhe über einen Zeitraum von 15 h gemessen. Vergleichsdaten von einem monostatischen Lidar lagen für diesen Zeitraum nicht vor.

Auch in der gestörten Strömung betragen die Abweichungen der zwischen den sekundlich gespeicherten Rohdaten des bistatischen Lidars und des Schalensternanemometers über weite Bereiche weniger als 1 %, siehe Abbildung 5. Hierbei ist zu bedenken, dass Schalensternanemometer aufgrund ihrer mechanischen Trägheit den Geschwindigkeitsänderungen nur bedingt folgen können. Wie sehr die Strömung durch die Windkraftanlage gestört wurde, spiegelt sich auch in der Vertikalkomponente der vom bistatischen Lidar gemessenen Geschwindigkeit wieder, welche eine Standardabweichung von über 7 m/s in der gestörten gegenüber 0,33 m/s in der ungestörten Strömung aufwies.

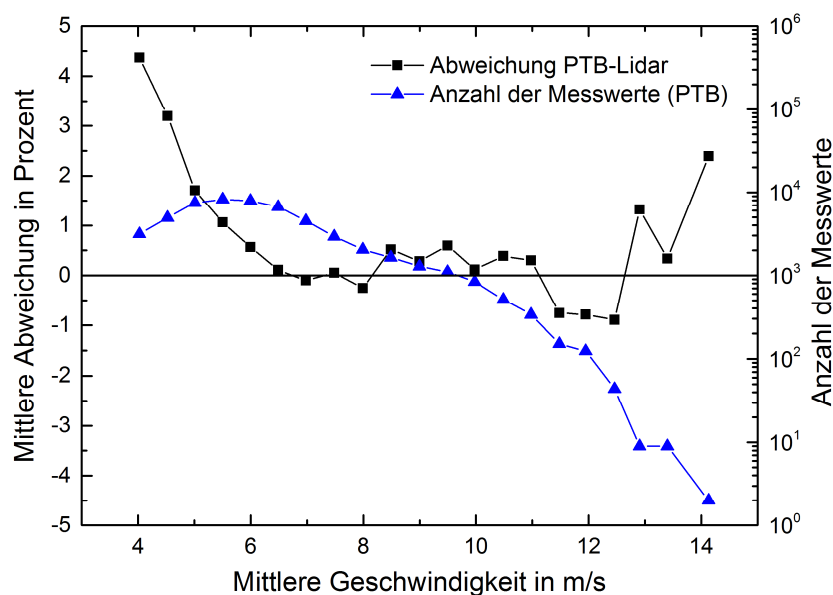


Abb. 5: Messabweichungen bistatisches Lidar zu Messmast; hier 1-Sekunden-Rohdaten in gestörter Strömung

Zusammenfassung

Mit der Weiterentwicklung des bistatischen Wind-Lidar-Systems der PTB konnten die Mobilität und die Wetterbeständigkeit soweit erhöht werden, dass im Außeneinsatz Vergleichsmessungen mit anderen Messsystemen an deren Einsatzort durchgeführt werden konnten.

Hierbei zeigte sich im Vergleich mit den an einen Messmasten montierten, kalibrierten Schalensternanemometern eine hohe Übereinstimmung sowohl der 10-Minuten-Mittelwerte als auch der 1-Sekunden-Rohdaten im Bereich unter 0,5 % für ungestörte Strömungen, während ein monostatisches System hier nur in den Mittelwerten vergleichbare Werte aufwies. Aber auch in der gestörten Strömung im Nachlauf einer Windkraftanlage war mit dem bistatischen Lidar der PTB eine gute Übereinstimmung im Bereich von 1 % mit dem Messmasten zu verzeichnen.

Die Ergebnisse zeigen damit die universelle Einsetzbarkeit des bistatischen Lidar-Systems sowohl in ungestörten Strömungen als auch zur zeitlich und räumlich hochaufgelösten Analyse gestörter Strömungsverhältnisse. Der nächste Meilenstein der Entwicklungsarbeiten am Lidar-System der PTB ist die Sicherstellung eines autonomen Messbetriebes.

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

Eggert M., Müller H., Többen H., 2012: „Doppler-LIDAR-Transfernors 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-Transfernors zur orts aufgelösten, vektoriellen 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-Transfernors der PTB und einem Referenz-Ultraschallanemometer“, Proceedings der 22. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 11/1-11/8

Gutsmuths C., Eggert M., Müller H., Többen H., 2015: „Zeitaufgelöste, vektorielle Vergleichsmessungen zwischen dem Doppler-LIDAR-Transfernors der PTB und konventionellen LIDAR-Systemen“, Proceedings der 23. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 65/1-65/7

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