

Vergleich des bistatischen Doppler-Lidars der PTB und eines Ultraschall-Anemometers zur Messung von Turbulenzspektren

Comparison of turbulence measurements by PTB's high-resolution bistatic Doppler lidar and a CSAT3B sonic anemometer.

M. Eggert¹, J. Tambke², C. Gutmuths¹, S. Oertel¹, P. Wilhelm¹, H. Müller¹, M. Mauder³

¹ Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland

² Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, ForWind – Zentrum für Windenergieforschung,
Küppersweg 70, 26129 Oldenburg, Deutschland

³ Karlsruhe Institute für Technologie, Institut für Meteorologie und Klimaforschung,
82467 Garmisch-Partenkirchen, Deutschland

Schlagworte: Wind-Lidar, bistatisch, Ultraschall-Anemometer, Turbulenz

Key words: wind-lidar, bistatic, ultrasonic anemometer, turbulence

Kurzfassung

Genauere Messungen der Turbulenzstatistik sind von großer Bedeutung für die Bestimmung der Eddy-Kovarianz, für die Validierung numerischer Modelle atmosphärischer Strömungsvorgänge, sowie für viele Untersuchungen aus dem Bereich der Windenergie. Für solche Zwecke werden derzeit vielfach Ultraschallanemometer an Messmasten eingesetzt – wohlwissend, dass Anemometer und Mast einerseits selbst die Strömung beeinflussen und andererseits keine Vergleichsmessungen mit nicht-invasiven Messmethoden im Feld vorliegen. Der Einsatz des von der PTB als Transfornormal entwickelten bistatischen Doppler-Lidar-Systems erlaubt die Bestimmung des Geschwindigkeitsvektors einzelner Streupartikel in Messhöhen von 5 m bis über 250 m und damit eine genaue und präzise Windgeschwindigkeitsmessung auch bei räumlich und zeitlich inhomogenen Strömungsverhältnissen bis hin zu einer Messrate von 10 Hz, womit es sich für einen Vergleich der Turbulenzstatistik mit Ultraschall-Anemometern anbietet.

In diesem Beitrag werden Vergleichsmessungen zwischen einem CSAT3B Ultraschallanemometer und dem hochauflösenden bistatischen Doppler-Lidar der PTB vorgestellt, welche über flachem Terrain in einer Messhöhe von 30 m mit einer Messrate von 10 Hz über eine Dauer von etwa zwei Wochen durchgeführt wurden. Sowohl die jeweils über Intervalle von 30 Minuten ermittelte durchschnittliche Windgeschwindigkeit als auch die Fluktuation der vertikalen Windgeschwindigkeit zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit weniger als 1 % systematischer Abweichung. Bei der Bestimmung der Schubspannungsgeschwindigkeit hingegen sind Abweichungen von etwa 3 % zu verzeichnen, wobei eine Analyse der Kospektren auf systematische Effekte des Ultraschallanemometers hindeutet.

Einleitung

In der meteorologischen Grundlagenforschung sind genaue, zeitlich hochaufgelöste Messungen des dreidimensionalen Windvektors von hoher Bedeutung für die Bestimmung der vertikalen Wärme-, Impuls- und Stoffflüsse nach der Eddy-Kovarianz-Methode (Aubinet et al., 2012). Viele hierfür eingesetzte Ultraschallanemometer messen allerdings, aufgrund von Abschattungseffekten, systematisch eine zu geringe Turbulenz (Frank et al., 2013, 2016; Wyngaard, 1988). Ein Vergleich zwischen sechs unterschiedlichen Ultraschallanemometern zeigte zwar eine gute Übereinstimmung untereinander (Mauder und Zeeman, 2018), der bei allen Ultraschallanemometern immanente Einfluss von Abschattungseffekten konnte jedoch mangels einer nicht-invasiven Referenzmessung bislang nicht im Feld bestimmt werden.

Aus diesen Gründen wurden direkt im Feld Vergleichsmessungen zwischen einem CSAT3B Ultraschallanemometer und dem bistatischen Wind-Lidar der PTB (Eggert et al. 2016; Oertel et al., 2019) durchgeführt. Fokussiert auf eine Messhöhe von 30 m über dem Boden weist das Lidar ein Messvolumen mit Abmessungen von etwa 2 mm Durchmesser und 50 mm Höhe auf, was sich somit in der gleichen Größenordnung wie das Messvolumen des Ultraschallanemometers befindet. Die durchgeführten Untersuchungen betrachten Abweichungen zwischen den Messungen der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit, welche von hoher Bedeutung besonders für die Windenergie ist, die Fluktuation der vertikalen Komponente, welche in die Bestimmung des Austauschs zwischen Boden und Atmosphäre nach der Eddy-Kovarianz-Methode eingeht, sowie der Schubspannungsgeschwindigkeit, welche in vielen meteorologischen Modellen verwendet wird (Tambke et al., 2005).

Aufbau und Durchführung der Messungen

Die Vergleichsmessungen wurden auf dem Gelände des Johann Heinrich von Thünen-Institut in Braunschweig (52.2943°N 10.4461°E) über eine Zeitdauer von zwei Wochen, in einer Messhöhe von 30 m, bei Windgeschwindigkeiten hauptsächlich im Bereich bis etwa 10 m/s vorwiegend aus Richtungen von Süd bis West durchgeführt.

Das eingesetzte CSAT3B Ultraschallanemometer besitzt eine für eine möglichst geringe Störung der Strömung optimierte Geometrie nach Zhang et al. (1986), in der alle drei Schallpfade einen Winkel von 30° zur Vertikalen aufweisen. Es war an einem 30 m hohen Messmast in Richtung Westen montiert (siehe Abbildung 1) und wurde mit der Werkskalibrierung genutzt, welche neben einer temperaturabhängigen Nullpunktkorrektur die Ergebnisse einer geometrischen Vermessung mithilfe eines Koordinatenmesssystems nutzt.

Das bistatische Wind-Lidar der PTB wurde etwa 9 m westlich des Messmastes positioniert. Im Gegensatz zu kommerziell erhältlichen, monostatischen Wind-Lidar-Systemen, welche zur Bestimmung des Geschwindigkeitsvektors einen gemeinsamen Sende- und Empfangsstrahl in unterschiedliche Richtungen schwenken und dadurch Messfehler in der Größenordnung von 10 % aufweisen können (Bingöl et al., 2009; Bradley, 2008) und für die Erfassung turbulenter Strömungen in der erstrebten Zeitauflösung ungeeignet sind, nutzt das bistatische Wind-Lidar der PTB einen feststehenden Sendestrahl und drei räumlich davon getrennte Empfänger, welche alle gemeinsam in ein Messvolumen fokussiert werden (Abbildung 2).



Abb. 1: Wind-Lidar der PTB (links) und 30 m Messmast mit Ultraschallanemometer (rechts), die Kamera blickt in Richtung Nord-West.

Durch dieses Verfahren können alle drei Geschwindigkeitskomponenten gleichzeitig und anhand der Streulichtsignale identischer Partikel im Messvolumen bestimmt werden, was eine hohe Genauigkeit und Zeitaufösung ermöglicht (Eggert et al. 2016). Das Lidar-System wurde vor dem Messeinsatz gegenüber einem rückgeführten Laser-Doppler-Anemometer an einem Windkanal auf einer 8 m hohen Plattform validiert (Oertel et al., 2019). Nach dem Messeinsatz im Feld wurden weitere Vergleichsmessungen im Windkanal durchgeführt und hierbei Abweichungen unterhalb von 0,4 % bei sieben Geschwindigkeiten zwischen 4 m/s und 16 m/s und unterschiedlichen Anströmrichtungen verzeichnet.

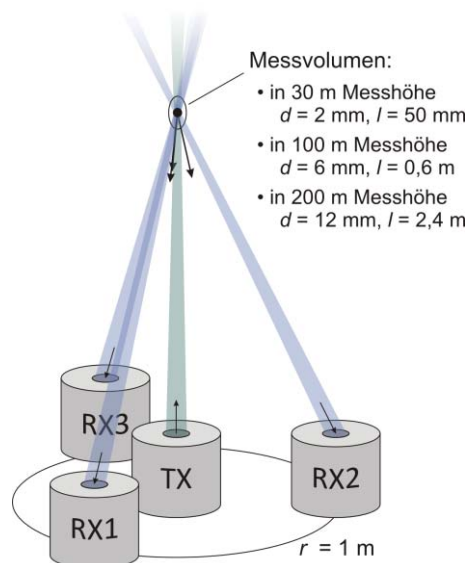


Abb. 2: Prinzip des bistatischen Wind-Lidars

Sowohl die Messdaten des Ultraschallanemometers wurden mit einer Rate von 10 Hz aufgezeichnet, als auch die gespeicherten Rohdaten des Wind-Lidars auf diese Datenrate zusammengefasst. Bereinigt um Zeiten mit Regen wurden beide Datensätze mit der Eddy-Kovarianz-Auswertesoftware TK3 (Mauder und Foken, 2015) in 458 Intervallen je 30 Minuten ausgewertet.

Aufgrund von theoretischen Analysen entwickelte Kolmogorov (1941) Ähnlichkeitsgesetze für die Energiekaskade in voll entwickelter Turbulenz. So sollte für die spektrale Leistungsdichte im Inertialbereich das sogenannte $-5/3$ -Gesetz gelten, d.h. $P(k) \sim k^{-5/3}$. Der Vergleich theoretischer Spektren mit gemessenen stellt deshalb eine sehr gute Möglichkeit dar, um die Qualität der Messwerte zu beurteilen (Peña et al., 2019). In der vorliegenden Analyse haben wir uns insbesondere auf die folgenden beiden Charakteristika im turbulenten Inertialbereich konzentriert:

i) Das Verhältnis zwischen den Spektren der transversalen Windgeschwindigkeitskomponenten S_v und S_w und der longitudinalen Komponente S_u sollte theoretisch jeweils genau $4/3$ betragen. Ein Verhältnis kleiner als $4/3$ würde bedeuten, dass entweder die vertikale Windkomponente unterschätzt oder die horizontale überschätzt wurde (Peña et al., 2019).

ii) Die Leistungsspektren sollten in doppelt logarithmischer Darstellung wiederum eine Steigung von $-5/3$ wiedergeben, die der Kospektren sogar $-7/3$ (Kaimal und Finnigan, 1994; Peña et al., 2019). In der Publikation von Mauder et al. (2019) finden sich weitere Details zur Methodik dieser Vergleichsmessung und -Berechnung, insbesondere auch zur sogenannten Cut-off-Frequenz.

Messergebnisse

Wie in Abbildung 3 und Tabelle 1 dargestellt, stimmen die mit beiden Instrumenten gemessenen Größen \bar{u} , $\sqrt{w'w'}$ und u_* sehr gut überein. Insbesondere die Bestimmung der Standardabweichung der vertikalen Komponente $\sqrt{w'w'}$ liefert angesichts einer mittleren Abweichung von 0,017 m/s gegenüber der Regressionsgeraden mit einem Achsenabschnitt von nur 0,01 m/s und einer Steigung von 0,989 nahezu identische Werte beider Systeme. Die von Horst et al. (2015) und von Frank et al. (2016) beobachtete, durch Strömungsbeeinflussung verursachte Messabweichung von -3 % bis -5 % kann durch diesen Vergleich mit einem nicht-invasiven Messinstrument folglich nicht bestätigt werden.

Auch die mittlere horizontale Strömungsgeschwindigkeit \bar{u} weist mit einem Achsenabschnitt von nur 0,04 m/s und einer Steigung von ebenfalls 0,989 der Regressionsgeraden eine hohe Übereinstimmung auf. Im Vergleich hierzu besitzt die gemessene Schubspannungsgeschwindigkeit u_* angesichts einer Steigung der Regressionsgeraden von 0,973 eine etwas größere Abweichung, welche nachfolgend näher untersucht werden soll.

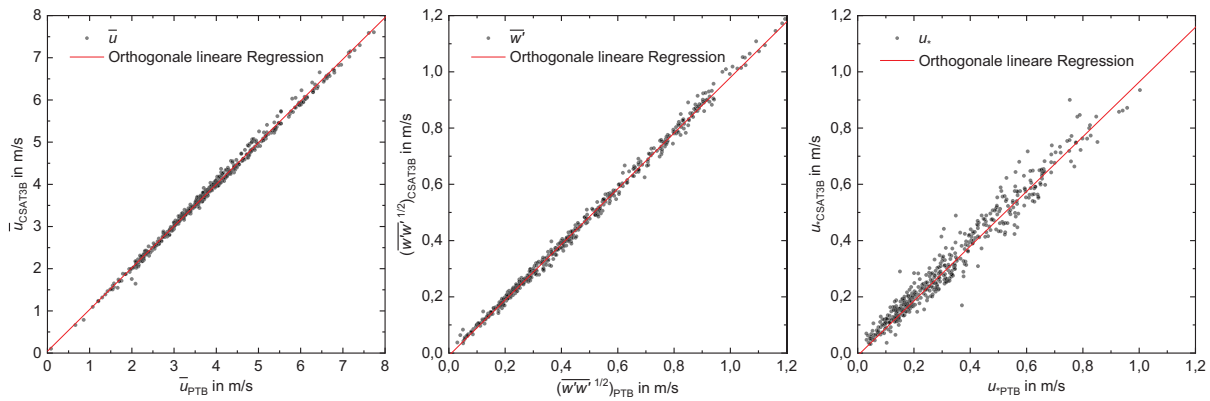


Abb. 3: Vergleich der mittleren horizontalen Geschwindigkeitskomponente \bar{u} , der vertikalen Fluktuationen $\sqrt{w'w'}$ sowie der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* , mit orthogonaler linearer Regression.

	\bar{u}	$\sqrt{w'w'}$	u_*
Bias (m s^{-1})	0,003	-0,009	-0,009
Mittlere Abweichung, RMSE (m s^{-1})	0,082	0,017	0,042
Regression, Achsenabschnitt (m s^{-1})	0,044	-0,009	0,000
Regression, Steigung	0,989	0,989	0,973
Korrelationskoeffizient	0,998	0,998	0,980

Tab. 1: Statistische Kenngrößen der Vergleichsmessung von Wind-Lidar und Ultraschallanemometer

	\bar{u}	$\sqrt{w'w'}$	u_*
Bias (m s^{-1})	0,076	0,002	-0,010
Mittlere Abweichung, RMSE (m s^{-1})	0,107	0,016	0,041
Regression, Achsenabschnitt (m s^{-1})	0,041	-0,011	-0,013
Regression, Steigung	1,010	1,030	1,007
Korrelationskoeffizient	0,998	0,998	0,981

Tab. 2: Wie Tab. 1, jedoch mit auf die Daten des Ultraschallanemometers angewendeter H15-Korrektur

Hierfür wurde zunächst eine Korrekturfunktion zur Fluktuation der vertikalen Windgeschwindigkeitskomponente (Horst et al. 2015, nach ihnen H15-Korrektur benannt) auf die Messwerte des Ultraschallanemometers angewendet, die statistischen Kenngrößen sind in Tabelle 2 dargestellt. Wie zu erwarten hebt die Korrekturfunktion $\sqrt{w'w'}$ und somit auch die Steigung ihrer Regressionsgeraden von 0,989 auf 1,030 an, so dass sich der Betrag der Abweichung letztendlich vergrößert. Ebenso vergrößern sich auch der Bias und die mittlere Abweichung von \bar{u} durch die Korrekturfunktion. Lediglich die Werte für u_* verbessern sich, indem sich die Steigung der Regressionsgeraden von 0,973 auf 1,007 erhöht.

Um die Abweichungen von \bar{u} näher zu untersuchen, wurde die relative Abweichung $\Delta\bar{u}/\bar{u}$ mit $\Delta\bar{u} = \bar{u}_{sonic} - \bar{u}_{lidar}$ auf Abhängigkeit zu u_* , der Lufttemperatur, der Windrichtung und der Standardabweichungen der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten hin untersucht. Der deutlichste Zusammenhang fand sich zur Windrichtung, wie in Abbildung 4 dargestellt ist, und zeigt sich unabhängig von der Anwendung der H15-Korrektur. Diese Beobachtungen werden von Grare et al. (2016) und Huq et al. (2017) bestätigt, so dass die hier aufgetretene Messabweichung in der Durchschnittsgeschwindigkeit der Winkelabhängigkeit des Ultraschallanemometers zugerechnet werden kann.

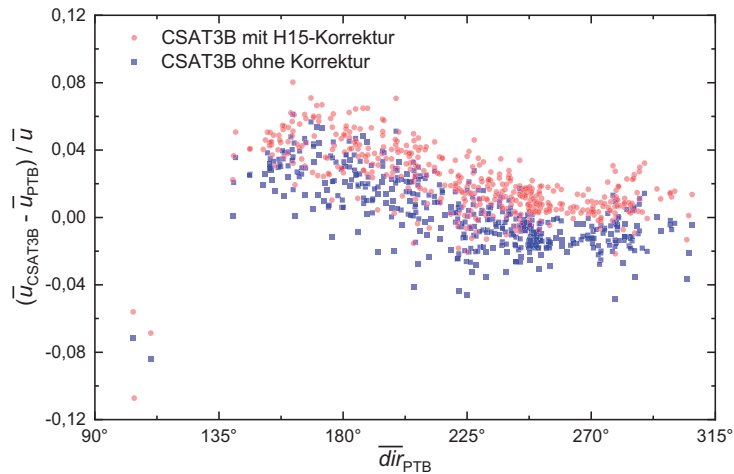


Abb. 4: Relative Abweichung der Messwerte mit und ohne H15-Korrektur, dargestellt über die Windrichtung (das Ultraschallanemometer ist in Richtung 270° ausgerichtet).

Der folgende Abschnitt behandelt die Ensemble-Leistungsdichtespektren der gemessenen Turbulenz, getrennt für die drei Windkomponenten u , v und w . Der Fokus liegt dabei auf den Quotienten der Spektren im Inertialbereich der turbulenten Energiekaskade. Dies erklärt teilweise die sehr hohe Übereinstimmung zwischen CSAT3B und PTB-Lidar in Bezug auf den Parameter $\sqrt{w'w'}$. Abbildung 5 verdeutlicht, dass alle drei Windkomponenten in der PTB-Lidar-Messung bei sehr hohen Frequenzen ein gewisses Rauschen zeigen. Zusätzlich ist im w -Spektrum eine leichte Dämpfung bei hohen Frequenzen ersichtlic. Die CSAT3B-Spektren aller drei Windkomponenten folgen dagegen sehr gut dem theoretischen $-5/3$ -Gesetz. Es gibt keine Anzeichen von Rauschen, Aliasing oder Dämpfung bei hohen Frequenzen (Abbildung 5).

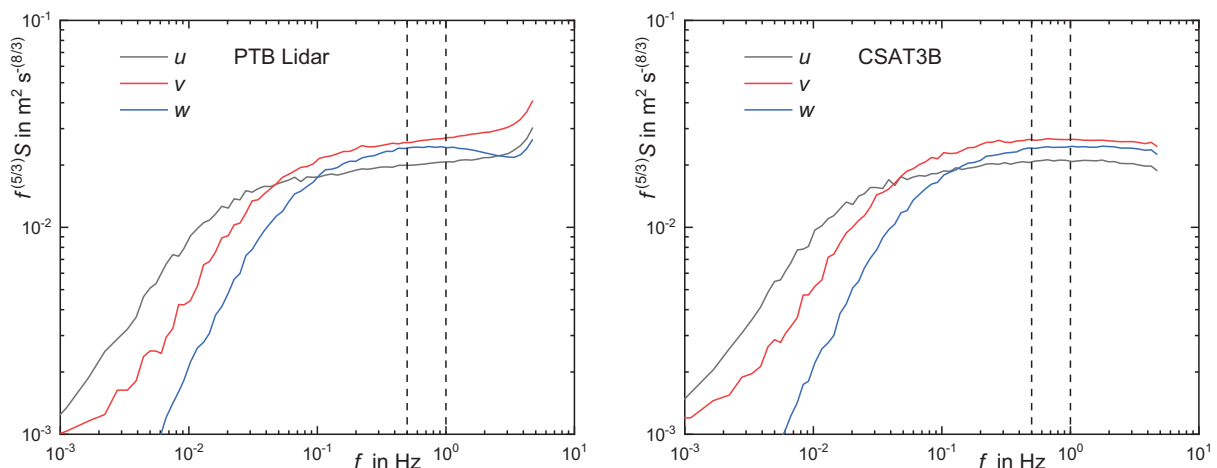


Abb. 5: Ensemble-Leistungsdichtespektren der Turbulenz, getrennt für die drei Windkomponenten u , v und w , vor-multipliziert mit der Frequenz $f^{5/3}$, so dass das theoretische $-5/3$ -Gesetz als horizontale Linie zu sehen wäre. Die Spektren der Daten des PTB-Lidars sind im linken Diagramm, die des CSAT3B auf der rechten dargestellt. Die vertikalen gestrichelten Linien grenzen den Bereich zwischen 0.5 Hz und 1 Hz im Inertialbereich der turbulenten Energiekaskade ein, für den die Quotienten zwischen den Spektren berechnet wurden. Es ist zu beachten, dass die Abweichungen von der theoretischen Erwartung im Inertialbereich durch die Vor-Multiplikation mit $f^{5/3}$ übersteigert erscheinen.

Spektrale Verhältnisse	PTB-Lidar	CSAT3B	CSAT3B + H15
S_v/S_u	1,30	1,26	1,25
S_w/S_u	1,20	1,16	1,11

Tab. 3: Quotienten aus den Leistungsdichtespektren der drei Windkomponenten im Inertialbereich zwischen 0.5 Hz und 1 Hz aus den Messungen des PTB-Lidars und des Ultraschallanemometers CSAT3B, letztere einmal ohne und einmal mit H15-Korrektur für die Umströmungsstörung. Zu beachten ist, dass die Quotienten S_v/S_u und S_w/S_u unter der Annahme isotroper Turbulenz beide den theoretischen Wert $4/3$ annehmen sollten (Kaimal und Finnigan, 1994).

Zusätzlich zum $-5/3$ -Gesetz wurde für die Quotienten der Spektren, S_v/S_u und S_w/S_u , im Inertialbereich ein theoretischer Wert von genau $4/3$ abgeleitet (Kaimal und Finnigan, 1994). Beide Instrumente zeigen jedoch kleinere Quotienten, wobei die Werte des PTB-Lidars generell ein paar Prozentpunkte höher liegen (und damit näher an der Theorie) als die des CSAT3B (Tabelle 3). Die Quotienten S_v/S_u liegen bei beiden Instrumente über denen von S_w/S_u . Kleinere S_w/S_u -Quotienten wurden von Peña et al. (2019) als Indikator für instrumentenbedingte Strömungsstörungen interpretiert, was mit den hier gezeigten Ergebnissen vereinbar ist, weil das störungsfreie PTB-Lidar höhere Quotienten zeigt. Jedoch erreichen auch sie nicht den theoretischen Wert von $4/3$, weder für S_v/S_u noch für S_w/S_u . Die Autoren gehen daher davon aus, dass der theoretische Wert in der Realität des Experimentes nicht erreicht wurde, sehr wahrscheinlich weil die reale Turbulenz nicht vollständig isotrop war (Brugger et al., 2018; Stiperski und Calaf, 2017; Högström und Smedman, 2004).

Daneben muss festgestellt werden, dass durch die H15-Korrektur keine Verbesserungen bei den Werten erzielt werden – vermutlich, weil sie für die Korrektur von Umströmungsstörungen nicht geeignet ist. Dies zeigt sich auch beim Vergleich mit dem $-7/3$ -Gesetz in Abbildung 6, wobei hier das störungsfreie PTB-Lidar das beste Verhalten aufweist.

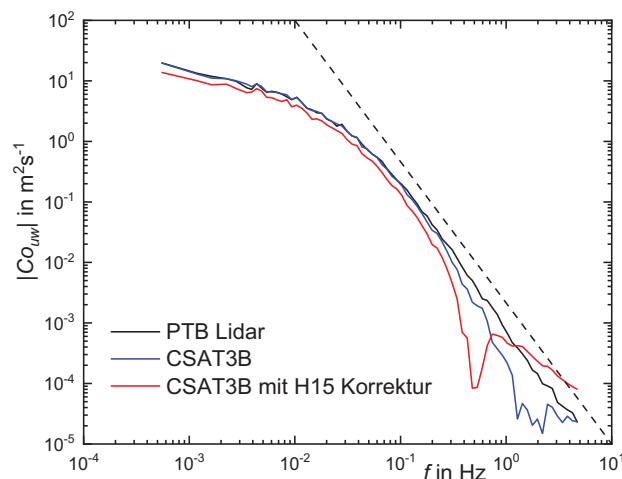


Abb. 6: Ensemble-Kospektren zwischen den Windkomponenten u und w (absolute Werte) aus den jeweiligen Turbulenz-Messungen des PTB-Lidars und des CSAT3B-Ultraschall-Anemometers. Die gestrichelte Linie zeigt das theoretische $-7/3$ -Gesetz im Inertialbereich der Turbulenz.

Zusammenfassung

Die durchgeführten Vergleichsmessungen zwischen dem bistatischen Wind-Lidar der PTB und einem CSAT3B Ultraschallanemometer zeigen eine gute Übereinstimmung insbesondere der für die Windenergie relevanten horizontalen Windgeschwindigkeit \bar{u} und der in der Meteorologie zur Bestimmung des turbulenten Gasaustauschs nach der Eddy-Kovarianz-Methode relevanten vertikalen Fluktuationen $\sqrt{w'w'}$.

Bei den Messungen des Ultraschallanemometers weist das Verhältnis der spektralen Leistungsdichten zwischen w und u hingegen auf eine leichte Beeinträchtigung der Strömung hin, welche zu einem zu steilen Abfall des Co_{uw} Kospektrums im inertialen Bereich zwischen 0,5 Hz und 1 Hz und damit zu einer um 3 % zu niedrig gemessenen Schubspannungsgeschwindigkeit u_* führt. Die testweise Anwendung einer H15-Korrektur bringt hier keine Verbesserung, sondern führt zu einem weiter verzerrten Co_{uw} Kospektrum, einer Verfälschung von $\sqrt{w'w'}$ um etwa 3 % und korrigiert auch die beobachtete Richtungsabhängigkeit von \bar{u} nicht.

Die spektrale Analyse der mit dem bistatischen Wind-Lidar aufgenommenen Geschwindigkeiten zeigt oberhalb von 2 Hz einen geringfügigen Anstieg des Rauschens in allen Geschwindigkeitskomponenten, sowie im Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 2 Hz eine vermutlich durch Mittelungseffekte über die Länge des Messvolumens entstandene leichte Dämpfung der vertikale Komponente, wie sie auch bei Ultraschallanemometern bekannt ist und korrigiert wird (Moore, 1986). Der Verlauf des mit dem Lidar aufgenommenen Co_{uw} Kospektrums stimmt insbesondere im inertialen Bereich deutlich besser mit der Theorie überein als beim Ultraschallanemometer.

Somit zeigen sich beide Geräte als präzise Instrumente zur Bestimmung turbulenter Messgrößen, wobei das bistatische Wind-Lidar insbesondere bei der Messung der Schubspannungsgeschwindigkeit die Stärken eines nicht-invasiven Messprinzips demonstriert.

Literatur

Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D., Eds., 2012: Eddy Covariance - A Practical Guide to Measurement and Data Analysis, Springer, Dordrecht.

Bingöl, F., Mann, J., Foussekis, D., 2009: Conically scanning lidar error in complex terrain, Meteorol. Zeitschrift, 18(2), 189–195, doi:10.1127/0941-2948/2009/0368.

Bradley, S., 2008: Wind speed errors for LIDARs and SODARs in complex terrain, IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., 1, 012061, doi:10.1088/1755-1307/1/1/012061.

Brugger, P., Katul, G. G., De Roo, F., Kröniger, K., Rotenberg, E., Rohatyn, S., Mauder, M., 2018: Scalewise invariant analysis of the anisotropic Reynolds stress tensor for atmospheric surface layer and canopy sublayer turbulent flows, Phys. Rev. Fluids, 3, 054608, doi:10.1103/PhysRevFluids.3.054608.

Eggert M., Gutsmuths C., Müller H., Többen H., 2016: „Zeitaufgelöste, vektorielle Vergleichsmessungen zwischen dem Doppler-LIDAR-Transfernromal der PTB und einem 135 m hohen Windmessmasten“, Proceedings der 24. GALA-Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik", 3/1-3/7

Frank, J. M., Massman, W. J., Ewers, B. E., 2013: Underestimates of sensible heat flux due to vertical velocity measurement errors in non-orthogonal sonic anemometers, Agric. For. Meteorol., 171–172, 72–81, doi:10.1016/j.agrformet.2012.11.005.

- Frank, J. M., Massman, W. J., Swiatek, E., Zimmerman, H. A., Ewers, B. E., 2016:** All sonic anemometers need to correct for transducer and structural shadowing in their velocity measurements, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 33(1), 149–167, doi:10.1175/JTECH-D-15-0171.1.
- Grare, L., Lenain, L., Melville, W. K., 2016:** The Influence of Wind Direction on Campbell Scientific CSAT3 and Gill R3-50 Sonic Anemometer Measurements, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 33(11), 2477–2497, doi:10.1175/JTECH-D-16-0055.1.
- Högström, U., Smedman, A. S., 2004:** Accuracy of sonic anemometers: Laminar wind-tunnel calibrations compared to atmospheric in situ calibrations against a reference instrument, *Boundary-Layer Meteorol.*, 111(1), 33–54, doi:10.1023/B:BOUN.0000011000.05248.47.
- Horst, T. W., Semmer, S. R., Maclean, G., 2015:** Correction of a Non-orthogonal, Three-Component Sonic Anemometer for Flow Distortion by Transducer Shadowing, *Boundary-Layer Meteorol.*, 155(3), 371–395, doi:10.1007/s10546-015-0010-3.
- Huq, S., De Roo, F., Foken, T., Mauder, M., 2017:** Evaluation of Probe-Induced Flow Distortion of Campbell CSAT3 Sonic Anemometers by Numerical Simulation, *Boundary-Layer Meteorol.*, 165(1), doi:10.1007/s10546-017-0264-z.
- Kaimal, J. C., Finnigan, J. J., 1994:** *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*, Oxford University Press, New York, NY..
- Kolmogorov, A. N., 1941:** The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers, *C. R. Acad. Sci. URSS*, 30, 301–305.
- Mauder, M., Eggert, M., Gutsmuths, C., Oertel, S., Wilhelm, P., Voelksch, I., Wanner, L., Tambke, J., Bogoev, I., 2019:** Comparison of turbulence measurements by a CSAT3B sonic anemometer and a high-resolution bistatic Doppler lidar, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, doi:10.5194/amt-2019-133, in review.
- Mauder, M., Foken, T., 2015:** Eddy-Covariance Software TK3, [online] Available from: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.20349>.
- Mauder, M., Zeeman, M. J., 2018:** Field intercomparison of prevailing sonic anemometers, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 249–263, doi:10.5194/amt-11-249-2018.
- Moore, C. J., 1986:** Frequency response corrections for eddy correlation systems, *Boundary-Layer Meteorol.*, 37(1–2), 17–35, doi:10.1007/BF00122754.
- Oertel, S., Eggert, M., Gutsmuths, C., Wilhelm, P., Müller, H., Többen, H., 2019:** Validation of three-component wind lidar sensor for traceable highly resolved wind vector measurements, *J. Sensors Sens. Syst.*, 8, 9–17, doi:10.5194/jsss-8-9-2019.
- Peña, A., Dellwik, E., Mann, J., 2019:** A method to assess the accuracy of sonic anemometer measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 237–252, doi:10.5194/amt-12-237-2019.
- Stiperski, I., Calaf, M., 2017:** Dependence of near-surface similarity scaling on the anisotropy of atmospheric turbulence, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, doi:10.1002/qj.3224.
- Tambke, J., Focken, U., Lange, M., Wolff, J.-O., Bye, J. A. T., 2005:** Forecasting offshore wind speeds above the North Sea, *Wind Energy*, 8, 3–16, doi:10.1002/we.140.
- Wyngaard, J. C., 1988:** Flow-distortion effects on scalar flux measurements in the surface layer: Implications for sensor design, *Boundary-Layer Meteorol.*, 42(1–2), 19–26, doi:10.1007/BF00119872.
- Zhang, S. F., Wyngaard, J. C., Businger, J. A., Oncley, S. P., 1986:** Response characteristics of the U.W. sonic anemometer, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 3, 315–323, doi:10.1175/1520-0426(1986)003<0315:RCOTUS>2.0.CO;2.