

Beilage zur Berliner Wetterkarte

Herausgegeben vom Verein BERLINER WETTERKARTE e.V.
zur Förderung der meteorologischen Wissenschaft

c/o Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin, Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10, 12165 Berlin

47/17

<http://www.berliner-wetterkarte.de>

ISSN 0177-3984

BM 01/17

01.09.2017

Evaluation von Windmessungen mit Radar und Lidar am Flughafen München

Julia Sieland (Institut für Meteorologie, FU Berlin)

Betreuung durch Dr. Martin Hagen (DLR Oberpfaffenhofen)

Einleitung

Bereits in der Antike waren sich die Menschen der Wandelbarkeit des Windes bewusst. Die Kenntnisse waren geprägt durch die windbedingten Phänomene und Wetterentwicklungen. Heutzutage sind die Windcharakteristika verstanden und erforscht, jedoch ohne dass der Wind seinen Einfluss auf den Menschen verloren hat. Besonders vulnerabel ist der Luftverkehr. Nicht nur in Bezug auf mögliche Unfälle oder Schäden durch starke Böen, auch für den täglichen Ablauf sind die Windverhältnisse ausschlaggebend. So können ungeeignete Winde zu Verzögerungen im zeitlichen Ablauf von Start und Landung führen. Zur Prävention ist es daher wünschenswert, kritische Windverhältnisse und potentiell gefährliche Wetterlagen zu identifizieren.

Theoretische Grundlagen: Windcharakteristik und Methoden der Fernerkundung

Unter dem Begriff „Wind“ versteht man allgemein die Verlagerung von Luftteilchen unter Angabe von Geschwindigkeit und Richtung. Ursache des Windes sind horizontale Luftdruckunterschiede. Infolge der Rauigkeit der Erdoberfläche stellt der Wind ein turbulentes Medium dar (Klose, 2016). Die eigentliche Grundströmung ergibt sich erst durch die zeitliche Mittelung (Malberg, 2007). Daneben beeinflusst die thermische Schichtung der Atmosphäre den Tagesgang der Windgeschwindigkeit. Zusätzlich erfolgt mit steigender Höhe in der Prandtl-Schicht eine Geschwindigkeitszunahme infolge abnehmender Reibungseinflüsse und nachfolgend in der Ekman-Schicht eine merkliche Richtungsänderung. In Bodennähe existiert ein Geschwindigkeitsmaximum kurz nach Sonnenhöchststand und -minimum in der Nacht. In höheren Lagen tritt ähnlich wie in der freien Atmosphäre ein inverser Gang der Windgeschwindigkeit auf. Außerdem ist die Amplitude des Tagesgangs im Sommer geringer als im Winter (Klose, 2016).

Eine Möglichkeit zur großräumigen, dreidimensionalen Windmessung bieten Radar und Lidar. Die Messung basiert auf dem Aussenden und Empfangen eines von atmosphärischen Teilchen zurückgestreuten Signals. Unter Ausnutzung des Doppler-Effektes lässt sich die Radialkomponente der Teilchenbewegung relativ zum Gerät direkt und sehr genau bestimmen (Hossein und Amindavar, 2012). Die Streuung hängt von der Wellenlänge ab und je nach Geräteeinstellung lassen sich unterschiedliche Teilchen detektieren (weiteres siehe Petty (2006)). Die Messungen von Radar und Lidar bewegen sich dabei im sogenannten Raleigh-Regime, da die Zielobjekte verhältnismäßig klein zur verwendeten Wellenlänge sind.

Das Lidar verwendet zur Messung Laserimpulse und ist somit geeignet, kleine Teilchen, z.B. Aerosole, zu registrieren (Grund et al., 2001). Ein verwandtes, jedoch schon länger operationell genutztes Verfahren ist das Radar. Hierbei werden Funkwellen genutzt und daher bevorzugt Niederschlag detektiert. Das aktuelle Wetter und ggf. damit verbundene Teilchen beeinflussen somit entscheidend die Messungen der beiden Geräte. Hinzu kommt, dass einzelne Wetterlagen mit bestimmten Windverhältnissen einhergehen, welche z.B. bei Gewitter schwere Folgen für den Luftverkehr haben können. Aber auch windschwache Situationen, beispielsweise mit Nebel, können Gefahren mit sich bringen, wenn die Sicht gering ist.

Methodik: Geräteparameter und Single-Doppler-Verfahren sowie weitere Daten

Zur Auswertung stehen Daten eines polarimetrischen X-Band-Wetterradars ($\lambda=3,189\text{cm}$) und eines WindTracer Doppler-Lidars ($\lambda=1,617\mu\text{m}$) vom Flughafen München zur Verfügung. Die Geräte werden vom Deutschen Wetterdienst im Rahmen des Projektes ITWS/LLWAS betrieben. Mit der Software Rainbow^{®5} von Selex Geratronik wurden die single-Doppler Verfahren „Volume Velocity Display (VVP)“ nach Waldteufel und Corbin (1979) und das sogenannte „Horizontal Wind (HWIND)“ generiert. Mit einem (single) Gerät wird das 3D-Windfeld über die Messung der Dopplergeschwindigkeit bestimmt. Der Vorteil

des 3D-Vektorfeldes ist, dass die charakteristischen Signaturen des Windvektors deutlicher hervortreten (Friedrich und Hagen, 1999). Gemeinsam haben beide Verfahren die Annahme, dass das Windfeld konstant ist. Sie unterscheiden sich darin, dass das VVP ein über dem Gerätestandort gemitteltes Produkt mit vertikaler Auflösung ist und das HWIND eine horizontale Fläche in einer Levelhöhe von 1 km abdeckt.

Die Ableitung des Windfeldes erfolgt mittels Regression. Dabei nutzt das HWIND die Methode der kleinsten Quadrate (Least Squares) wie bei Browning und Wexler (1968), das VVP dagegen die etwas robustere Singular Value Decomposition (siehe dazu Press (2002) und Boccippio (1995)). Beide Verfahren besitzen im Rainbow[®]5 implementierte Qualitätskontrollen, nach denen eine Kategorisierung in „verlässlich“ oder „nicht verlässlich“ erfolgt. Die Analyse konzentriert sich auf die Anzahl verlässlicher Werte der horizontalen Windgeschwindigkeit und -richtung, der Standardabweichung der Geschwindigkeit sowie der Anzahl der Datenpunkte, die in die Regression eingehen

Die Werte des horizontalen Windvektors von Radar und Lidar werden mit den Daten von Beobachtungen (SYNOP und METAR) der Station Flughafen München (WMO 10870), der Radiosonde Oberschleißheim (WMO 10868) und Daten des Mode-S (Sekundärradar) verglichen. Der Analysezeitraum umfasst Juli bis einschließlich Dezember 2013.

Das aktuelle Wetter spielt für die Analyse eine wesentliche Rolle, da es Rückschlüsse auf die Teilchen und deren Größe ermöglicht. Anhand des jeweiligen Wetterzustandes werden Charakteristika der Geräte analysiert. Grundlage hierbei ist der zum Beobachtungszeitpunkt gemeldete Wetterzustand in Synop-Code (ww 00-99). Die Wettermeldung von METAR wird dazu entsprechend umgeschrieben.

Ergebnisse: Auswirkungen des Wetterzustandes

Im Vorfeld wird untersucht, wie sich die Verlässlichkeit bei verschiedenen Wettersituationen darstellt. Dies dient der Einschätzung, ob vertrauenswürdige Windvektoren zu erwarten sind. Im zweiten Halbjahr 2013 wurde meist Bewölkungsentwicklung gemeldet, gefolgt von Dunst/(Boden-)Nebel und flüssigem Niederschlag. In Abb. 1 ist die Datenverlässlichkeit für die häufigsten Wettergruppen dargestellt. Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass das Lidar bei Bewölkung und das Radar bei Regen am besten geeignet ist. Dunst/Nebel wirkt sich negativ auf beide Geräte aus, wobei das Lidar weniger stark beeinflusst wird als das Radar. Beide Geräte können die hier auftretenden Teilchengrößen nur ungenügend erfassen. Insgesamt liefert das HWIND meist eine höhere Verlässlichkeit als das VVP, qualitativ reagieren beide Produkte aber gleich. Der Einfluss des Teilchenradius zeigt sich beim Vergleich von Sprühregen und Regen. Das

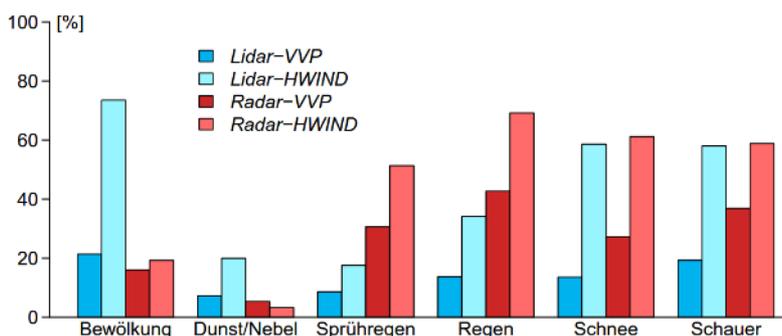


Abb. 1: Datenverlässlichkeit der Gerät-Produktkombination, zusammengefasst für verschiedene Wettergruppen (nach Synop-ww), Juli bis Dezember 2013, ohne Trockenereignisse und Gewitter (geringe Datenmenge)

sich erwartungsgemäß, dass das Lidar bei Bewölkung und das Radar bei Regen am besten geeignet ist. Dunst/Nebel wirkt sich negativ auf beide Geräte aus, wobei das Lidar weniger stark beeinflusst wird als das Radar. Beide Geräte können die hier auftretenden Teilchengrößen nur ungenügend erfassen. Insgesamt liefert das HWIND meist eine höhere Verlässlichkeit als das VVP, qualitativ reagieren beide Produkte aber gleich. Der Einfluss des Teilchenradius zeigt sich beim Vergleich von Sprühregen und Regen. Das

Radar profitiert von den größeren Tropfen. Gleichzeitig ist aber auch eine höhere Vielzahl kleinerer Tröpfchen vorhanden, wodurch das Lidar ebenfalls etwas höhere Werte als bei Sprühregen erreicht. Bei der Schauergruppe wirkt sich die meist kurze Dauer positiv auf das Lidar aus, daher gleichen sich die Werte der Geräte stärker an als bei stratiformem Niederschlag. Darüber hinaus sind die Werte der Schauer stark durch Schneeschauer geprägt. Dies erklärt auch die starke Ähnlichkeit der Schauer- und Schneegruppe. Ursächlich dafür ist der Orkan XAVER

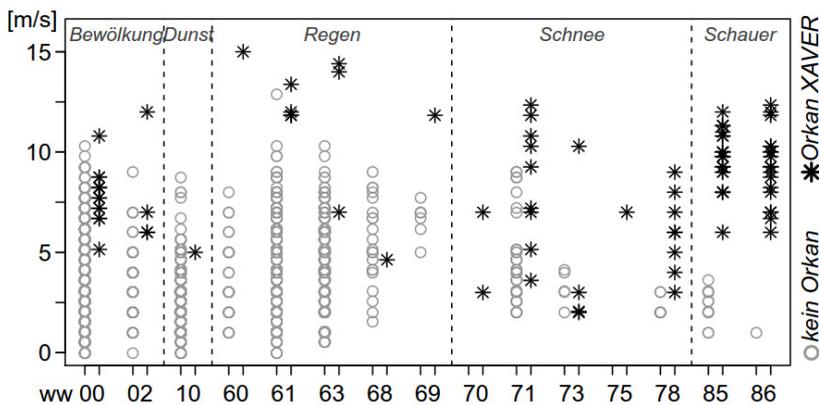


Abb. 2: Windgeschwindigkeit an der Station Flughafen-München (WMO 10870) für Wetterzustände während des Orkans XAVER (05.-07.12.) im Vergleich zu den Meldungen ohne Orkaneeinfluss

Anfang Dezember 2013. Aus der Betrachtung der Windgeschwindigkeit in Abb. 2 geht hervor, dass diese beiden Gruppen und Schneeschauer insbesondere durch den Orkan beeinflusst werden. Daher sind diese Ergebnisse nicht allgemein gültig, zeigen aber gut die Auswirkungen eines solchen Einzelereignisses. Bei

der Windrichtung tritt der Orkaneinfluss kaum hervor, da der Wind während des Orkans XAVER ausschließlich aus West wehte. Dies entspricht ohnehin der Hauptwindrichtung.

Ergebnisse: Zeitliche Entwicklung des horizontalen Windvektors

In der Betrachtung nach Wetterzustand sind keine zeitlichen Entwicklungen der Verlässlichkeit und des Windvektors berücksichtigt. In der Praxis sind diese aber bedeutsam. Generell zeigt sich in Abb. 3 eine Abnahme der verlässlichen Datenmenge von Sommer zu Winter. Ursache dafür ist, dass die Sichtweite im

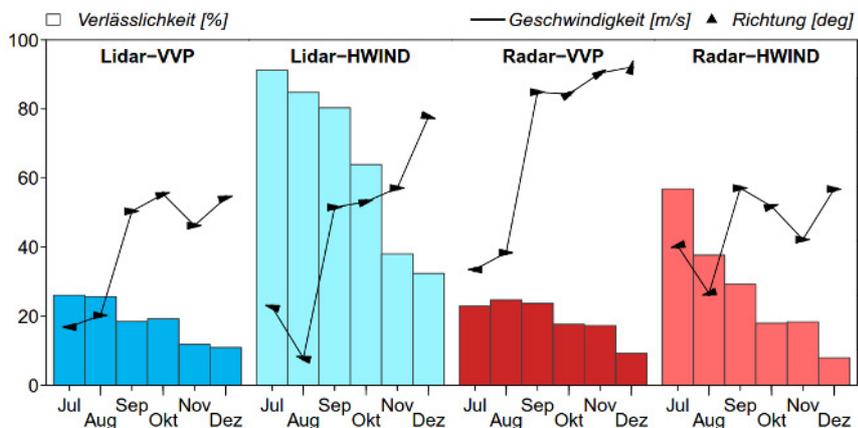


Abb. 3: Monatsmittel Verlässlichkeit und horizontaler Windvektor für Juli bis Dezember 2013

Winter allgemein geringer ist und häufiger Nebel oder Dunst auftritt, was sich negativ auf die Geräte auswirkt. Besonders betroffen sind die HWIND-Produkte. In der Auswertung von August und Dezember 2013 hat sich gezeigt, dass das HWIND prinzipiell eine große verlässliche Datenmenge aufweist, bei wetterbedingten Einschränkungen der Geräte die Werte aber stark

einbrechen. Das VVP erscheint dagegen wesentlich

robuster, hier stehen ggf. auch Daten aus größeren Höhen für die Ermittlung des Windvektors zur Verfügung. Das hat zur Folge, dass beim VVP nur vereinzelte Datenlücken auftreten, beim HWIND dagegen wesentlich häufiger. Eine schlechte Datengrundlage führt zu weniger vertrauenswürdigen Werten und starken Schwankungen beim horizontalen Windvektor. Dies und vermehrt signifikantes Wetter zeigt sich auch in einer höheren Windgeschwindigkeit zum Jahresende. Im Dezember ist der Orkan XAVER prägend, da in diesem Zeitraum

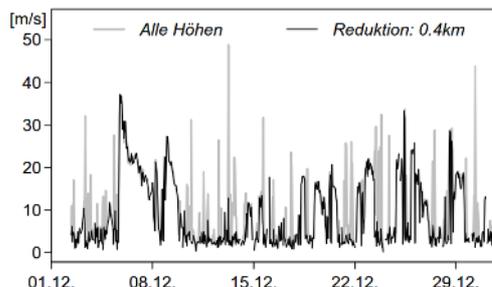


Abb. 4: Stundenmittel der Windgeschwindigkeit vom Radar-VVP im Dezember 2013 mit und ohne Reduktion der untersten Elevation

Ergebnisse: Validierung und Evaluation

Insgesamt zeigen Radar und Lidar für beide Verfahren die erwarteten Charakteristika aufgrund der Messgeometrie und auch die Erkenntnisse zu den einzelnen Wetterzuständen lassen sich im zeitlichen Verlauf erkennen. Eine Sonderstellung nimmt das Radar-VVP ein. Es liefert insbesondere im Dezember unrealistisch hohe Windgeschwindigkeiten, die nicht alleine durch die schlechte Datenlage erklärt werden können. Darüber hinaus betrifft dies nur die Geschwindigkeit, aber nicht die Richtung. Fast alle unrealistischen Werte stammen aus dem untersten VVP-Level (0,4 km Höhe) und können damit noch Bodeneffekte (Clutter) enthalten. Eine Reduktion dieser Elevation in Anlehnung an Holleman (2005) führt zu einer ähnlichen Verbesserung der Werte, wie in Abb. 4 dargestellt.

Abschließend erfolgt ein Abgleich mit Vergleichsdaten. Ein besonderer Aspekt ist hierbei der Tagesgang. Aus Abb. 5 wird deutlich, dass die Tagesgänge der Windgeschwindigkeit von Radar und Lidar invers zu denen der Beobachtungsdaten vom Flughafen München sind. Da Radar und Lidar erst ab einer Höhe von 0,4 km bzw. 0,6 km vertrauenswürdige Daten liefern, ist der resultierende Windvektor überwiegend vom Höhenwind geprägt. Dadurch erklären sich sowohl der inverse Verlauf als auch die höheren Geschwindigkeitswerte. Deutlich wird dies auch im Vergleich der beiden Verfahren. Das VVP besitzt eine wesentlich größere vertikale Auflösung, wodurch die Amplitude des Tagesgangs geringer ist als beim HWIND, welches auf eine Levelhöhe von 1 km eingegrenzt ist. Das entspricht den theoretischen Erwartungen. Darüber hinaus zeigt sich insbesondere beim HWIND ein signifikant inverser linearer Zusammenhang. Auch die Autokorrelationsfunktion (ACF) bestätigt die Erkenntnisse zum Tagesgang.

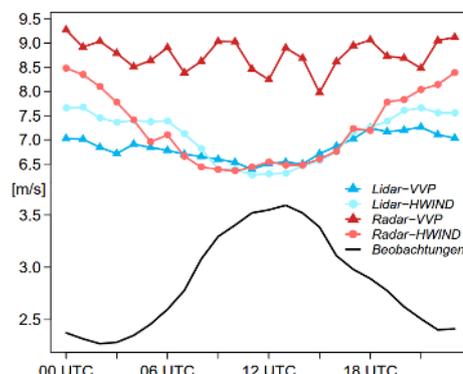


Abb. 5: Tagesgang der Windgeschwindigkeit von Radar, Lidar und den Beobachtungsdaten (WMO 10870)

Bei der Windrichtung ist es zunächst notwendig ein geeignetes Mittelungsintervall zu finden, um kurzfristige Schwankungen zu dämpfen, die grundlegende Strömung aber nicht übermäßig zu kompensieren. In einem Vergleich der Pearson Korrelation und dem angepassten Bestimmtheitsmaß ergibt sich bei Tagesmittelwerten eine gute bis sehr gute Übereinstimmung aller Gerät-Produktkombinationen mit den Beobachtungen. Auch bei der Windrichtung lässt sich ein Höheneinfluss feststellen. In den Histogrammen

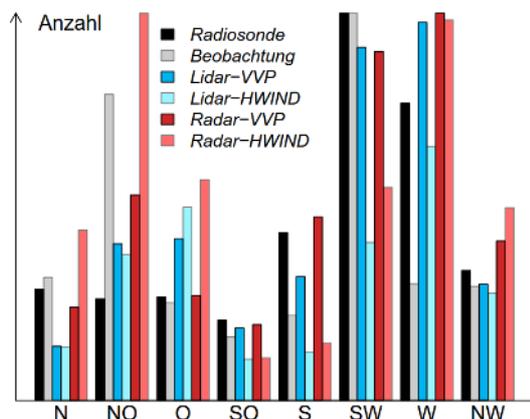


Abb. 6: Histogramme (qualitativ) der Windrichtung um 00 und 12UTC

(Abb. 6) existieren für die bodennahen Beobachtungen Maxima bei meridionalen Komponenten. Im Gegensatz dazu konzentrieren sich die Radiosondenwerte bei West als Hauptwindrichtung. Ursache hierfür ist die Annäherung an den geostrophischen Wind mit zunehmender Höhe. Radar und Lidar ordnen sich zwischen diesen beiden Ausprägungen ein. Beim VVP existiert ein wesentlich stärkerer Einfluss der Höhe, daher dominiert die westliche Komponente. Aufgrund der Levelhöhe des HWIND von 1 km, ist die Dipolstruktur annähernd gleichmäßig ausgebildet und ähnelt daher stärker den Beobachtungsdaten.

Die Auswirkungen von Datenpunkten aus größerer Höhe bestätigen sich auch in einem zusätzlichen Vergleich mit Mode-S Daten für ausgewählte Beispieltage.

Fazit

Wie erwartet wirkt sich Niederschlag positiv auf das Radar und negativ auf das Lidar aus. Nebel ist für beide Geräte kritisch. Im Vergleich von VVP und HWIND wird der Einfluss der Höhenkomponente deutlich. Die aus der Literatur erwarteten typischen Windmerkmale zeigen sich in den Daten. Die Übereinstimmung mit Vergleichsdaten im Rahmen der Erwartungen und auftretende Unterschiede können konsistent erklärt werden.

Literatur

- Boccippio, D.J., 1995: A Diagnostic Analysis of the VVP Single-Doppler Retrieval Technique [online]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 12(2), 230-248. ISSN 0739-0572.
- Browning, K.A. und R. Wexler, 1968: The Determination of Kinematic Properties of a Wind Field Using Doppler Radar [online]. *Journal of Applied Meteorology*, 7(1), 105-113. ISSN 0021-8952.
- Friedrich, K. und M. Hagen, 1999: On the use of advanced Doppler radar techniques to determine horizontal wind fields for operational weather surveillance [online]. *Meteorological Applications*, 11(2), 155-171. ISSN 1350-4827.
- Grund, C.J., R.M. Banta, J.L. George, J.N. Howell, M.J. Post, R.A. Richter und A.M. Weickmann, 2001: High-Resolution Doppler Lidar for Boundary Layer and Cloud Research [online]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(3), 376-393. ISSN 0739-0572.
- Holleman, I., 2005: Quality Control and Verification of Weather Radar Wind Profiles [online]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(10), 1541-1550. ISSN 0739-0572.
- Hosseini, M. und H. Amindavar, 2012: Doppler Radar Tracking Using Moments. In: E. Caetano, B. Méndez-Antonio und V. Magaña, Hg. *Use of Radar Precipitation Estimates in Urban Areas. A Case Study of Mexico City*: INTECH Open Access Publisher. ISBN 978-953-51-0496-4.
- Klose, B., 2016: *Meteorologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-43621-9.
- Malberg, H., 2007: *Meteorologie und Klimatologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-37219-6.
- Petty, G.W., 2006: *A first course in atmospheric radiation*. 2. ed. Madison, Wisc.: Sundog Publ. ISBN 9780972903318.
- Press, W.H., 2002: *Numerical recipes in C. The art of scientific computing*. 2. ed., reprinted with corr. to software version 2.10. Cambridge: Univ. Press. ISBN 0-521-43108-5.
- Waldteufel, P. und H. Corbin, 1979: On the Analysis of Single-Doppler Radar Data [online]. *Journal of Applied Meteorology*, 18(4), 532-542. ISSN 0021-8952.

Die vollständige Arbeit wurde im Juni 2017 als Master-Abschluss am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin vorgelegt.