

## **Untersuchungen zur Vergleichbarkeit von instantanen Strömungsgeschwindigkeitsmessungen des bistatischen Doppler-Lidars der PTB und trägheitsbehafteten Messungen eines Schalensternanemometers**

**Investigations on the comparability of the instantaneous fluid flow velocity measurements of PTB's bistatic Doppler lidar and the measurements of a cup anemometer, influenced by inertia**

**M. Eggert, C. Gutschmuths, S. Oertel, H. Müller, H. Többen**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland

Schlagworte: Wind-Lidar, bistatisch, zeitaufgelöst, Schalensternanemometer

Key words: Wind-Lidar, bistatic, time resolved, cup anemometer, overspeeding

### **Kurzfassung**

Der Einsatz des von der PTB als TransfERNormal 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.

Vergleichsmessungen mit einem auf der Spitze eines 135 m hohen Messmasten montierten, kalibrierten Schalensternanemometers zeigten in einer mehrtägigen Messkampagne über einen großen Geschwindigkeitsbereich Abweichungen unterhalb von 0,5 %. Gerade in zeitaufgelösten Messungen jedoch war zu den Extremwerten des aufgenommenen Geschwindigkeitsbereichs hin ein deutlicher Anstieg der Abweichungen zu verzeichnen.

In umfangreichen Untersuchungen der Messergebnisse wie auch in mathematischen Simulationen haben sich Abweichungen in den Zeitbasen beider Messsysteme, ihr unterschiedliches dynamisches Verhalten und die begrenzte Korrelation der an unterschiedlichen Orten aufgenommenen Geschwindigkeiten als Hauptursachen dieser Abweichungen herausgestellt.

## Einleitung

Ein bistatisches Wind-Lidar-System mit räumlich vom Sender getrennten Empfängern besitzt ein durch die Geometrie des Aufbaus örtlich aufgelöstes Messvolumen. Hierzu werden Sender und Empfänger in ein- und denselben Ort fokussiert, 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 wie bei einem 3-Komponenten-Referenzstrahl-LDA in Rückstreurichtung 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. Im Gegensatz zu kommerziell erhältlichen, monostatischen Wind-Lidar-Systemen ist ein derartiges System damit auch für zeit-aufgelöste Messungen inhomogener Strömungsverhältnisse geeignet.

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.1: Prinzip und Aufbau des bistatischen Wind-Lidar-Systems der PTB

## Durchführung und Auswertung der Vergleichsmessungen

Nach erfolgreichen Tests auf dem Gelände der PTB wurden Vergleichsmessungen mit einem 135 m hohen Windmessmasten auf dem Auricher Testfeld der Deutsche WindGuard Consulting GmbH durchgeführt (Eggert 2016). Im Folgenden wird hauptsächlich der Vergleich mit dem an der Mastspitze montierten Anemometer betrachtet, bei dem das Messvolumen des Lidars etwa 2 m vor dem Anemometer platziert wurde.

Die Messergebnisse wurden sowohl entsprechend der Norm IEC 61400-12-1 unter Verwendung von 10-Minuten-Mittelwerten ausgewertet, als auch unter Betrachtung der Rohdaten mit 1 s Zeitauflösung. In beiden Fällen wurden die von Lidar und Messmast ermittelten horizontalen Geschwindigkeiten zunächst synchronisiert. Anschließend wurden die gemessenen Geschwindigkeiten, wahlweise gemittelt oder zeitaufgelöst, paarweise in Segmente von 0,5 m/s gruppiert, wobei vorerst die vom Schalensternanemometer gemessenen Geschwindigkeiten als Referenz dienten. Innerhalb dieser Segmente wurden dann die Mittelwerte der Strömungsgeschwindigkeiten miteinander verglichen (Eggert 2016). Während die Abweichungen im mittleren Geschwindigkeitsbereich unter 0,5 % lagen, war zu den Randbereichen hin ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen.



Abb. 2: Einsatz des PTB-Lidars am Windmessmasten

Aufgrund der Vermutung, dass eine mangelhafte zeitliche Zuordnung zwischen beiden Messungen solche Randeffekte verursachen könnte, wurden die Messwerte von Lidar und Schalensternanemometer anschließend nicht mehr im Block über die gesamte Messdauer, sondern in Segmenten von 10 Minuten per Korrelation zueinander synchronisiert. Das überraschende Ergebnis ist in Abbildung 3 dargestellt: Über die Dauer der gesamten Messkampagne, mit abwechselnden Vergleichsmessungen zu zwei Anemometern auf unterschiedlichen Höhen, laufen anscheinend die Uhren von Lidar und Mast deutlich auseinander. Alleine die gelegentliche, hauptsächlich beim Neustart des Systems durchgeführte Synchronisation der PC-Uhr des Lidar-Systems mit einem Zeitserver begrenzt den Versatz auf unter 5 Sekunden. Mit einer adaptiven Synchronisierung der Messdaten in Segmenten von 10 Minuten konnte die Abweichung in den Randbereichen der Messung bereits deutlich reduziert werden, wie in Abbildung 4 gezeigt wird.

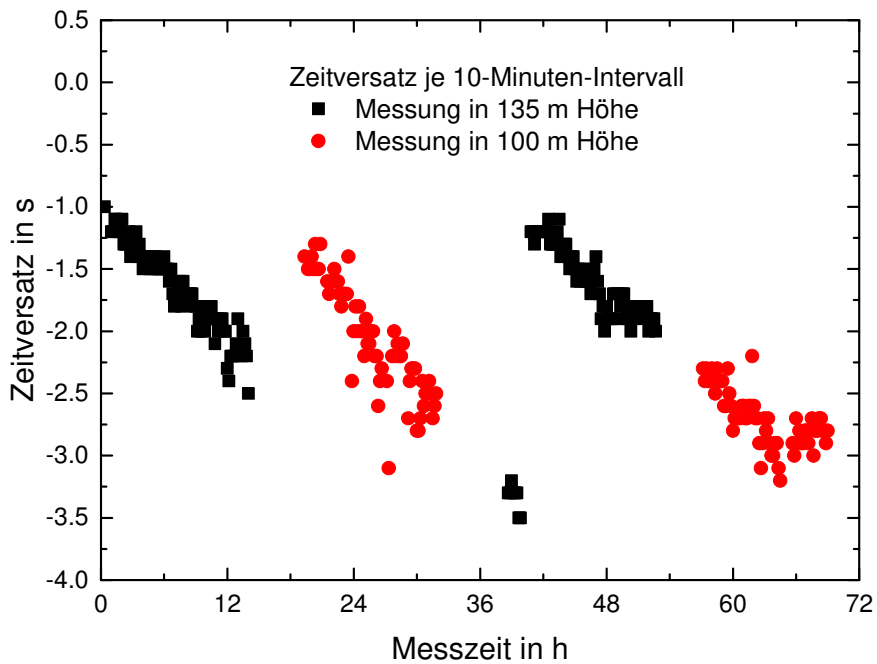


Abb. 3: Zeitversatz zwischen den von Lidar und Messmast aufgenommenen Geschwindigkeiten

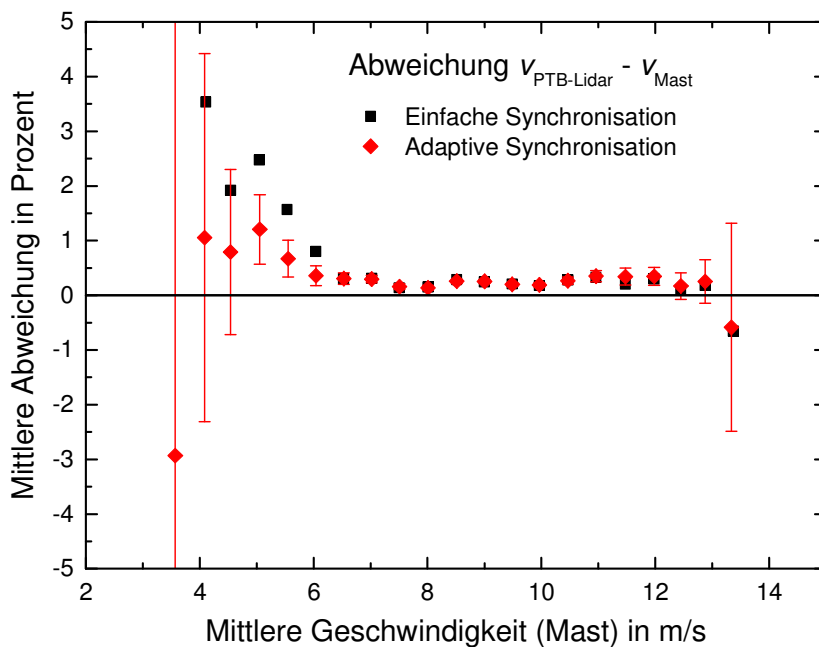


Abb. 4: Auswertung der Vergleichsmessung mit unterschiedlicher Synchronisierung der Messdaten bei 135 m Messhöhe und 1 s Zeitauflösung. Referenz ist das Schalensternanemometer.

## Vergleichbarkeit der Messungen bei unterschiedlicher Dynamik

Eine weitere Ursache für die Abweichungen besonders im Randbereich der Geschwindigkeiten könnte im unterschiedlichen dynamischen Verhalten des instantan messenden Lidar-Systems und des trägheitsbehafteten Schalensternanemometers begründet sein.

Für Schalensternanemometer wird in der Literatur die vereinfachte Bewegungsgleichung

$$\frac{d\omega}{dt} = K_1 \cdot v^2 - K_2 \cdot v \cdot \omega$$

angegeben mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  und der Anströmgeschwindigkeit  $v$ .

Anemometerspezifisch ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor  $K_1/K_2$  und eine sogenannte Wegkonstante  $1/K_2$ , welche die Länge der Luftsäule beschreibt, die das Anemometer passieren muss, um es auf  $1/e$  seiner Drehzahl im Gleichgewichtszustand zu beschleunigen (Westermann 1996).

Dieses nichtlineare Verhalten führt zu dem in der Literatur als Overspeeding bezeichneten Effekt, bei dem das Anemometer steigenden Windgeschwindigkeiten schneller folgt als fallenden, also schneller beschleunigt als abbremst, und damit im natürlichen Wind zu hohe Mittelwerte anzeigt. In ungestörter Strömung jedoch, wie sie hier vorliegt, beläuft sich der Fehler auf höchstens 1 ‰ und ist damit um eine Größenordnung geringer als der hier betrachtete Effekt in den Randbereichen.

Um den Einfluss dieses Tiefpassverhaltens auf die Messergebnisse isoliert betrachten zu können, wurden in Simulationen die real gemessenen Geschwindigkeiten des Schalensternanemometers ersetzt durch entsprechend der Bewegungsgleichung mit der Wegkonstanten  $1/K_2 = 3 \text{ m}$  und Proportionalitätsfaktor  $K_1/K_2 = 1$  prozessierten Daten des Lidars. Es wurden also die Daten des Lidars einmal direkt und einmal tiefpassgefiltert gegeneinander in der oben beschriebenen Messauswertung verglichen.

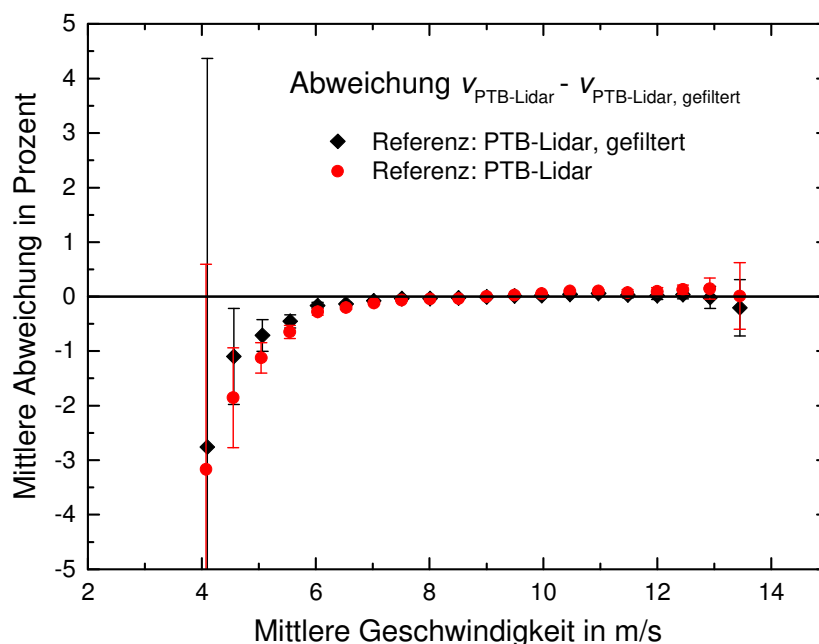


Abb. 5: Auswertung der Daten mit simuliertem Verhalten des Schalensternanemometers

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 5 dargestellt. Sie zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die Messergebnisse, jedoch mit umgekehrten Vorzeichen. Das bedeutet, wenn die Extremwerte der betrachteten Geschwindigkeiten bei natürlich vorkommenden Windverhältnissen lokale Minima bzw. Maxima darstellen, dann würde ein trägheitsbehaftetes Anemometer diese niemals erreichen können, und damit niedrige Extremwerte systematisch zu hoch anzeigen. So wird in Abbildung 5 deutlich, dass – unabhängig davon, ob die Einordnung eines Messwertpaares anhand der gefilterten oder anhand der ungefilterten Daten als Referenzwert in ein Geschwindigkeitssegment einsortiert werden – die ungefilterte gegenüber der gefilterten Geschwindigkeit als zu niedrig angenommen wird.

### Vergleichbarkeit der Messungen an unterschiedlichen Orten

Ein weiterer möglicher Unsicherheitsbeitrag offenbart sich, wenn auch in der Auswertung der aufgenommenen Messwerte die Rolle der Referenz getauscht wird, nach der die Messwertpaare in Geschwindigkeitssegmente einsortiert werden.

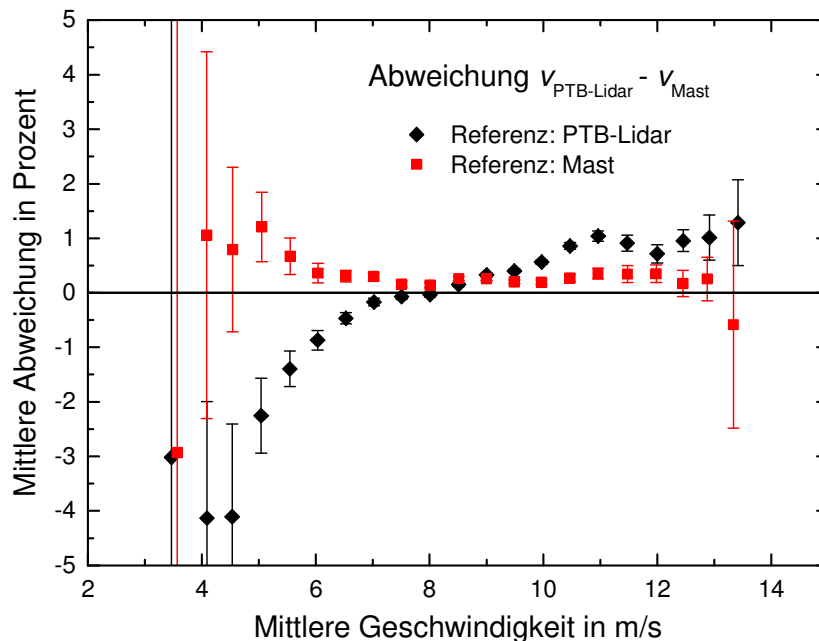


Abb. 6: Auswertung der Vergleichsmessung bei 135 m Messhöhe und 1 s Zeitauflösung. Referenz ist das Schalensternanemometer.

Wie aus Abbildung 6 ersichtlich wird, werden dem PTB-Lidar im Bereich niedriger Geschwindigkeiten rein abhängig von der Auswertung einmal zu hohe, einmal zu niedrige Messwerte zugeschrieben. Diese Tatsache könnte so zu interpretieren sein, dass sich die im natürlichen Wind vorkommenden lokalen Extrema zwar von beiden Messgeräten erfasst werden, sich diese jedoch zeitlich nicht perfekt überlagern, so dass letztendlich dem Minimum der mit dem jeweils als Referenz genutzten Messgerät erfassten Geschwindigkeit zwangsweise eine höhere gemessene Geschwindigkeit des anderen Messgeräts gegenübersteht.

Als Ursache für diesen Effekt käme in Betracht, dass die Synchronisation beider Messreihen anhand der Korrelation nicht für den gesamten Geschwindigkeitsbereich gleich gut passt. Ebenso könnten die Ergebnisse aber auch ein Hinweis darauf sein, dass sich die Strömungsgeschwindigkeiten auch in ungestörtem, natürlich vorkommendem Wind bereits bei einem Abstand von etwa 2 m zwischen zwei Messorten derart voneinander unterscheiden, dass sie nur noch bedingt zueinander korreliert sind.

## Zusammenfassung

Während für gemittelte Geschwindigkeiten eine gute Übereinstimmung über den gesamten Geschwindigkeitsbereich zu verzeichnen war (Eggert 2016), sind in Messungen mit 1 s Zeitauflösung Abweichungen von über 1 % in den Randbereichen der über die Messdauer von insgesamt 24 Stunden aufgenommenen Geschwindigkeiten aufgetreten.

Nachdem die Effekte nicht synchron laufender Systemuhren eliminiert werden konnten, kommen als Ursachen der verbleibenden Messabweichungen das unterschiedliche dynamische Verhalten beider Messsysteme wie auch der Abstand der Messorte bzw. die auch in flachem Gelände auftretenden Turbulenzen des natürlichen Windes in Betracht. Während sich jeder der beiden Effekte im mittleren gemessenen Geschwindigkeitsbereich überwiegend herausmittelt, so fällt er doch im Randbereich der aufgenommenen Geschwindigkeiten deutlich auf.

Vergleichende Windmessungen mit Zeitauflösungen im Sekundenbereich sind folglich äußerst kritisch zu bewerten, wobei die Art des Vergleichs in der Auswertung einen signifikanten Anteil am Ergebnis besitzt.

## Literatur

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

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

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

Westermann D., 1996: „Overspeeding - über das eigentümliche Tiefpaßverhalten von Schalensternanemometern“, DEWI Magazin Nr. 9, 56-63