

WINDMESSUNGEN MIT DOPPLER-LIDAR IN DER ATMOSPHERISCHEN GRENZSCHICHT

DOPPLER-LIDAR WIND MEASUREMENTS WITHIN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

Andreas Wieser, Katja Trümner, Kathrin Arnold

Institut für Meteorologie und Klimaforschung
KIT Karlsruhe Institute of Technology
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
Germany
E-Mail: andreas.wieser@imk.fzk.de

Lidar Doppler Grenzschicht Atmosphäre Wind Aerosol Konvektion Wind Turbulenz

Lidar Doppler Planetary Boundary Layer Aerosol Convection Wind Turbulence

Zusammenfassung

Das 2µm Doppler-Lidar „WindTracer“ ermöglicht räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Messungen des Windfelds über Gebietsgrößen von vielen Quadratkilometern mit hoher Genauigkeit. Eine Auswahl von Messergebnissen macht die Leistungsfähigkeit des Geräts und die daraus resultierenden Möglichkeiten zur Beobachtung von Strömungsvorgängen am Beispiel eines Wintersturms und einer Seewindfront sowie anhand von Messungen zur Turbulenzstruktur in der konvektiven atmosphärischen Grenzschicht auf eindrucksvolle Weise deutlich.

Einleitung

Die Messung des Windes mittels Laserstrahlung ist mittlerweile zu einem äußerst leistungsfähigen Messverfahren in der Meteorologie entwickelt worden. Mit der Verfügbarkeit leistungsstarker Laser Anfang der 1980er Jahre wurde an der Universität Karlsruhe ein LDA System mit einem Ar-ion Laser bei einer Wellenlänge von 514 nm zur Messung der Querswindkomponente bis zu einer Entfernung von über 100 m aufgebaut (Durst et al., 1982). Bei der amerikanischen NOAA wurde etwa zeitgleich ein scannendes Doppler-Lidar, das mit einem gepulsten CO₂-Laser bei 10 µm die axiale Windgeschwindigkeit messen kann, entwickelt. Diese Geräte füllten noch komplette LKW bzw. Container und konnten nur unter ständiger Überwachung über Zeiträume von wenigen Tagen betrieben werden (Post und Cupp, 1990; Mayor et al., 1997). Mit der Verfügbarkeit von Feststofflasern im Wellenlängenbereich um 2 µm Anfang der 1990er Jahre wurde ebenfalls von NOAA die Entwicklung eines neuen High Resolution Doppler Lidar (HDLR), (Grund et al., 2001) betrieben. Dieses Gerät ist augensicher und bietet eine wesentlich höhere räumliche wie zeitliche Auflösung bei gleichzeitig höherer Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit. Seit Sommer 2004 verfügt das Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) des KIT über ein zum HDLR bauähnliches Gerät vom Typ „WindTracer“ der Firma Lockheed Martin Coherent Technologies, mit dem Windfelder mit ca. 75 m Auflösung in Strahlrichtung über Gebietsgrößen von vielen Quadratkilometern gemessen werden können. Spezielle Vorgänge, die bisher nur im Windkanal dreidimensional erfasst werden konnten, sind mit dem WindTracer nun auch im Freiland messbar.

Das IMK Doppler-Lidar wurde im Rahmen mehrerer Messkampagnen erfolgreich eingesetzt. Neben der Validierung eines Wind-Temperatur-Radars am Flughafen Frankfurt/Main erfolgte die Bestimmung der Vertikalstruktur der Turbulenz in der atmosphärischen Grenzschicht und des Einflusses von Cumulusbewölkung im Rahmen der Messkampagne CSIP (Convective Storms Initiation Project) im Sommer 2005 in Südengland. Weiterhin war das Gerät in Kombination mit dem scannenden Wolkenradar des IMK, einem Raman-Temperatur-Lidar und einem Wasserdampf-Lidar (DIAL) der Universität Hohenheim im Rahmen der Experimente PRINCE (PRediction, Identification and trackiNg of Convective cElls) und dem Großexperiment COPS (Convective and Orographically-induced Precipitation Study) auf der Hornisgrinde im Nordschwarzwald im Einsatz. Eine Auswahl an Messergebnissen zeigt auf eindrucksvolle Weise die Leistungsfähigkeit des Doppler-Lidars insbesondere für Messungen innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht. Die Erkenntnisse aus den Konvektionsexperimenten COPS und CSIP sollen zudem im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst zur Verbesserung der Grenzschichtparametrisierung im Wettervorhersagemodell COSMO führen.

Das 2 μm Doppler-Lidar des IMK wird 2009 durch ein weiteres Doppler-Lidar der neuesten Generation mit 1.6 μm Wellenlänge ergänzt. Dadurch werden die Messmöglichkeiten des Convection Observatory, das am KIT aufgebaut wird, erheblich erweitert. Die Kombination dieser Geräte ermöglicht die Anwendung des Dual-Doppler Verfahrens genauso wie die Errichtung „virtueller Masten“ durch sich schneidende RHI-Scanmuster der beiden Geräte.

Funktionsweise des WindTracer Doppler-Lidars



Abbildung 1: WindTracer Doppler-Lidar

Der WindTracer (Abb. 1) ist ein für den unbemannten Dauerbetrieb ausgelegtes Doppler-Lidar, das in einem mobilen Gerätecontainer installiert und dadurch an unterschiedlichsten Orten einsetzbar ist.

Das Gerät sendet 500-mal pro Sekunde augensichere Laserpulse mit einer Energie von 2 mJ von 425 ns Dauer über einen 2-Achsen-Scanner in den oberen Halbraum aus. Auf dem Weg durch die Atmosphäre wird das Laserlicht an Aerosolteilchen größer 0.6 μm gestreut, die aufgrund ihrer vernachlässigbaren Fallgeschwindigkeit ausgezeichnete Tracer für Luftbewegungen sind. Innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht ist die zur Messung notwendige Aerosolkonzentration stets vorhanden, in darüber liegenden Schichten hängt die Durchführbarkeit der Messung allerdings von der Herkunft der Luftmasse (Aerosol- und Feuchtegehalt ab).

Aus der Dopplerverschiebung der Frequenz des zum Lidar zurück gestreuten und dort detektierten Lichts wird für 100 Abstandsintervalle (konfigurierbar von 72 – 96 m Länge) ab einer Mindestentfernung von 350 m vom Gerät die Windgeschwindigkeit in Richtung des Strahls, dessen Durchmesser am Austritt 8 cm beträgt, bis in eine Entfernung von 10 km in Echtzeit bestimmt (Abb. 2). Zwei Messbereiche ermöglichen die Bestimmung von Axialwindgeschwindigkeiten von $\pm 25 \text{ ms}^{-1}$ bzw. $\pm 50 \text{ ms}^{-1}$. Nach Mittelung über 50 Laserpulse bzw. Einzelmessungen werden die Messwerte mit einer Rate von 10 Hz ausgegeben und graphisch dargestellt. Durch verlängerte Mittelungszeiten (ca. 1000 Pulse bzw. 20 s) wird eine zuverlässige Messung auch außerhalb der atmosphärischen Grenzschicht problemlos möglich.

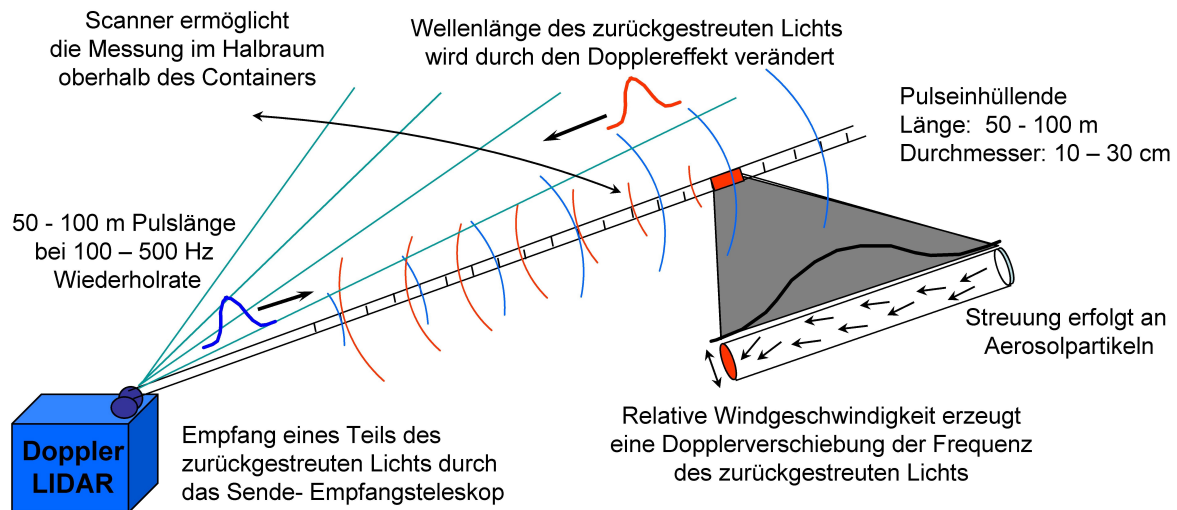


Abbildung 2: Funktionsweise des WindTracer Doppler-Lidars.

Mithilfe des frei programmierbaren 2-Achsen Scanners, der mit maximal 25° s^{-1} den Bereich 0° - 360° Azimut bzw. -5° - 185° Elevation abdeckt lassen sich beliebige Muster „abfahren“, wobei üblicherweise horizontale, bzw. kegelförmige (PPI) und vertikale (RHI) Schnitte durch die Atmosphäre bevorzugt angewendet werden. Für das Abtasten des gesamten oberen Halbraums benötigt das Gerät typischerweise 5 Minuten.

Messgenauigkeit

Doppler-Lidar Messungen sind systembedingt mit einem statistischen Fehler behaftet, dessen Größe sich unter der Annahme, dass der Fehleranteil der Messung keinen Beitrag zum Mittelwert liefert und nicht mit dem Signal korreliert ist durch Interpolation der Autokorrelationsfunktion zur Verschiebung Null hin abschätzen lässt (Frehlich, 2001). Für Doppler-Lidar Messdaten eignet sich dazu ein linearer Fit über die ersten Verschiebungen (Lenschow et al., 2000).

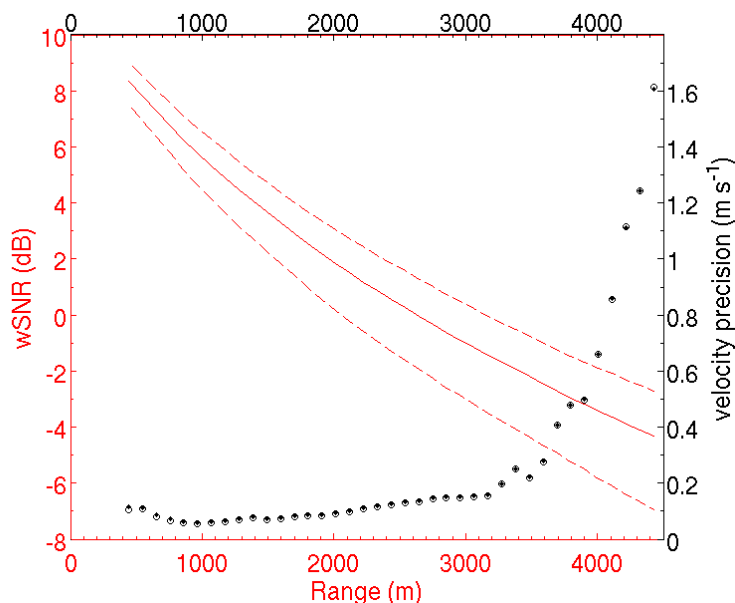


Abbildung 3: Typ. Fehler der Windgeschwindigkeitsmessung (Punkte) und zugehöriges wSNR (Linien) in Abhängigkeit der Entfernung vom Messgerät. FZK, 5. Oktober 2004, 16-17 UTC.

Abbildung 3 zeigt für den WindTracer den typischen Verlauf des Messfehlers in Abhängigkeit der Entfernung vom Messgerät am Beispiel einer Messung vom 5. Oktober 2004 auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe. Für die ersten 2000 m entlang des Strahls bzw. bis zu einem wSNR von +2 dB liegt der Fehler der Geschwindigkeitsmessung unterhalb von 0.1 m s^{-1} . Ab einem wSNR von -2 dB, dies entspricht in diesem Fall einer Entfernung von 3.5 km in Strahlrichtung, übersteigt der Messfehler 0.2 m s^{-1} und nimmt dann mit weiter abnehmendem wSNR schnell zu. Umfangreiche Fehlerbestimmungen anhand der

Daten der Messkampagnen CSIP, PRINCE und COPS aus den Jahren 2005 – 2007 erga-

ben für Messungen innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht ($wSNR > -4$ dB) eine Fehlerobergrenze von 0.2 ms^{-1} . Dies ist erheblich besser als der vom Hersteller garantierte Wert von 0.6 ms^{-1} .

Ein direkter Vergleich der Lidarwindmessung mit der eines Ultraschallanemometers, welches in 100 m Höhe am Messmast des Forschungszentrums Karlsruhe betrieben wurde, zeigt Abb. 4 für einen Zeitraum von 17 Stunden. Das Doppler-Lidar wurde für diesen Vergleich in 1.4 km Entfernung mit fester Strahleinstellung (221° Az., 4° El.) so betrieben, dass das 10. Abstandsintervall der Geschwindigkeitsbestimmung direkt am Ort des Ultraschallanemometers lag. Die auf der Abbildung dargestellten 60s-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit in Strahlrichtung (A u. B) sowie der zugehörigen Standardabweichung (C), zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der Messungen der beiden Geräte. Während der Abendstunden und in der Nacht steigt, bei Anströmung aus Südwest, die Windgeschwindigkeit von 2.5 ms^{-1} auf 7.5 ms^{-1} bei nur schwach ausgeprägter Turbulenz an (D). Die in diesem Zeitraum auftretenden Differenzen bewegen sich überwiegend im Bereich von 0.5 ms^{-1} und übersteigen in keinem Fall 1 ms^{-1} - ein in Anbetracht der verschiedenen Messverfahren und der von den Herstellern benannten Messgenauigkeiten ausgezeichnetes Ergebnis.

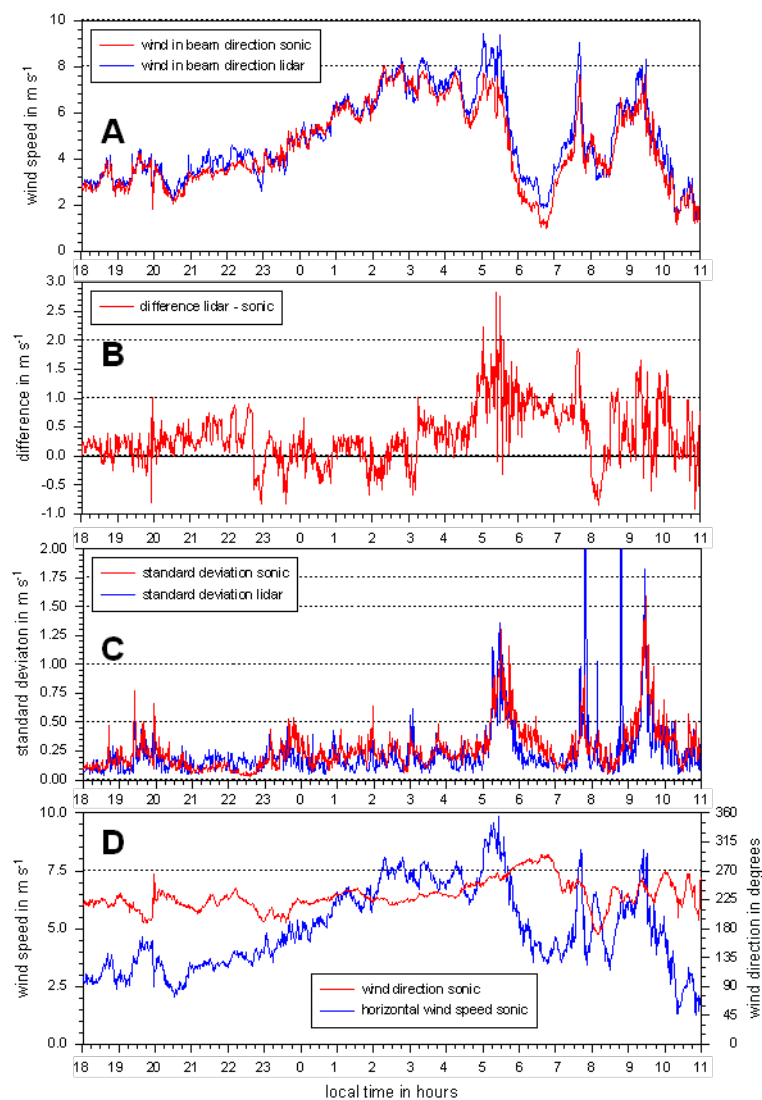


Abbildung 4: Zeitreihen des Ultraschallanemometers in 100 m Höhe am Messmast des Forschungszentrum Karlsruhe und des Doppler-Lidars mit fester Strahleinstellung für den Ort des Ultraschallanemometers.

Ab 5:00 Uhr dreht die Windrichtung auf Nordwest, gleichzeitig nehmen Windgeschwindigkeit und Turbulenzintensität zu. Unter diesen Bedingungen treten nun größere Abweichungen zwischen den beiden Geräten auf, die auf die unterschiedlichen Messverfahren und insbesondere die stark unterschiedliche Größe der Messvolumina, sowie den Aufstellungsort zurückführen lassen. Während das Ultraschallanemometer die Windgeschwindigkeit entlang dreier Messstrecken von 140 mm Länge, jeweils um 120 Grad versetzt und 45 Grad geneigt innerhalb eines Volumens von ca. 1 dm^3 bestimmt, misst der WindTracer die Windgeschwindigkeit in einem zylindrischen Volumen von 72 m Länge und 8 cm Durchmesser. Dadurch macht sich der Einfluss des Messmasts in den Messdaten des Ultraschallanemometers durch signifikant niedrigere Windgeschwindigkeit bis zur Winddrehung auf Süd um 8:00 Uhr bemerkbar während der WindTracer durch den schmalen Mast nicht beeinflusst wird. Die in der Darstellung der

Standardabweichung (C) sichtbaren kurzzeitigen Spitzen der Lidarmessungen um 7:30 Uhr und 9:00 Uhr, die in den Ultraschallanemometerdaten nicht auftreten, korrespondieren mit Niederschlagsereignissen. Die Lidarmessung wurde durch die Streuung des Laserlichts an den Regentropfen gestört.

Bestimmung der horizontalen Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Durch die Anwendung des aus der Radartechnik stammenden VAD-Algorithmus (Browning und Wexler, 1968) lassen sich unter der Annahme eines horizontal homogenen Windfelds

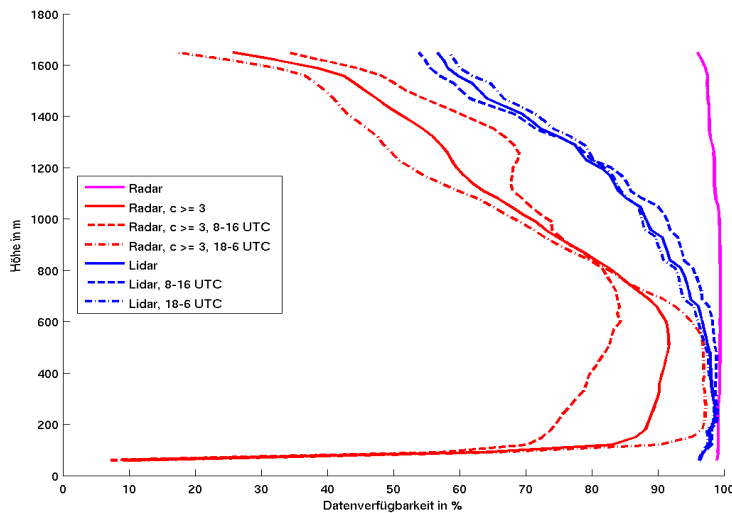


Abbildung 5: Datenverfügbarkeit in Abhängigkeit von der Messhöhe und Tageszeit für Radarmessungen (Gesamtdatensatz, qualitätsgesichert: $c > 3$) und Lidarmessungen.

Windprofile bestimmen. Beim WindTracer eignet sich ein RHI-Scanmusters (Änderung der Elevation bei festem Azimut) zur schnellen Bestimmung des Windprofils besonders gut. Für die Validierung des Scintec AP1000 Radar-Windprofilers der Deutsche Flugsicherung GmbH vom 26.02. bis 28.04.2005 am Flughafen Frankfurt/M wurden 4 RHI Scans, im Azimut um 45 Grad versetzt, jeweils von $0^\circ - 180^\circ$ Elevation gewählt, um alle 2 Minuten ein vollständiges Windprofil in Höhenschritten von 30 m ab 30 m über Grund zu berechnen. Trotz der zu dieser

Jahreszeit für Lidargeräte eher ungünstigen Witterung mit niederen Grenzschichthöhen und nächtlichen Nebelsituationen ist die Verfügbarkeit zuverlässiger Daten beim Lidar signifikant höher als beim Radar (Abb. 5). Das kleine Messvolumen des Radar-Windprofilers in Verbindung mit einer RASS-Einheit führt bei Mittelungszeiten von nur 2 Minuten unter konvektiven Bedingungen zu einer erheblichen Streuung der Messwerte (Abb. 6: 90 m und 510 m). Erst

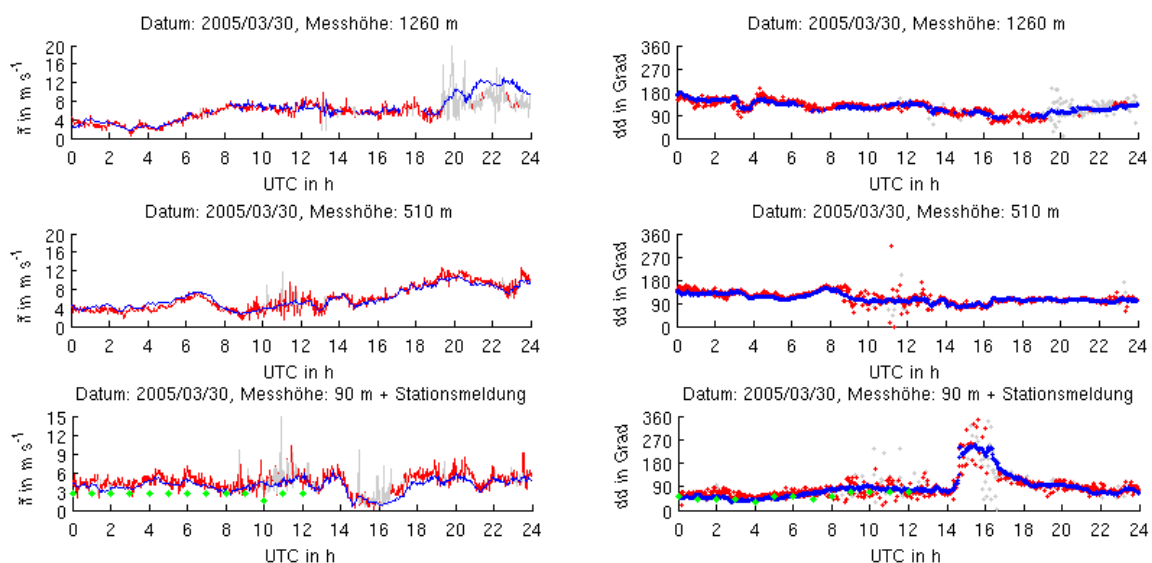


Abbildung 6: Zeitreihen der Horizontalwindgeschwindigkeit und der Windrichtung des Doppler-Lidars (blau), und des Radar-Windprofilers (grau: Gesamtdatensatz, rot: qualitätsgesichert) sowie Daten der DWD Wetterstation (grün, Messhöhe 10 m) am Flughafen Frankfurt/M.

bei Mittelung über ca. 20 Minuten erhält man mit dem Radar-Windprofiler Daten, deren Qualität mit der der Lidarmessung vergleichbar ist.

Schnitte durch die Atmosphäre

Der 2-Achsen Scanner ermöglicht Untersuchungen der Strömungsstruktur. Dazu werden PPI-Scans (Polar Position Indicator), bei denen die Radialwindgeschwindigkeit in der Ebene bzw. auf einem Kegelmantel bestimmt wird und RHI-Scans (Range Height Indicator) die vertikale Schnitte durch das Windfeld liefern angewendet. Abbildung 7 zeigt einen PPI-Scan bei 40° Elevation während des Wintersturms „Kyrill“ auf dem Gelände des Forschungszentrum Karlsruhe. Die zu diesem Zeitpunkt geschlossene Wolkendecke in ca. 1000 m Höhe begrenzt hier leider die maximale Reichweite auf etwa 1500 m. Gut zu erkennen ist die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe (nach außen hin), sowie die in der Strömung enthaltenen Böenstrukturen.

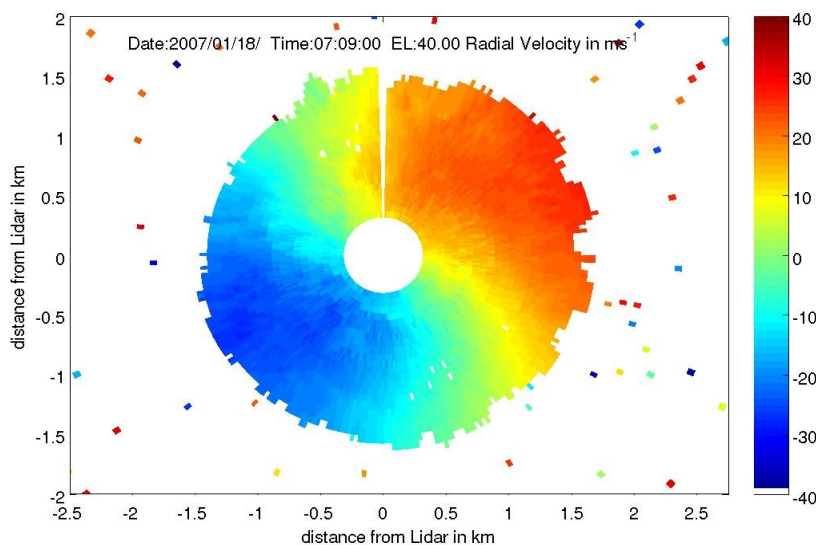


Abbildung 7: Verteilung der Windgeschwindigkeit in Strahlrichtung auf einem Kegelmantel während des Wintersturms „Kyrill“. PPI-Scan mit 6° s^{-1} bei 40° Elevationswinkel.

Weiterhin lässt sich die Strömungskanalisation im Rheintal am Verlauf des Übergangs von negativen (auf das Lidar zu gerichteten) zu positiven (vom Lidar weg gerichteten) Windgeschwindigkeiten erkennen. Während in den unteren Höhen (im inneren Teil der Abbildung) der Wind aus südwestlicher Richtung entlang des Rheintals strömt, dreht er mit zunehmender Höhe auf West.

Abbildung 8 zeigt ein Beispiel eines RHI-Scans während der CSIP Kampagne in Südengland. Die Vertikalschnitte durch eine mit ca. 5 ms^{-1} auf den Messort zu ziehende Seewindfront zu drei Zeitpunkten zeigen die hohe Detailauflösung der Lidarmessung. Während oberhalb der Seewindfront ab ca. 100 m Höhe der Wind mit 5 ms^{-1} vom Lidar weg gerichtet ist, weht er innerhalb der Seewindzone mit 5 ms^{-1} in entgegengesetzter Richtung. Die Variabilität der Höhe der Seewindzone wird durch die turbulenten Mischungsvorgänge infolge der Windscherung zwischen den beiden Strömungsschichten hervorgerufen. Mit dem Doppler Lidar war es hier möglich, die Seewindfront mehr als 20 Minuten vor Ihrer Ankunft am Lidarstandort zu detektieren – lange bevor ein am Boden stehender Beobachter sie bemerkt hätte.

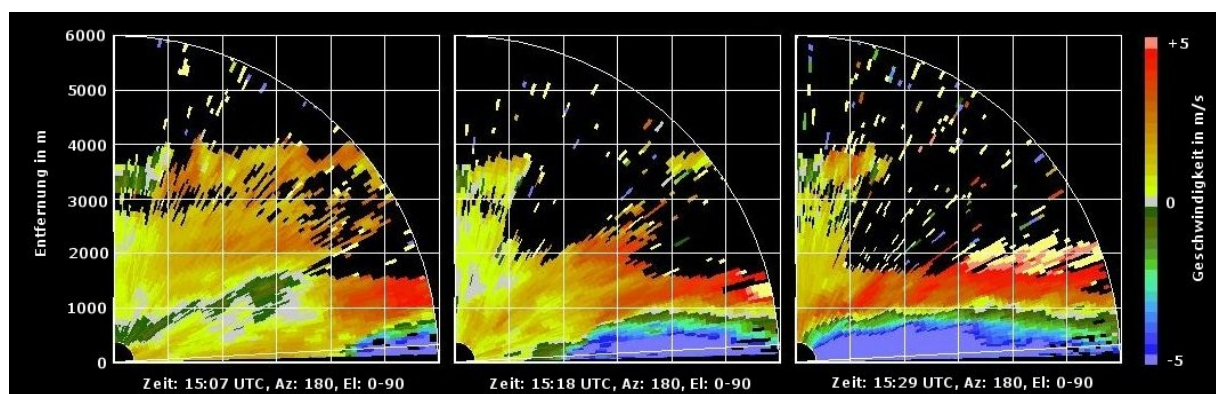


Abbildung 8: Ankunft einer Seewindfront. RHI-Scan $0^\circ - 90^\circ$ Elevation, Azimut 180° (senkrecht zur von Süden herankommenden Seewindfront).

Vertikalstruktur der Turbulenz

Richtet man den Laserstrahl des WindTracers senkrecht nach oben, wird die Vertikalkomponente des Windvektors direkt gemessen. Gleichzeitig ist es möglich die Höhe der atmosphärischen Grenzschicht und der darüber liegenden Entrainmentzone, die den Übergang zur freien Atmosphäre darstellt, anhand des Aerosolgehaltes (des Rückstreusignals) und der Turbulenzintensität festzustellen. Abbildung 9 zeigt als Beispiel eine Messung auf dem Gipfel der Hornisgrinde im Nordschwarzwald während der COPS Messkampagne. Gut erkennbar ist das Absinken der Grenzschicht bei negativer (nach unten gerichteter) Vertikalgeschwindigkeit (11.60 UTC, 11.70 UTC) und das erneute Anwachsen der Grenzschicht innerhalb von konvektiven Aufwindbereichen (11.62 UTC, 11.83 UTC, 11.95 UTC) in denen Vertikalwindgeschwindigkeiten von bis zu 3 ms^{-1} auftreten.

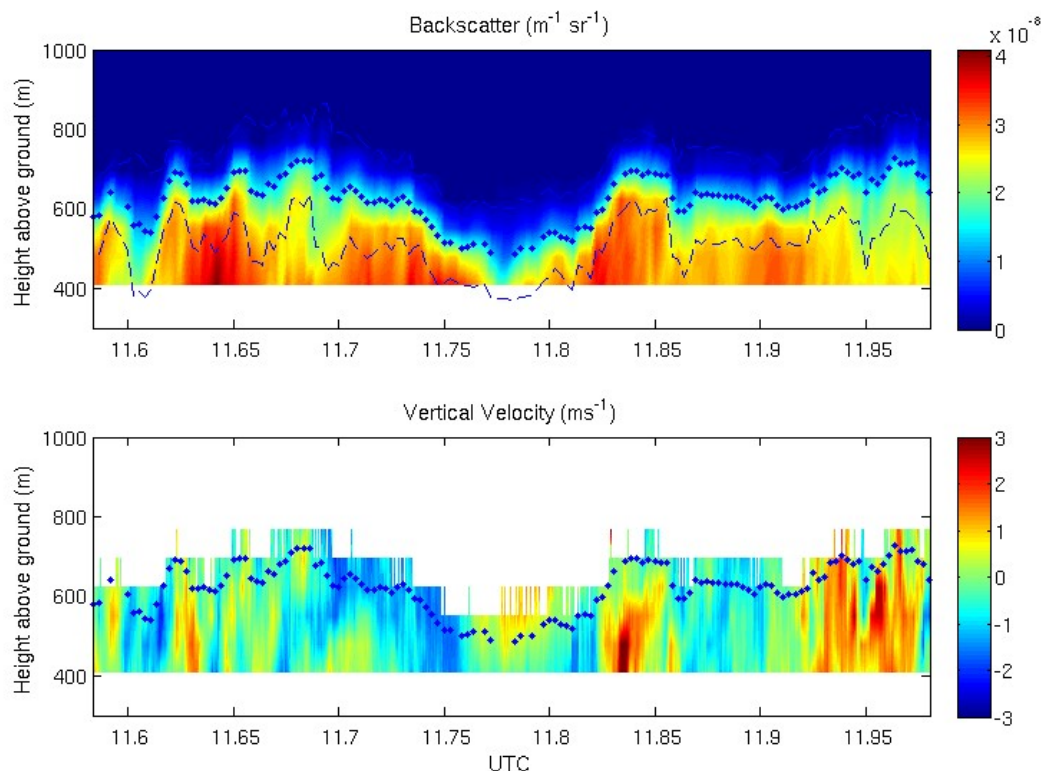


Abbildung 9: Zeitreihen von Rückstreusignal (oben) und Vertikalwindgeschwindigkeit (unten) mit Grenzschichthöhe (Punkte) und Entrainmentzone (gestrichelte Linie). COPS Messkampagne, Hornisgrinde, 1160 m ü. NN, 01.08.2007.

Für operationelle Wettervorhersagemodelle ist eine Parametrisierung der turbulenten Struktur der Grenzschicht notwendig, bei der die Turbulenz der Vertikalwinds eine wichtige Rolle spielt. Abbildung 10 zeigt normierte Profile der Varianz des Vertikalwinds aus Messungen mit dem WindTracer und in situ Messungen auf Flugstrecken von 40 km Länge über dem Lidarstandort die zeitgleich mit dem Forschungsflugzeug DO-128 der TU Braunschweig durchgeführt wurden, sowie eine von Lenschow et al., 1980 vorgeschlagene Parametrisierung. Flugzeug- und Lidarmessungen zeigen eine gute Übereinstimmung und einen zur Parametrisierung ähnlichen Verlauf, wobei die Turbulenzintensität insbesondere im Bereich des Maximums in der Mitte der Grenzschicht deutlich höher ist als die aus der Parametrisierung berechnete.

Innerhalb der Zusammenarbeit des IMK-TRO mit dem Deutschen Wetterdienst wird deshalb an einer neuen Parametrisierung für das Wettervorhersagemodell COSMO gearbeitet, bei der neben der wolkenfreien Grenzschicht auch der Einfluss von konvektiver Bewölkung be-

rücksichtigt werden soll. Ein umfangreicher Datensatz an Doppler-Lidar und Flugzeugmessungen Messungen steht dafür aus den Feldmesskampagnen COPS, PRINCE und CSIP zur Verfügung.

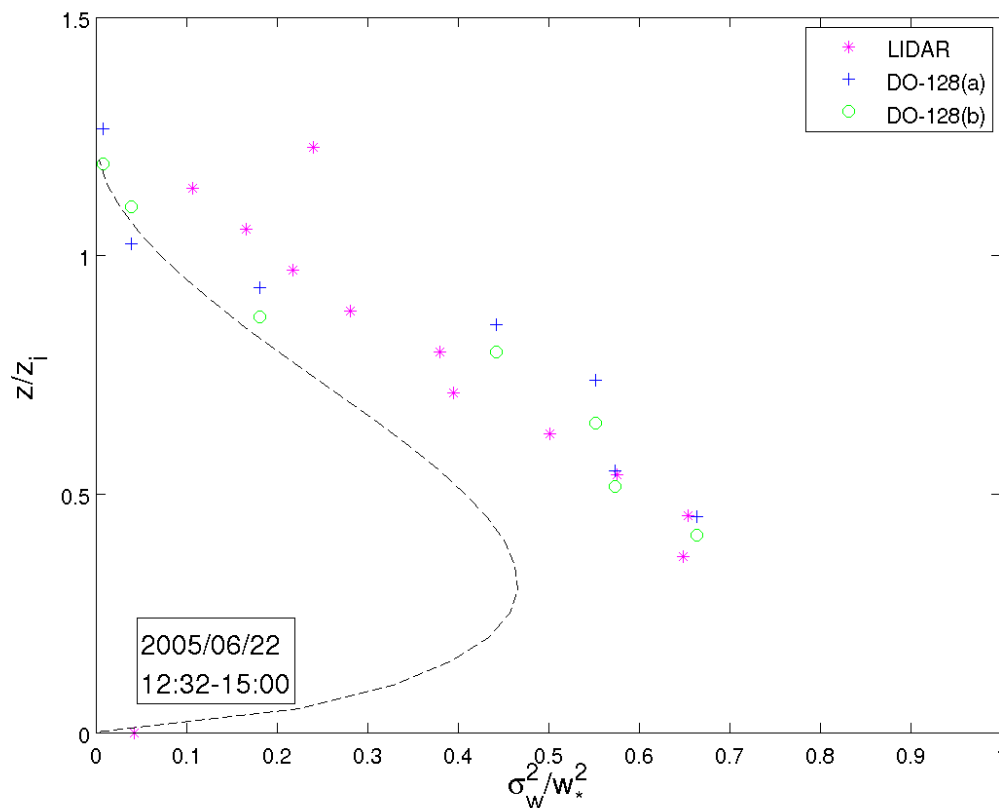


Abbildung 10: Profil der Turbulenz des Vertikalwinds normiert mit der konvektiven Geschwindigkeit w und der Grenzschichthöhe z_i aus Doppler-Lidar (Sterne) und Flugzeugmessungen (Plus und Kreise) sowie eine Parametrisierung nach Lenschow et al., 1980 (gestrichelt) für wolkenfreie Verhältnisse.

Literatur

Browning, K. A., Wexler, R., 1968: "The Determination of Kinematic Properties of a Wind Field Using Doppler Radar", *J. Appl. Meteor.*, 7, 105-113

Durst, F., Howe, B. M., Richter, G., 1982: „Laser-Doppler measurement of crosswind velocity“, *Appl. Opt.*, 21, 2596-2607

Frehlich, R., 2001: "Estimation of Velocity Error for Doppler Lidar Measurements", *J. Atmos. Oceanic Technol.* 18, 1628-1630.

Grund, Ch. J., Banta, R. B., George, J. L., Howell, J. N., Post M. J., Richter R. A., Weickmann, A.M., 2001: "High Resolution Doppler Lidar for Boundary Layer and Cloud Research", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 18, 378-393.

Lenschow, D.H., Lenschow, D., V. Wulfmeyer, and C. Senff, 2000: „Measuring second- through fourth-order moments in noisy data“, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 17, 1330–1347.

Lenschow, D. H., Wyngaard, J. C., Pennell, W. T., 1980: „Mean-Field and Second-Moment Budgets in a Baroclinic, Convective Boundary Layer“, *J. Atm. Sci.*, 37, 1313-1326

Mayor, S.D., Lenschow, D. H., Schwiesow, R. L., Mann, J., Frush, Ch., L., Simon, M. K., 1997: "Validation of NCAR 10.6- μm CO₂ Doppler Lidar Radial Velocity Measurements and Comparison with a 915-MHz Profiler", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 14, 1110–1125

Post, M. J., Cupp, R. E., 1990: „Optimizing a pulsed Doppler lidar“, *Appl. Opt.*, 29, 4144-4158