Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik"
7. – 9. September 2021, Bremen

Vergleich des bistatischen Doppler-Lidars der PTB und eines Drohnen-basierten Ultraschall-Anemometers

Comparison of PTB's bistatic doppler Lidar and a drone based ultrasonic anemometer

P. Wilhelm[1], M. Eggert[1], J. Hornig[1], W. Thielicke[2], W. Hübert[2], U. Müller[2]

[1] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany
[2] OPTOLUTION Messtechnik GmbH, Gewerbestr. 18, 79539 Lörrach, Germany

Schlagworte: Wind-Lidar, bistatisch, Ultraschall-Anemometer, Drohne
Keywords: wind-lidar, bistatic, ultrasonic anemometer, drone

Zusammenfassung

Das von der PTB entwickelte bistatische Doppler-Lidar-System erlaubt die optische Bestimmung des Geschwindigkeitsvektors von Aerosolen in einer Messhöhe von 5 m bis über 250 m. Es wurde eine Vergleichsmessung zwischen dem hochauflösenden Doppler-Lidar der PTB und dem Drohnen-basierten Ultraschall-Anemometer *OPTOkopter* der OPTOLUTION Messtechnik GmbH (Lörrach) durchgeführt. Die für den Vergleich herangezogenen Messreihen wurden in einem umbauten Innenhof auf zwei unterschiedlichen Messhöhen sowie im schwebenden bzw. kreisenden Modus der Drohne durchgeführt. Nebst statistischer Auswertung der Messergebnisse im Zeitbereich wurde auch eine qualitative Betrachtung der Signalspektren durchgeführt. Hierbei zeigt das PTB-Lidar im Vergleich zum *OPTOkopter* eine höhere Sensitivität in der vertikalen Strömungskomponente. Zwischen dem kreisenden und dem schwebenden Flugmodus der Drohne lässt sich anhand der vorliegenden Messdaten kein signifikanter Unterschied erkennen, was auf eine effektive Eigengeschwindigkeits- und Eigenschwingungskompensation des *OPTOkopters* schließen lässt. Aufgrund des Abstandes der beiden Messvolumina zueinander und der deutlich gestörten und damit lokal stark variierenden Strömung über dem bebautem Gebiet sind die Messungen von PTB-Lidar und *OPTOkopter* zwar nur eingeschränkt vergleichbar und allgemeingültige Aussagen nicht möglich, dennoch lässt sich trotz der hierdurch gebotenen Vorsicht bei der Bewertung der Ergebnisse für diese Vergleichsmessung insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen den von beiden Systemen erfassten Windgeschwindigkeiten konstatieren, sofern dabei gleichermaßen die signifikanten Unterschiede in Funktionsweise und Einsatzgebiet beider Systeme berücksichtigt werden.

1. Einleitung

Das in der PTB entwickelte bistatische Doppler-Lidar ermöglicht räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Windgeschwindigkeitsmessungen in Höhen von ca. 5 m bis rund 250 m. Bei vorangegangenen Vergleichsmessungen im Windkanal des Kompetenzzentrums für Windenergie der PTB (CCW) wurde im Geschwindigkeitsbereich zwischen 4 $m \cdot s^{-1}$ und 16 $m \cdot s^{-1}$ in einer Messhöhe von 8 m eine systematische Messunsicherheit von weniger als 0,5 % verzeichnet [1]. Für den Feldeinsatz unter realen Bedingungen lässt sich die erweiterte relative Messunsicherheit mit 1 % nach oben abschätzen. Durch das aus der bistatischen Geometrie

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

resultierende kleine Ellipsoid-förmige Messvolumen von jeweils unter 1 dm³ (z. B. in 100 m Höhe 6 mm horizontale und 600 mm vertikale Ausdehnung) eignet sich das PTB-Lidar im Gegensatz zu konventionellen monostatischen Systemen insbesondere zur Messung von Windgeschwindigkeitsvektoren in komplexem Gelände. Langfristig wird daher der Einsatz als Bezugsnormal für die Rückführung von kommerziellen Windfernmesssystemen (z. B. Lidar-Systemen) auf die SI-Einheiten angestrebt. Vorangegangene Vergleichsmessungen mit einem stationären Ultraschall-Anemometer des Typs CSAT3B haben gezeigt, dass das bistatische PTB-Lidar sehr gut für die Erfassung turbulenter Messgrößen geeignet ist [2], [3].

Der *OPTOkopter* ist eine Quadrokopter-Plattform mit einem im Abstand von 1,15 m oberhalb der Rotoren angebrachten 3D-Ultraschall-Anemometer des Herstellers *Gill Instruments*. Die Positionsregelung der Drohne erfolgt mittels Trägheitsnavigation und Real Time Kinematic (RTK) GPS. Anhand der Positionsdaten kann die vom Anemometer gemessene Eigengeschwindigkeit der bewegten Drohne kompensiert werden. Zusätzlich werden Anstellwinkel und Schwingungen um Quer- und Längsachse kompensiert. Auch der Einfluss der Rotorblätter auf die gemessene Strömungsgeschwindigkeit kann bis zu einem gewissen Grad kompensiert werden [4]. Durch seine allgemeine Flexibilität in der Positionierung sowie das mitgeführte Ultraschall-Anemometer ist auch der *OPTOkopter* für den Einsatz in komplexem Gelände grundsätzlich geeignet.

Durch die unterschiedlichen Messprinzipien von PTB-Lidar und *OPTOkopter* sowie aufgrund der inkongruenten Messvolumina (durch horizontalen Sicherheitsabstand, siehe Abschnitt 2) sind Abweichungen der jeweils gemessenen Windgeschwindigkeit (und -richtung) zu erwarten, welche bei instationärer Strömung (reale Wetterbedingungen) durchaus signifikant werden können. Die Vergleichbarkeit der Messergebnisse beider Systeme unter diesen Bedingungen wird im Folgenden untersucht.

2. Durchführung der Messungen

Abbildung 1 zeigt den *OPTOkopter* über dem PTB-Lidar, welches zwischen mehreren Gebäuden positioniert wurde. Der Versuchsaufbau der Messung ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

Der *OPTOkopter* wurde in zwei unterschiedlichen Flugmodi eingesetzt:

- Im *schwebenden* Modus wurde die Position der Drohne bzw. des Drohnen-Messvolumens in der jeweiligen Messhöhe mit einem horizontalen Abstand von ca. 3 m zum Messvolumen des PTB-Lidars mittels GPS konstant gehalten. Die Drohne wurde stromabwärts zum Messvolumen des PTB-Lidars positioniert, um den möglichen Einfluss der von den Drohnen-Rotorblättern verursachten Turbulenzen im Messvolumen des PTB-Lidars zu minimieren.

- Im *kreisenden* Modus wurde die Position der Drohne in der jeweiligen Messhöhe mittels GPS auf einer Kreisbahn in der horizontalen Ebene mit einem Radius von ca. 3 m um das Messvolumen des PTB-Lidars gehalten, die Fluggeschwindigkeit betrug ca. 3 $m \cdot s^{-1}$.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

Der horizontale Sicherheitsabstand von ca. 3 m dient in beiden Flugmodi dazu, einer Beschädigung der Drohne durch die hohe Leistungsdichte des Sendestrahls im Messvolumen des PTB-Lidars (1200 W/cm² in 30 m, 100 W/cm² in 100 m Messhöhe) vorzubeugen. Beide Systeme messen also an unterschiedlichen Orten, was bei Aussagen über die Vergleichbarkeit der Messergebnisse berücksichtigt werden muss.

Die Messungen wurden in den beiden Höhen 30 m und 100 m durchgeführt. In der Messhöhe von 30 m wurde sowohl im schwebenden Modus als auch im kreisenden Modus der Drohne gemessen, um im kreisenden Modus auch den Effekt der Eigengeschwindigkeitskompensation der Drohne zu erfassen. In der Messhöhe von 100 m wurde ausschließlich im schwebenden Modus gemessen. Die durchschnittliche Messdauer betrug ca. 11 Minuten (ca. 25% der maximalen Flugzeit der Drohne).

Abbildung 1: Bistatisches Doppler-Lidar der PTB, darüber das Drohnen-basierte Ultraschall-Anemometer (*OPTOkopter*)

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

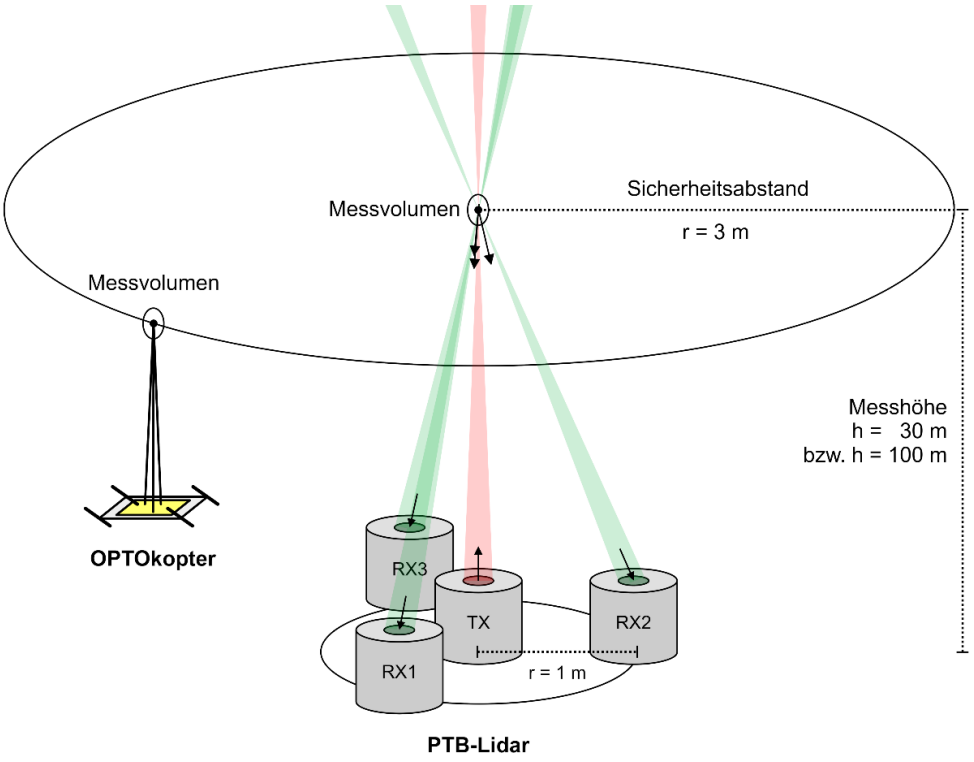


Abbildung 2: Darstellung des Versuchsaufbaus der Vergleichsmessung zwischen PTB-Lidar und *OPTOkopter* : PTB-Lidar-Basisabstand zwischen Sendeeinheit und Empfangseinheiten (1 m); Messhöhe beider Messvolumina (30 m bzw. 100 m); Sicherheitsabstand zwischen den Messvolumina (3 m).

3. Auswertung

Zur besseren Auswertung und Darstellung der Windgeschwindigkeitsvektoren wurden diese zunächst vom ortsfesten *(x, y, z)*-Koordinatensystem in die Windgeschwindigkeitskomponenten *u, v, w* überführt. Hierfür wurde jeder Vektor des Messdatensatzes so gedreht, dass die *u*-Komponente in Richtung der durchschnittlichen horizontalen Windrichtung zeigt. Daraus folgt, dass die *v*-Komponente mittelwertfrei ist und somit der horizontalen Windgeschwindigkeitsfluktuation transversal zur *u*-Komponente in Windrichtung entspricht. Diese Transformationen wurden für jede Messung sowohl für das PTB-Lidar als auch für den *OPTOkopter* unabhängig voneinander durchgeführt.

Das PTB-Lidar und der *OPTOkopter* liefern Messwerte mit einer Datenrate von 10 Hz bzw. 16 Hz. Zur besseren Darstellung wurden die Zeitreihen mit einem gleitenden Mittelwert über 10 bzw. 16 Samples vorgefiltert (Sekundenmittelwerte). Um eine Vergleichbarkeit der Signalspektren zu gewährleisten, wurden beide Spektren nur bis zu einer maximalen Signalfrequenz von 5 Hz dargestellt. Die Spektren der ungefilterten Zeitreihen wurden mit einem gleitenden Mittelwert über 40 bzw. 64 Bins (entsprechend einer Blockgröße von ca. 0,15 Hz) geglättet.

Abbildung 3, Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen jeweils sowohl die Zeitreihe als auch das Signalspektrum der einzelnen Windgeschwindigkeitskomponenten für die Messung in 100 m Höhe (schwebend) bzw. für die Messungen in 30 m Höhe (schwebend und kreisend) . Aufgrund der oben beschriebenen Koordinatentransformation hebt sich in den Zeitreihen beider Messhöhen die *u*-Komponente deutlich von den anderen beiden Komponenten ab.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

Auffallend ist darüber hinaus das niedrigere Rauschen in der *w*-Komponente (vertikale Windgeschwindigkeit) des PTB-Lidars gegenüber dem *OPTOkopter*. Dies ist im Spektrum anhand des zu höheren Frequenzen schneller abfallenden Amplitudenverlaufs der *W*-Komponente ersichtlich und in Abbildung 3 (in 100 m Höhe) deutlicher ausgeprägt als in Abbildung 4 und Abbildung 5 (in 30 m Höhe).

Aufgrund des optischen Messverfahrens und da beim Lidar-System keinerlei Glättungsfilter angewendet wurden, können zusätzliche Tiefpass-Effekte ausgeschlossen werden, zumal solche auch alle Messungen in gleicher Weise hätten betreffen müssen. Vielmehr führen vertikale Geschwindigkeiten aufgrund der Strahlgeometrie zu deutlich höheren Dopplerfrequenzen, wodurch das Lidar-System eine besonders hohe Sensitivität für die vertikale Geschwindigkeitskomponente (w) besitzt. Die Eignung des PTB-Lidars zur Erfassung turbulenter Messgrößen, speziell zur Bestimmung vertikaler Austauschprozesse, wurde in einer vorangegangenen Vergleichsmessung mit einem CSAT3B-Ultraschall-Anemometer gezeigt (s. hierzu [2] und [3]). In 30 m Messhöhe über bebautem Gebiet jedoch wird dieser Effekt von der hohen Turbulenz der Strömung überdeckt, so dass er erst in 100 m Messhöhe deutlich sichtbar wird (vgl. Abbildungen 3 und 4).

Anhand der in den in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellten Zeitreihen und Spektren lässt sich in Abhängigkeit des Flugmodus der Drohne (kreisend bzw. schwebend) kein signifikanter Unterschied in den Ergebnissen des *OPTOkopters* selbst sowie im Vergleich zu den Ergebnissen des PTB-Lidars erkennen. Dies legt nahe, dass ein möglicher Fehler durch die Eigengeschwindigkeitskompensation des *OPTOkopters* im vorliegenden Fall geringer ist als der durch die Entfernung zwischen den Messvolumina von PTB-Lidar und *OPTOkopter* ohnehin eingetragene Fehler bei der gemessenen Windgeschwindigkeit.

Abbildung 6 stellt die Abweichungen der Windgeschwindigkeit zwischen beiden Systemen für jede Messung komponentenweise in Form von Streudiagrammen dar. Zur quantitativen Untersuchung der Messergebnisse wurde außerdem jeweils eine orthogonale Regression durchgeführt; Tabelle 1 zeigt für jede Messung den Korrelationskoeffizienten R nach Pearson sowie den Standardfehler der orthogonalen Regression s. Die Korrelationskoeffizienten liegen im Bereich $R = 0{,}741 \ldots 0{,}883$ und die mittleren Standardfehler der orthogonalen Regression liegen im Bereich $s = 0{,}145 \ldots 0{,}186\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

Abbildung 6 zeigt, dass für die *u*-Komponente (in Hauptwindrichtung) die beste Annäherung der Ausgleichsgeraden an die Identität bei der Messung in 30 m Höhe im kreisenden Flugmodus zu beobachten ist; der größte Korrelationskoeffizient und der gleichzeitig geringste Standardfehler resultieren jedoch aus der 100 m-Messung im schwebenden Flugmodus. Für alle drei Messungen ist anhand der Steigung der Ausgleichsgeraden erkennbar, dass die Messwerte der *w*-Komponente (in vertikaler Windrichtung) vom *OPTOkopter* geringer ausfallen, als sie vom PTB-Lidar gemessen wurden.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

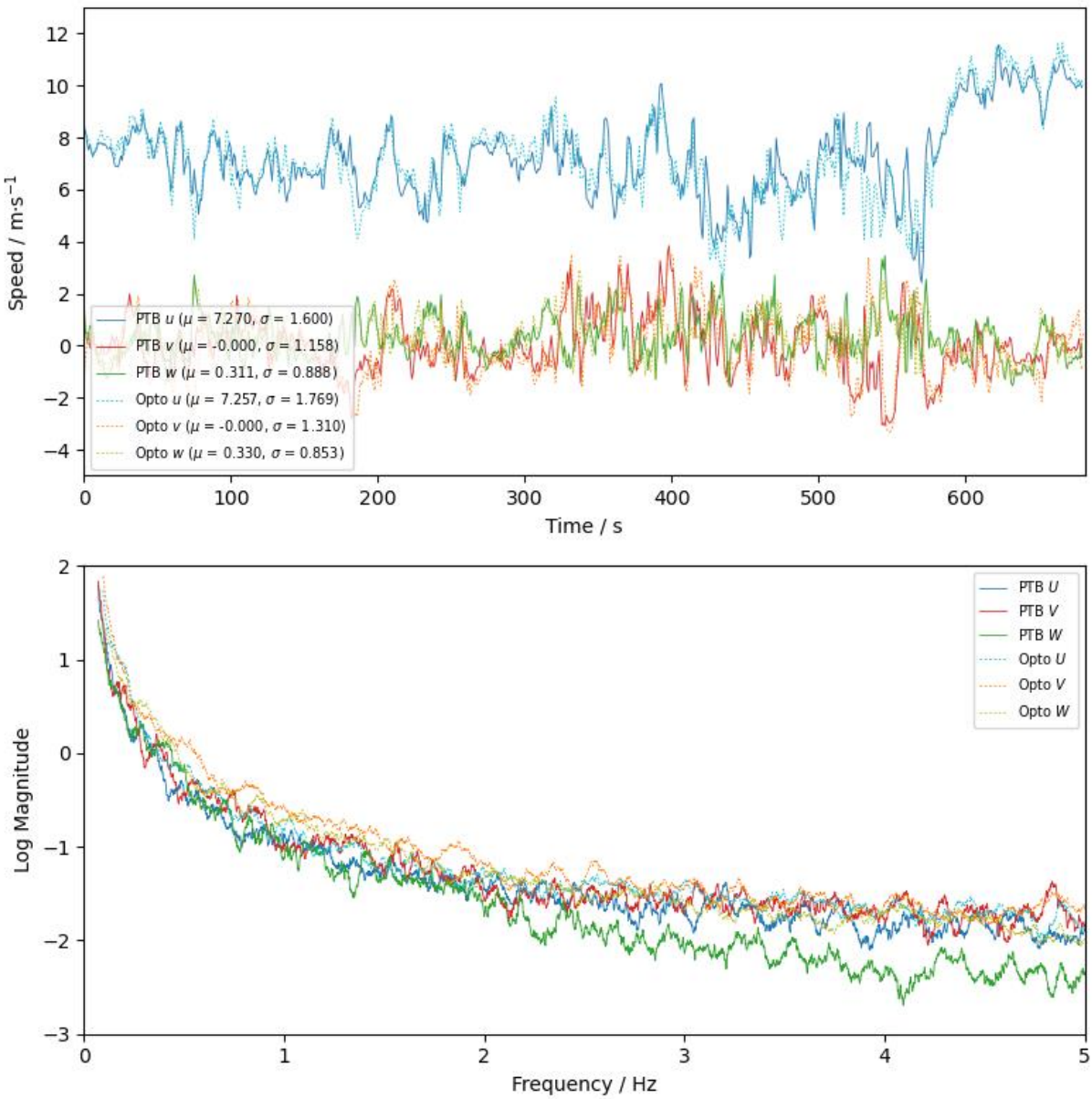


Abbildung 3: Darstellung der Windgeschwindigkeitskomponenten beider Systeme (PTB-Lidar und *OPTOkopter*) als Zeitreihe mit einer Auflösung von 1 s (oben, *u*, *v*, *w*) und als Spektrum (unten, *U*, *V*, *W*) für die Messung in 100 m Höhe (OPTOkopter im *schwebenden* Flugmodus).

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

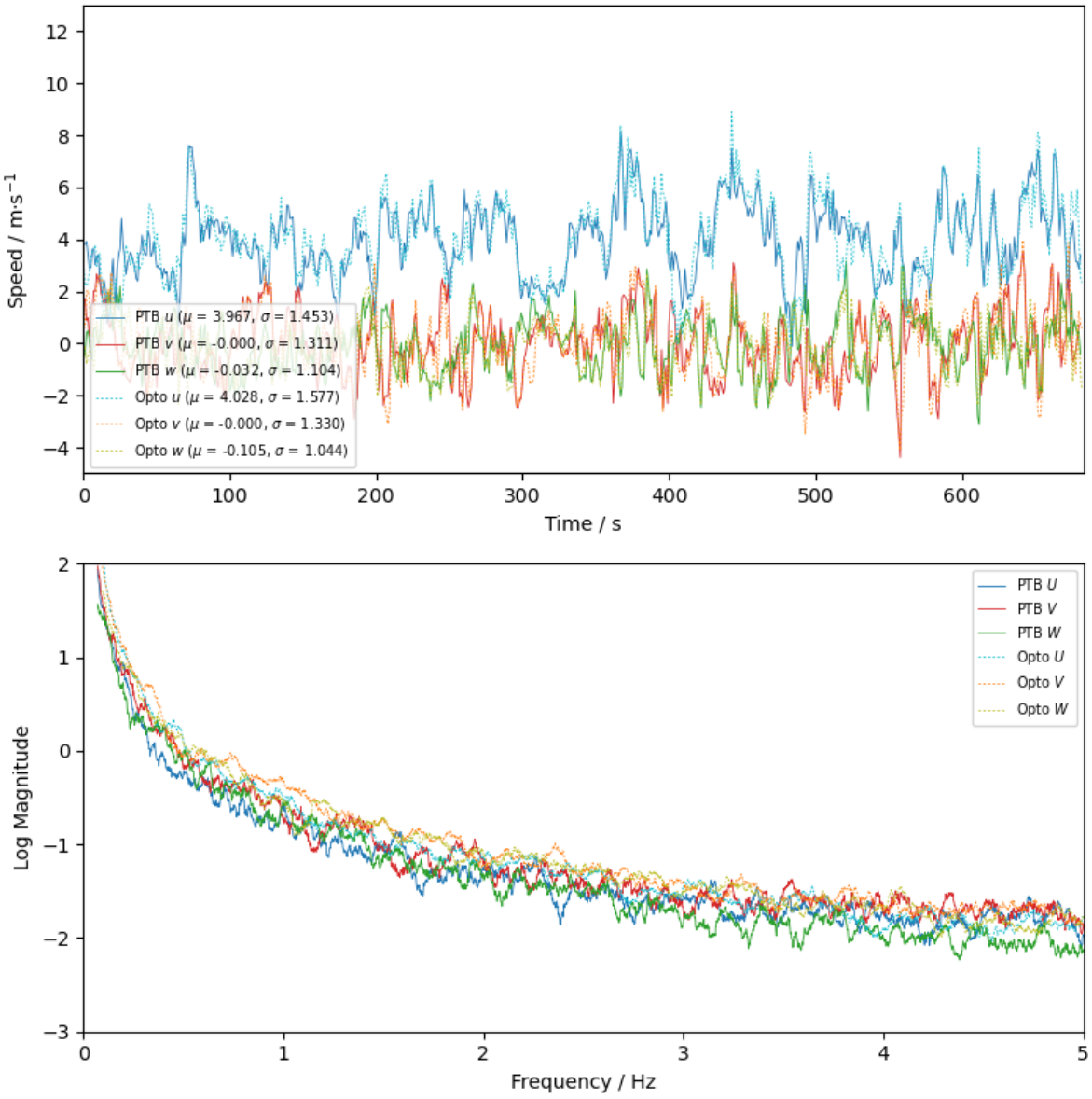


Abbildung 4: Darstellung der Windgeschwindigkeitskomponenten beider Systeme als Zeitreihe mit einer Auflösung von 1 s (oben, *u*, *v*, *w*) und als Spektrum (unten, *U*, *V*, *W*) für die Messung in 30 m Höhe (*OPTOkopter* im *schwebenden* Flugmodus).

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

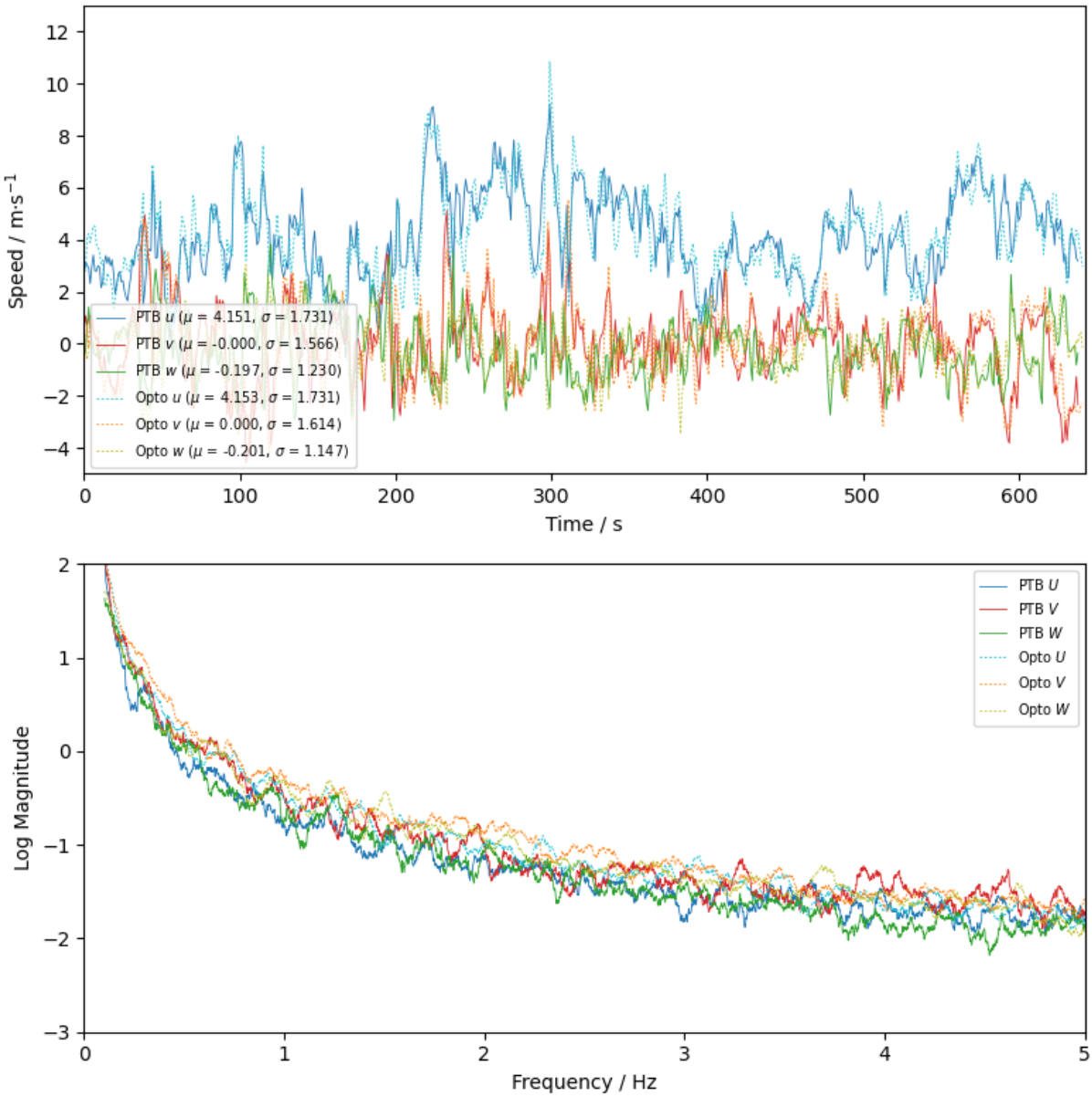
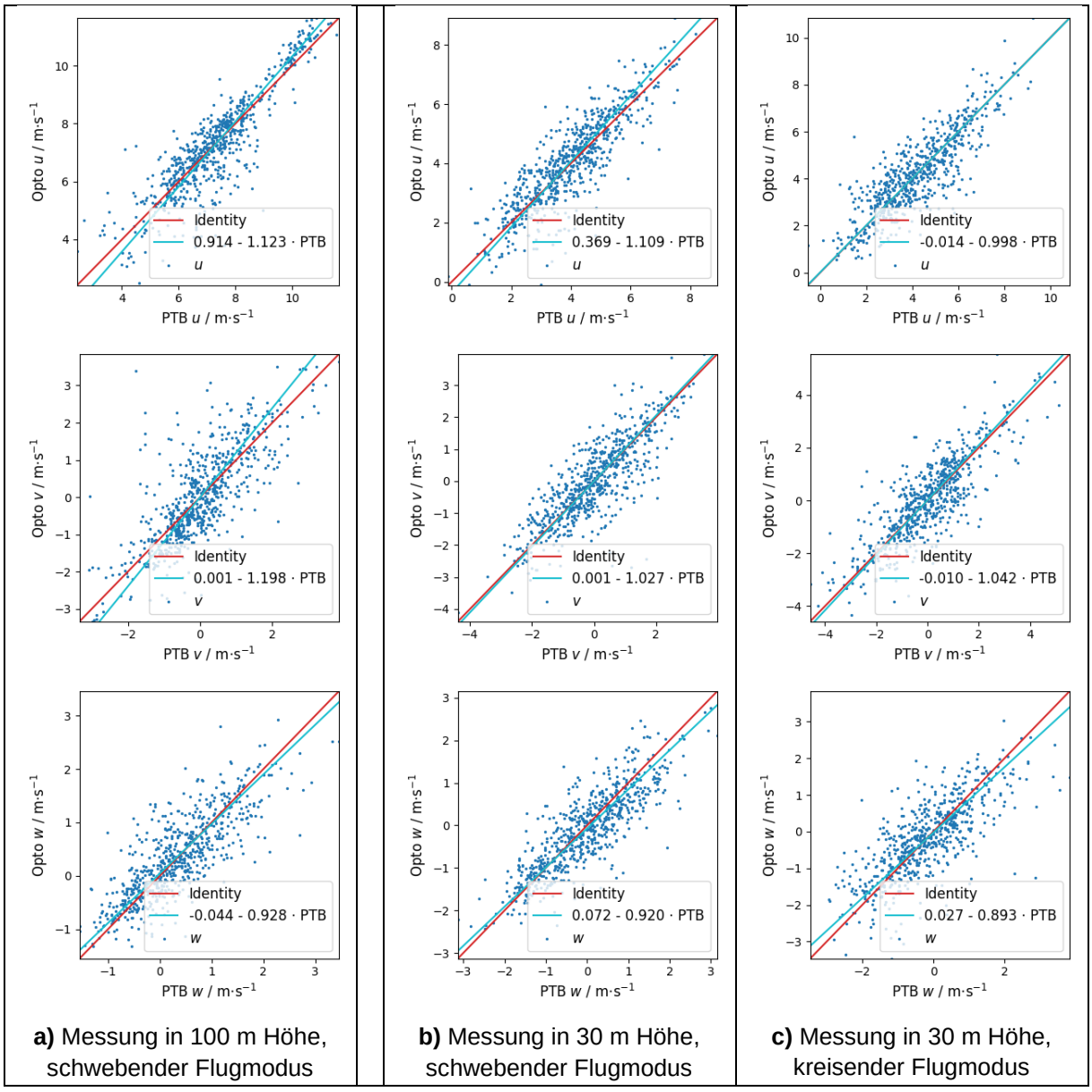


Abbildung 5: Darstellung der Windgeschwindigkeitskomponenten beider Systeme als Zeitreihe mit einer Auflösung von 1 s (oben, *u*, *v*, *w*) und als Spektrum (unten, *U*, *V*, *W*) für die Messung in 30 m Höhe (*OPTOkopter* im *kreisenden* Flugmodus).

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1



a) Messung in 100 m Höhe, schwebender Flugmodus

b) Messung in 30 m Höhe, schwebender Flugmodus

c) Messung in 30 m Höhe, kreisender Flugmodus

Abbildung 6: Streudiagramme und Ergebnisse der orthogonalen Regressionen zwischen PTB-Lidar und *OPTOkopter* für jede Messung (**a)**, **b)**, **c)**) und jede Komponente (*u*, *v*, *w*).

Tabelle 1: Korrelationskoeffizienten und Standardfehler der orthogonalen Regression zwischen PTB-Lidar und *OPTOkopter* für jede Messung und Komponente.

Komponente	Messhöhe, Flugmodus		
	a) 100 m, schwebend	b) 30 m, schwebend	c) 30 m, kreisend
u	R = 0,883 s = 0,147 m·s^{-1}	R = 0,860 s = 0,153 m·s^{-1}	R = 0,840 s = 0,153 m·s^{-1}
v	R = 0,756 s = 0,186 m·s^{-1}	R = 0,821 s = 0,157 m·s^{-1}	R = 0,821 s = 0,161 m·s^{-1}
w	R = 0,803 s = 0,154 m·s^{-1}	R = 0,839 s = 0,145 m·s^{-1}	R = 0,741 s = 0,165 m·s^{-1}

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die beiden untersuchten Systeme (PTB-Lidar und *OPTOkopter*) sind aufgrund der unterschiedlichen Positionen der Messvolumina und der deutlich gestörten Strömung über bebautem Gebiet nur eingeschränkt vergleichbar, sodass in diesem Zusammenhang keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden können. Trotz der gebotenen Vorsicht bei der Bewertung der Ergebnisse lässt sich für diese Vergleichsmessung jedoch eine gute Übereinstimmung zwischen den von beiden Systemen erfassten Windgeschwindigkeiten konstatieren, sofern dabei gleichermaßen die signifikanten Unterschiede in Funktionsweise und Einsatzgebiet beider Systeme berücksichtigt werden.

In der qualitativen Untersuchung der Signalspektren weist das PTB-Lidar gegenüber dem *OPTOkopter* in vertikaler Windrichtung (*w*-Komponente) ein niedrigeres Rauschen auf, welches insbesondere bei der in größerer Messhöhe vorliegenden niedrigeren Turbulenz sichtbar wird. Die quantitative Untersuchung der Messergebnisse ergibt Korrelationskoeffizienten im Bereich R = 0,741…0,883 und mittlere Standardfehler der orthogonalen Regression im Bereich s = 0,145…0,186 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Zwischen dem kreisenden und dem schwebenden Flugmodus der Drohne lässt sich anhand der vorliegenden Messdaten kein signifikanter Unterschied erkennen, was auf eine effektive Eigengeschwindigkeits- und Eigenschwingungskompensation seitens des *OPTOkopters* schließen lässt.

Zukünftig könnte die Repräsentativität des Vergleichs durch weitere, detailliertere Vergleichsmessungen zwischen dem PTB-Lidar und dem *OPTOkopter* noch erhöht werden. So könnten beispielsweise in ungestörter Strömung über flachem Gelände Einflüsse der Eigengeschwindigkeit präziser charakterisiert werden.

5. Literaturverzeichnis

[1] S. Oertel, M. Eggert, C. Gutsmuths, P. Wilhelm, H. Müller und H. Többen, „Bistatic wind lidar system for traceable wind vector measurements with high spatial and temporal resolution," in *FLOMEKO 2019 - 18th International Flow Measurement Conference*, 2019.

[2] M. Eggert, J. Tambke, C. Gutsmuths, S. Oertel, P. Wilhelm, H. Müller und M. Mauder, „Vergleich des bistatischen Doppler-Lidars der PTB und eines Ultraschall-Anemometers zur Messung von Turbulenzspektren," *Proceedings der 27. GALA-Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik",* 2019.

[3] M. Mauder, M. Eggert, C. Gutsmuths, S. Oertel, P. Wilhelm, I. Voelksch, L. Wanner, J. Tambke und I. Bogoev, „Comparison of turbulence measurements by a CSAT3B sonic anemometer and a high-resolution bistatic Doppler lidar," *Atmos. Meas. Tech.,* 2020.

[4] W. Thielicke, W. Hübert, U. Müller, M. Eggert und P. Wilhelm, „Towards accurate and practical drone-based wind measurements with an ultrasonic anemometer," *Atmos. Meas. Tech.,* 2021.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1