Vergleich des hochauflösenden bistatischen PTB-Wind-Lidars mit dem 200 m hohen Windmessmast des Fraunhofer IEE am Rödeser Berg

Comparison of the high-resolution bistatic PTB wind lidar with the 200 m high wind met mast of Fraunhofer IEE at Rödeser Berg

S. Oertel, M. Eggert, P. Wilhelm und J. Hornig

Physikalisch-Technische Bundesanstalt Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland

Schlagworte: Doppler-Lidar, Wind-Lidar, bistatisch, Rückführbarkeit, Windenergie Key words: Doppler lidar, wind lidar, bistatic, traceability, wind energy

Kurzfassung

Mit dem in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) entwickelten hochauflösenden bistatischen Wind-Lidar-System können alle drei Komponenten des Windgeschwindigkeitsvektors simultan in Messhöhen von 5 m bis 250 m gemessen werden. Das bistatische Messprinzip bietet – über seine hohe räumliche und zeitliche Auflösung – gegenüber dem konventionellen monostatischen Messprinzip den Vorteil, dass verlässliche Windgeschwindigkeitsmessungen sowohl über flachem Gelände (homogene Strömungsfelder) als auch bei komplexen Topografien (inhomogene Strömungsfelder) möglich sind. Aus metrologischer Sicht bietet das bistatische Prinzip zudem den Vorteil der einfacheren Rückführbarkeit des Messsystems.

Im Bereich der Windenergie werden unter anderem aufgrund der zunehmenden Nabenhöhe von Windenergieanlagen (WEA) in den letzten Jahren vermehrt konventionelle Wind-Lidar-Systeme in Kombination mit Windmessmasten als unterstützende Messysteme, zum Beispiel bei der Standortanalyse, eingesetzt. Mit dem bistatischen PTB-Lidar soll, durch seinen zukünftigen Einsatz als Transfernormal für andere Windfernmesssysteme (z. B. konventionelle monostatische Wind-Lidar-Systeme), eine Reduzierung der Messunsicherheit im Bereich der Windfernmesstechnik erreicht, und so im oben genannten Beispiel eine verlässlichere Standortanalyse ermöglicht werden.

In diesem Beitrag werden Langzeitvergleichsmessungen des PTB-Wind-Lidars mit dem 200 m hohen Forschungsmessmast des Fraunhofer-Instituts für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) am Rödeser Berg vorgestellt, bei denen in Abhängigkeit von der Windrichtung sowohl homogene als auch inhomogene Strömungsbedingungen vorlagen. Der Vergleich mit dem Schalensternanemometer an der Messmastspitze zeigt dabei im gemessenen Windgeschwindigkeitsbereich von 4 m/s bis 16 m/s eine betragsmäßige Abweichung von unter 0,5 %.

Einleitung

Die genaue Messung der Windgeschwindigkeit in unterschiedlichen Höhen spielt in vielen Bereichen der Windenergie und Meteorologie eine große Rolle. Im Bereich der Windenergie erfordert beispielsweise die Standortwahl von Windenergieanlagen detaillierte Windpotentialanalysen, bei denen die genaue Bestimmung der Windgeschwindigkeit am potentiellen Standort einen entscheidenden Einfluss auf die Verlässlichkeit der Ertragsprognosen der projektierten Windenergieanlagen hat. Windmessmasten, mit den daran befindlichen Schalensternanemometern, sind momentan noch die genauesten Messvorrichtungen für die rückgeführte Messung der Windgeschwindigkeit, wie sie in Normen und Richtlinien (z. B. in der IEC 61400-12-1) zur Windpotentialanalyse oder Leistungskurvenvermessung vorgeschrieben ist. Der Aufbau und Betrieb von Windmessmasten, insbesondere von hohen Windmessmasten, die für die zunehmende Nabenhöhe von Windenergieanlagen erforderlich sind, ist allerdings mit hohen Kosten verbunden. Aufgrund ihrer höheren Wirtschaftlichkeit werden für die Messung des Windvektors in zunehmendem Maß mobile, bodenbasierte Windfernmesssysteme, wie Wind-Lidar-Systeme, eingesetzt. Diese konventionellen Wind-Lidar-Systeme arbeiten nach dem monostatischen Messprinzip, bei dem eine gemeinsame Sende- und Empfangseinheit genutzt wird, um den Windgeschwindigkeitsvektor zu bestimmen. Hierfür wird der gemeinsame Sende- und Empfangsstrahl wie in Abbildung 1 (a) dargestellt in drei verschiedene Richtungen geschwenkt. Aus diesem Schwenken des Sendeund Empfangsstrahls resultiert ein großes Messvolumen (Durchmesser d ca. 100 m), aus dem zur Bestimmung der horizontalen Geschwindigkeitskomponenten räumlich und zeitlich getrennt voneinander aufgenommene Messwerte subtrahiert werden. Unter der Voraussetzung eines weitestgehend homogenen Strömungsfeldes innerhalb des Messvolumens liefern diese Systeme verlässliche Messergebnisse. Liegen allerdings inhomogene Windströmungsfelder vor, wie es z. B. über komplexem Gelände der Fall ist, kann der Messfehler der konventionellen Wind-Lidar-Systeme im Bereich von 10 % liegen (Bingöl und Mann. 2009). Daher ist die Verlässlichkeit von Messungen mit konventionellen monostatischen Wind-Lidar-Systemen bei unbekannten oder komplexen Strömungsfeldern ohne Einbeziehung weiterer Referenzmesssysteme, wie z. B. Windmessmasten, fraglich. So erlaubt beispielsweise die IEC 61400-12-1 (Anhang L) bei der rückgeführten Messung der Windgeschwindigkeit zur Leistungskurvenvermessung von Windenergieanlagen nur den Einsatz von Wind-Lidar-Systemen über flachem Gelände (homogene Strömungsbedingungen), und dann auch nur als unterstützende Messsysteme in Kombination mit Windmessmasten (siehe IEC 61400-12-1 2017).



Abbildung 1: (a) Monostatisches Messprinzip. (b) Bistatisches Messprinzip.

Das in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt entwickelte bistatische Wind-Lidar-System (Eggert et al. 2011, Eggert et al. 2013) hebt die bei dem monostatischen Messprinzip vorliegende Beschränkung auf homogene Strömungsfelder auf. Die Grundidee bei dem bistatischen Messprinzip besteht darin, einen Sendelaserstrahl und drei davon räumlich getrennte Empfangsstrahlen zu nutzen (siehe Abbildung 1 (b)). Dadurch können alle drei Komponenten des Windvektors simultan innerhalb eines kleinen Messvolumens über das Erfassen einzelner in der Windströmung mitgeführter Aerosole gemessen werden. Die hohe zeitliche und örtliche Auflösung des PTB-Lidars führt zu einer reduzierten Messunsicherheit im Vergleich zu konventionellen monostatischen Systemen und bietet gegenüber diesen zusätzlich den Vorteil einer einfacheren messtechnischen Rückführbarkeit.

Ziel ist, das PTB-Lidar als rückgeführtes Transfernormal für andere Windfernmesssysteme einzusetzen, um diese am Einsatzort zu kalibrieren oder eine Abschätzung der Messunsicherheit der konventionellen Systeme unter dem Einfluss des jeweiligen Standortes (Topografie) vorzunehmen. In den letzten Jahren wurden während der Entwicklung des bistatischen PTB-Lidars detaillierte Vergleichsmessungen mit anderen Anemometern unterschiedlicher Art (Ultraschall-, Schalenstern-, Laser-Doppler-Anemometer und konventionelle Lidar-Systeme) durchgeführt, um das neue Messprinzip zu validieren (siehe z. B. Eggert et al. 2014, Gutsmuths et al. 2015, Eggert et al. 2016). In diesem Beitrag wird die neueste Vergleichsmessung mit einem 200 m hohen Windmessmast vorgestellt. Sie wurde Ende 2020 durchgeführt und diente der Validierung des PTB-Lidars in einer bis dahin noch nicht messtechnisch rückgeführten Messhöhe von 200 m unter teilweise inhomogenen Anströmungsbedingungen.

Messkampagne

Über einen Zeitraum von zehn Wochen wurden Ende 2020 mit dem Lidar-System Vergleichsmessungen im Windpark Rödeser Berg mit dem 200 m hohen Windmessmast des Fraunhofer-Instituts für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IEE) durchgeführt. Dabei fand der Vergleich der gemessenen Windgeschwindigkeit (Betrag) bzw.

Windrichtung auf unterschiedlichen Messhöhen von 135 m bis 200 m mit, je nach Messhöhe, verschiedenen Anemometertypen bzw. Windfahnen statt. Abbildung 2 zeigt schematisch den obersten Teil des Messmastes und die dort angebrachten Messgeräte. Auf den Messhöhen unter 200 m wird der Windgeschwindigkeitsvektor von der richtunasabhängigen Versperrung durch die Ausleger und die Abspannung des Messmastes beeinflusst. Ein verlässlicher und genauer Vergleich der beiden Messsysteme (Lidar und Messmast) auf den Messhöhen unter 200 m ist daher erst nach einer aufwendigen Korrektur des richtungsabhängigen Anströmungs-Einflusses für den Windmessmast möglich (siehe z. B. Frey 2018).



Abbildung 2: Bestückung des Windmessmastes (> 135 m)



Abbildung 3: (a) Lage des Windmessmastes (orangefarbener Pfeil, der quadratische Einsatz (b) zeigt eine Vergrößerung) am Rödeser Berg mit den umliegenden Windenergieanlagen (orange eingekreist). Die hell markierten Winkelbereiche um den Mast ($100^{\circ}-165^{\circ}$ und $285^{\circ}-330^{\circ}$) sind die Bereiche mit "ungünstigem" Anströmwinkel. Der Winkel α beschreibt die Richtung, aus der der Wind kommt, bezogen auf die Nord-Richtung (weiß dargestellt). (c) Häufige Wetterlage am Rödeser Berg: Nebel.



Abbildung 4: (a) 200 m Windmessmast des Fraunhofer IEE am Rödeser Berg. (b) Lidar-System (Anhänger) am Fuß des Windmessmastes.

In diesem Beitrag beschränken wir uns auf die Vergleichsmessungen, die mit dem obersten Anemometer (*THIES Clima First Class Advanced*) an der Mastspitze (200 m) durchgeführt wurden, weil dort der Einfluss des Mastes auf die Anströmung am geringsten und weitestgehend unabhängig von der Anströmungsrichtung ist. Als Referenz der Windrichtung wurden die Daten der nächstliegenden Windfahne (*THIES Clima First Class*) auf 187 m Höhe verwendet. Aufgrund seiner Lage auf dem Rödeser Berg ist die Strömung am Ort des Messmastes im Allgemeinen inhomogen. Zusätzlich werden die Strömungsbedingungen am Messmast je nach Windrichtung durch zwei benachbarte Windenergieanlagen stark beeinflusst (siehe Abbildung 3). Bezüglich der Lidar-Messungen kam hinzu, dass die Messhöhe 200 m häufig im Nebel lag, was die Auswertung der gemessenen Doppler-Signale (Geschwindigkeit) erschwerte. Abbildung 4 zeigt den Messmast am Rödeser Berg und das Lidar-System (Anhänger) am Fuß des Messmastes, wobei der horizontale Abstand zwischen Lidar-Sendelaser und Mastzentrum ca. 4,5 m in südwestliche Richtung betrug (entspricht dem Abstand zwischen Lidar-Messvolumen und dem Anemometer an der Mastspitze).

Ergebnisse

Die Auswertung der Messdaten erfolgte gemäß der in der Windenergiebranche üblichen Richtlinie IEC 61400-12-1. Dabei wird der gesamte gemessene Windgeschwindigkeitsbereich (hier 4 m/s bis 20 m/s) in Geschwindigkeitsklassen mit Intervallen der Breite 0.5 m/s unterteilt. Zunächst werden aus den gemessenen Geschwindigkeitsdaten für beide Messsysteme, d. h. für das Referenzsystem (hier der Windmessmast) und das Device Under Test (hier das Lidar-System), 10-Minuten-Mittelwerte berechnet und diese Mittelwerte in die entsprechende, durch das Referenzsystem bestimmte Geschwindigkeitsklasse eingeordnet. Nach Einordnung aller 10-Minuten-Mittelwerte in die Geschwindigkeitsklassen wird nochmals eine Mittelwertbildung innerhalb der verschiedenen Geschwindigkeitsklassen vorgenommen (jeweils für beide Messsysteme). Die so bestimmten Geschwindigkeitsmittelwerte werden mit \overline{v}_{Mast} für den Windmessmast und \overline{v}_{Lidar} für das Lidar-System bezeichnet. In den Abbildungen 5 (a) und (b) ist die mittlere Abweichung $\frac{\overline{v}_{\text{Lidar}} - \overline{v}_{\text{Mast}}}{\overline{v}_{\text{Mast}}}$ in Prozent zwischen Lidar-System und Messmast in Abhängigkeit von der Mastgeschwindigkeit \overline{v}_{Mast} dargestellt. Abbildung 5 (a) zeigt die mittlere Abweichung aller gemessenen Windgeschwindigkeitsdaten (ungefiltert). Deutlich zu erkennen sind hohe Abweichungen für Geschwindigkeiten unter 10 m/s (bis zu 1,5 %), bei denen auch die über einen t-Test bestimmten Vertrauensintervalle (Fehlerbalken) vergrößert sind im Vergleich zu denen bei Geschwindigkeiten oberhalb von 10 m/s. Die sehr großen Fehlerbalken bei Geschwindigkeiten über 17 m/s resultieren aus der geringen Anzahl an 10-Minuten-Mittelwerten innerhalb dieser Geschwindigkeitsklassen (siehe Abbildung 6). Die Ursache für die hohen Abweichungen unterhalb von 10 m/s wird in Abbildung 5 (c) ersichtlich. Dargestellt ist hier die mittlere Abweichung der Geschwindigkeit zwischen Lidar-System und Messmast in Abhängigkeit von der vom Windmessmast gemessenen Windrichtung $\overline{\alpha}_{Mast}$. Zusätzlich sind als gestrichelte Linien die Windrichtungen, bei denen der Mast in der Nachlaufströmung der beiden Windenergieanlagen (schwarz, bei 146° und 307°) liegt, und die Lage der beiden Ausleger des Windmessmastes (blau, bei 145° und 325°) markiert. Dabei ist α der Winkel der Windrichtung im Uhrzeigersinn bezogen auf die Nordrichtung ($\alpha = 0^{\circ}$ – Wind aus Richtung Nord, $\alpha = 90^{\circ}$ – Wind aus Richtung Ost). In den Winkelbereichen um 146° und 307°, d. h., wenn sich der Windmessmast und auch das Lidar-System im Nachlauf der Windenergieanlagen befinden, ist jeweils ein starker Anstieg der mittleren Abweichung zu erkennen. Die starken Abweichungen bis zu 15 % zwischen 180° und 250° konnten bei der Datenauswertung auf ungünstige Witterungsbedingungen (Nebel) zurückgeführt werden, welche vermutlich zu einer Strahlaufweitung durch Vorwärtsstreuung geführt haben.



Abbildung 5: Die Grafiken zeigen die Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen Lidar-System und Windmessmast bei einer Messhöhe von 200 m. Dargestellt sind jeweils die mittleren Abweichungen zwischen Lidar-System und Windmessmast in Prozent für 10-Minuten-Geschwindigkeitsmittelwerte [(a) und (b) in Abhängigkeit von der vom Windmessmast gemessenen Geschwindigkeit und (c) und (d) in Abhängigkeit von der Windrichtung]. In den Grafiken (a) und (c) sind alle zur Verfügung stehenden Messdaten dargestellt, in den Grafiken (b) und (d) wurden die Messdaten, bei denen der Wind aus Richtung der Windenergieanlagen kam und bei denen der Windmessmast im Nebel lag, herausgefiltert. Die Grafik (b) stellt das Endergebnis der Messung auf einer Höhe von 200 m dar, bei denen der Betrag der mittleren Abweichungen für den Geschwindigkeitsbereich von 4 m/s bis 16 m/s unterhalb von 0,5 % liegen.



Abbildung 6: Anzahl *n* der 10-Minuten-(Geschwindigkeits-)Mittelwerte pro Geschwindigkeitsklasse für den ungefilterten (rot) und den gefilterten (schwarz) Datensatz.

In Abbildung 5 (d) ist ein reduzierter Datensatz (gefiltert) dargestellt, bei dem die Messwerte mit ungünstigen Anströmbedingungen (100° bis 165° und 285° bis 330°) "herausgeschnitten" wurden. Weiterhin wurden bei Nebel aufgenommene Messwerte aus dem Datensatz entfernt, jedoch konnten diese aus den gespeicherten, vorverarbeiteten Daten nur noch anhand ihrer besonders hohen Signalamplitude identifiziert werden, so dass dadurch auch viele scheinbar unverfälschte Messdaten mit hoher Partikeldichte ungewollt eliminiert wurden. Abbildung 6 zeigt das Ausmaß der Datenreduktion anhand der Anzahl n der 10-Minuten-Mittelwerte pro Geschwindigkeitsklasse für die ungefilterten (rot) und die gefilterten (schwarz) Messdaten. Schließlich wurden für die gefilterten Messdaten nochmals die mittlere Abweichung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit berechnet (Abbildung 5 (d)). Über den gesamten Geschwindigkeitsbereich, und damit auch unterhalb von 10 m/s, liegen die mittleren Abweichungen zwischen Lidar-System und Windmessmast im Bereich von ± 0,5 %, was ein sehr gutes Ergebnis der Vergleichsmessung darstellt.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Vergleichsmessungen zwischen dem Wind-Lidar-System der PTB und einem 200 m hohen Windmessmast des Fraunhofer IEE vorgestellt, die es erstmals ermöglichten, das Wind-Lidar-System in einer Messhöhe von 200 m zu validieren. Nach der Beseitigung von ungünstigen Anströmungsrichtungen auf den Windmessmast und das Lidar-System (Nachlaufströmung von umliegenden Windenergieanlagen sowie Versperrung durch den Mast selbst) und ungünstigen Witterungsbedingungen (Nebel) aus den Messdaten zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Lidar-System und dem kalibrierten Schalensternanemometer auf 200 m Masthöhe, wobei der Betrag der Messabweichungen für den gesamten Windgeschwindigkeitsbereich von 4 m/s bis 16 m/s unterhalb von 0,5 % lagen. Zukünftig soll das PTB-Lidar-System als Transfernormal für andere Windfernmesssysteme eingesetzt werden. Dazu wird in einem nächsten Schritt eine weitere Leistungsoptimierung des PTB-Wind-Lidars durchgeführt, indem die Optiken der Sende- und Empfangseinheiten und deren Ansteuerung für eine schnelle und automatisierte Messvolumenpositionierung (Messhöhe) überarbeitet werden. Zusätzlich wird die bisherige PC-basierte Signalverarbeitung durch eine FPGA-basierte ersetzt, um eine leistungsfähige Echtzeit-Messsignalauswertung bereitzustellen. Dabei soll eine Anpassung der Vorverarbeitung zukünftig auch eine zuverlässige Erkennung von Nebel als Wetterbedingung ermöglichen.

Danksagung

Teile dieser Arbeit wurden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des Förderprojektes "Aufbau eines Kompetenzzentrums "Wind' zur Verbesserung der Metrologie für die Effizienzsteigerung von Windenergieanlagen" (Förderkennzeichen 0325945) sowie im Rahmen des Projekts "Softwareentwicklungsarbeiten für die DSP-basierte Datenauswertung eines auf das SI-Einheitensystem zurückgeführten Wind-LIDAR-Systems" (0325416B). Die Autoren danken den Mitarbeitern des Fraunhofer-Instituts für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) für die freundliche Unterstützung bei der Durchführung der Messkampagne am Windmessmast Rödeser Berg.

Literatur

Bingöl, F., Mann, J., 2009: "Lidar performance in complex terrain modelled by WAsP engineering", EWEC 2009 Proceedings online, EWEA

IEC 61400-12-1, Edition 2.0, 2017: Wind energy generation systems - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines

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

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

Eggert, M., Gutsmuths, C., Müller, H., Többen, H., 2014: "Zeitaufgelöste, vektorielle Vergleichsmessungen zwischen dem Doppler-Lidar-Transfernormal der PTB und einem Referenz-Ultraschallanemometer", Proceedings 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-Transfernormal der PTB und konventionellen Lidar-Systemen", Proceedings 23. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 65/1-65/7

Eggert, M., Gutsmuths, C., Müller, H., Többen, H., 2016: "Zeitaufgelöste, vektorielle Vergleichsmessungen zwischen dem Doppler-Lidar-Transfernormal der PTB und einem 135 m hohen Windmessmasten", Proceedings 24. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 3/1-3/7

Frey, H., 2018: "Mast correction based on characteristic distortion waves." WIND DATA SUITE, Germany, Report No. 2018-11, 8 pp. https://www.winddatasuite.de/wds/publics/WDS-Report201811-DrHF-MC.pdf