

Schriftenreihe

Oliver Reitebuch

SODAR-Signalverarbeitung von Einzelpulsen zur Bestimmung
hochaufgelöster Windprofile

Herausgeber: Prof. Dr. Wolfgang Seiler
Fraunhofer-Institut Atmosphärische Umweltforschung
Kreuzeckbahnstr. 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen
Garmisch-Partenkirchen, 1999

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Reitebuch, Oliver:

SODAR-Signalverarbeitung von Einzelpulsen zur Bestimmung hochaufgelöster
Windprofile / Oliver Reitebuch.

- Als Ms. gedr. -

Aachen : Shaker, 1999

(Schriftenreihe des Fraunhofer-Instituts Atmosphärische Umweltforschung;
Bd. 99,62)

Zugl.: Regensburg, Univ., Diss., 1998

ISBN 3-8265-6208-9

Copyright Shaker Verlag 1999

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISBN 3-8265-6208-9

ISSN 1436-1094

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit werden die Grundlagen der akustischen Fernsondierung, der Aufbau des eingesetzten Doppler-SODAR und die Entwicklung eines Auswerteverfahrens zur Bestimmung zeitlich hochaufgelöster, radialer Windkomponenten vorgestellt. Desweiteren beinhaltet die Arbeit die Ergebnisse eines umfangreichen Vergleiches mit Messungen von Mastinstrumenten und ein ausgewähltes Anwendungsbeispiel der Untersuchung nächtlicher, sekundärer Ozonmaxima in der stabilen Grenzschicht.

Während die Messung zeitlicher Mittel der Windkomponenten mit dem SODAR heute mit großer Genauigkeit möglich ist, besteht ein aktueller Forschungsbedarf in der Erfassung der turbulenten Windkomponenten. Die vorliegende Arbeit will einen Beitrag dazu leisten, Doppler-SODAR-Messungen mit hoher zeitlicher Auflösung durchführen zu können. Schwerpunkt dieser Arbeit ist daher die Entwicklung, Optimierung und Validierung eines Auswerteverfahrens für Leistungsspektren von Einzelpulsen eines SODAR.

Die Geräteausrüstung bestand in einem kommerziellen SODAR der Firma METEK, mit dem zu Beginn der Arbeit die Messung der mittleren Windkomponenten und die Aufzeichnung gemittelter Frequenzspektren möglich war. Bei dem System handelt es sich um ein monostatisches SODAR mit drei Antennen. Neben der Höhenauflösung und Puls wiederholrate kann auch die Sendefrequenz im Bereich zwischen 1000 Hz bis 2500 Hz vom Anwender vorgegeben werden, was eine flexible Anpassung an unterschiedliche Meßanforderungen und Umgebungsbedingungen erlaubt. Das System wurde vom Hersteller um eine Ausgabe der Frequenzspektren nach jedem ausgesandten Schallpuls erweitert. Unter typischen Bedingungen werden damit pro Tag etwa eine halbe Million Leistungsspektren aufgezeichnet.

Für die Auswertung der Leistungsspektren wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt, das sowohl die statistischen Eigenschaften des zurückgestreuten Signals als auch die spezifischen Parameter des eingesetzten SODAR berücksichtigt. Die Streuung von Schall in der Atmosphäre beruht auf kleinräumigen Temperatur- und Geschwindigkeitsfluktuationen in der Größenordnung der Schallwellenlänge. Die zurückgestreute Leistung unterliegt aufgrund der statistischen Natur des Streuprozesses großen Fluktuationen mit einer exponentiellen Wahrscheinlichkeitsverteilung. Die Signalanalyse wird zudem durch akustisches und elektronisches Rauschen erschwert. Trotz der großen Fluktuationen des Signals und des additiven Rauschens muß die Frequenz des zurückgestreuten Signals mit einer höheren Genauigkeit als der diskrete Frequenzabstand der Spektrallinien bestimmt

werden, um eine ausreichende Genauigkeit für die Windgeschwindigkeitsbestimmung zu erhalten.

Zur Entwicklung eines optimalen Auswerteverfahrens wurde ein zweifacher Weg beschritten. Es wurden sowohl theoretische Analysen der Signalparameterschätzung mittels der Cramer-Rao-Bound als auch Simulationen mit Modellspektren vorgenommen. Die Cramer-Rao-Bound gibt die minimale Varianz eines Schätzverfahrens an und ist nur vom verwendeten Signalmodell abhängig. Im zweiten Schritt wurde mittels simulierter Modellspektren verschiedene Algorithmen optimiert, miteinander verglichen und validiert. Als Grundlage für die theoretische Analyse und die Simulationen wurde ein gaußförmiges Signal in weißem Rauschen mit einer exponentiellen Verteilung der Leistung angenommen. Es konnte gezeigt werden, daß die Cramer-Rao-Bound der Signalfrequenzschätzung proportional zum Quadrat des Verhältnisses aus mittlerer Rauschleistung und maximaler Signalleistung, proportional zur Frequenzbreite und invers proportional zur Dauer des Empfangsfensters ist. Die Genauigkeit der Frequenzbestimmung kann demnach durch einen längeren Sendepuls und ein längeres Empfangsfenster und damit nur durch größere Werte für die Höhenauflösung verbessert werden.

Bei den Simulationen mit Modellspektren wurde der bislang am meisten verwendete Algorithmus mit Berechnung der Signalparameter über Summenformeln für die Momente untersucht (Summenalgorithmus). Desweiteren wurden Algorithmen mit einem *Least-Square-Fit* im Leistungsspektrum (nichtlinearer Interpolationsalgorithmus) und einem *Least-Square-Fit* im logarithmierten Leistungsspektrum (Interpolationsalgorithmus) entwickelt. Durch die Simulationen konnte gezeigt werden, daß sich bei der Signalanalyse von Einzelpulsen mit dem Interpolationsalgorithmus deutliche Verbesserungen gegenüber dem Summenalgorithmus erzielen lassen. Mittels einer theoretischen Analyse der Varianz der Schätzung des Summenalgorithmus und des Interpolationsalgorithmus konnte gezeigt werden, daß nur der Interpolationsalgorithmus dieselben Abhängigkeiten von den Signalparametern aufweist wie die Cramer-Rao-Bound und diese bis auf einen Faktor von 1.6 erreicht. Nachteilig wirkt sich beim Interpolationsalgorithmus seine geringere Anzahl von Leistungsspektren aus, welche von den Qualitätsprüfungen bei niedrigem Signal-Rausch-Verhältnis als gültig erkannt werden. Es wird daher vorgeschlagen, den Summen- und den Interpolationsalgorithmus zu kombinieren. Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Algorithmus zur Einzelpulsanalyse beinhaltet die Bestimmung der Rauschleistung, die Signaldentifikation, die Momentenschätzung und eine Qualitätskontrolle. Dieser Algorithmus wurde erfolgreich bei der Bestimmung von Vertikalwindzeitreihen mit einer zeitlichen Auflösung von 4 s eingesetzt. Das aus der Zeitreihe berechnete Turbulenzspektrum der Vertikalwindfluktuationen zeigt den typischen Abfall der Energiedichte des Spektrums im *inertial subrange* mit $f^{-5/3}$, wie er unter konvektiven Bedingungen beobachtet wird. Das Ziel der Arbeit, ein Auswerteverfahren für Leistungsspektren von Einzelpulsen zu entwickeln, um eine Messung hochaufgelöster Radialwindkomponenten mit dem SODAR zu ermöglichen, wurde erreicht.

Neben der Entwicklung eines optimalen Algorithmus zur Signalanalyse von Einzelpulsen war ein weiterer Inhalt der Arbeit, die Genauigkeit der mittleren Windkomponenten zu bestimmen. Es wurde ein dreiwöchiger Vergleich mit Instrumenten eines 200-m-Mastes am Forschungszentrum Karlsruhe durchgeführt. Für die Horizontalwindgeschwindigkeit wurde eine Standardabweichung der SODAR- von einer Schalenkreuz-Anemometer-Messungen von 0.74 m/s, ein Korrelationskoeffizient von 0.92 und eine systematische Differenz von 0.64 m/s bestimmt. Die Standardabweichung und der Korrelationskoeffizient sind im Vergleich zu Werten anderer Vergleichsexperimente überdurchschnittlich gut. Gründe für die im Mittel um 0.64 m/s höheren Werte des Anemometers werden in der Arbeit diskutiert. Ob Messungen der Standardabweichung der Vertikalwindfluktuationen σ_w mit einem SODAR möglich sind, wird kontrovers diskutiert. Deshalb wurde ein Vergleich mit Messungen von Ultraschall-Anemometern durchgeführt, dessen Ergebnis mit einer Standardabweichung von nur 0.13 m/s und einem Korrelationskoeffizienten von 0.89 sehr gut ist. Der in der Literatur bislang wenig berücksichtigte Einfluß der Signalanalyse auf die Qualität der σ_w -Messung wird in der Arbeit diskutiert.

Die Anwendung des SODAR wird am Beispiel einer Untersuchung der nächtlichen, stabilen Grenzschicht demonstriert. Eine gemeinsam mit dem Institut für Ökologie der Universität-GH Essen durchgeführte Meßkampagne hatte zum Ziel, die Ursachen nächtlicher, sekundärer Maxima in der Ozonkonzentration zu ermitteln. Mittels der SODAR-Messungen konnte der Zusammenhang zwischen dem Auftreten eines nächtlichen *Low-Level-Jets* und einem verstärkten Vertikalaustausch mit einer Erhöhung von σ_w um den Faktor zwei bis drei nachgewiesen werden. Der zeitgleich einsetzende Anstieg der bodennahen Ozonkonzentration, Temperatur und Windgeschwindigkeit und der Abfall der Konzentration von Stickstoffdioxid und Kohlenmonoxid konnte somit auf einen erhöhten Vertikalaustausch mit Luftmassen der Reservoirschicht zurückgeführt werden.

Ausblick

Die vorliegende Untersuchung der Signalanalyse wurde auf Einzelpulse beschränkt. Zur Bestimmung der mittleren Windkomponenten wird beim eingesetzten METEK-SODAR bislang eine Spektrenmittelung vorgenommen. Daß die Spektrenmittelung für die Bestimmung von σ_w zu besseren Resultaten führt, konnte durch die überdurchschnittlich guten Ergebnisse des Vergleichsexperimentes demonstriert werden. Ob die Spektrenmittelung auch bei der Bestimmung der mittleren Horizontalwindgeschwindigkeit das bessere Verfahren ist, müßte in zukünftigen Modellsimulationen geklärt werden. Unter bestimmten Bedingungen könnte ein Konsensus- oder Kontinuitäts-Algorithmus für die Zeitreihe zu einer höheren Ausbeute an Daten und zu verlässlicheren Werten führen. Dies gilt insbesondere für Mittelungszeiten während derer die Signalparameter stark schwanken, z. B. unter konvektiven Bedingungen oder bei kurzfristigen akustischen Störungen.

Eine weitere Verbesserung der Messung der Windkomponenten kann durch eine Berücksichtigung der Signatur von Festechos in den Signalen erzielt werden. Ein Ansatz wäre eine *Wavelet*-Filterung der Zeitreihe der zurückgestreuten Leistung. Eine weitere Möglichkeit könnte in der Analyse der statistischen Eigenschaften der Spektrallinien nachfolgender Pulse liegen, welche bei Festechos eine nicht-atmosphärische Signatur aufweisen (*statistical averaging method*). Ob die bei der Analyse von Doppler-RADAR-Signalen erfolgreich

eingesetzten Methoden auf das Doppler-SODAR übertragen werden können, kann durch Modellsimulationen und Auswertungen atmosphärischer Signale geprüft werden.

Während des Vergleichsexperiments wurde eine Unterschätzung von σ_w in der stabilen Grenzschicht bei hohen Windgeschwindigkeiten beobachtet. Dies könnte an einer zu starken Korrektur der Verbreiterung der Signallinie aufgrund des *beam broadening* liegen. Die Entwicklung einer stabilitätsabhängigen Korrektur der Verbreiterung könnte zu einer weiteren Verbesserung der σ_w -Messung beitragen.

Die Arbeit konnte zeigen, daß mit dem SODAR Messungen zeitlich hochaufgelöster Profile der Vertikalwindgeschwindigkeit möglich sind. Werden diese Messungen mit LIDAR-Messungen von Spurenstoffen wie Ozon oder Wasserdampf kombiniert, könnten vertikale Flüsse dieser Stoffe bestimmt werden. Ein vielversprechendes Anwendungsgebiet wäre die Untersuchung dynamischer Prozesse während der Störung der nächtlichen Grenzschicht. Die Quantifizierung und Parametrisierung des Vertikalaustausches während sporadisch auftretender Turbulenz in der nächtlichen stabilen Grenzschicht ist bislang nur unzureichend möglich.

Die Fernerkundung mittels SODAR, LIDAR und RADAR gewinnt eine zunehmende Bedeutung in der Umweltüberwachung und -forschung. Die Kombination verschiedener Fernerkundungsverfahren zu integrierten Systemen kann zukünftig einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis atmosphärenphysikalischer Prozesse liefern. Der positiven Einschätzung des zukünftigen Beitrages der bodengebundenen Fernerkundung von Clifford, Kaimal, Lataitis und Strauch (1994) möchte ich mich anschließen:

A renewed commitment, after nearly 25 years, to the concept of ground-based remote sensing technology is necessary to realize fully the unprecedented progress possible in probing the atmosphere to provide the accurate, global data sets necessary for improved forecasts of weather, climate, and global habitability.