

Ein Verfahren der akustischen Laufzeittomographie zur Sondierung meteorologischer Größen in der bodennahen Atmosphäre

A. Raabe, A. Ziemann, K. Arnold
 Universität Leipzig Institut für Meteorologie
 Stephanstr. 3, 04103 Leipzig

Motivation:

Verfahren zur Erfassung meteorologischer Größen wie Windgeschwindigkeit, Temperatur und Luftfeuchtigkeit und die daraus abgeleiteten Flüsse von Impuls, fühlbarer und latenter Wärme greifen auf Techniken zurück, die diese Größen als Zeitreihe an einem festen Ort ermitteln. Solche Techniken ermöglichen demnach keine Übertragung der ortsfesten Beobachtungen auf größere Flächen, ohne dass bestimmte Verfahren nachgeschaltet werden, die diese Punktmessungen als flächenbezogene Daten aufbereiten. Das am Institut für Meteorologie der Universität Leipzig entwickelte Verfahren der akustischen Laufzeittomographie kann aus Schallgeschwindigkeitsmessungen die horizontale Variabilität des bodennahen Windfeldes und Lufttemperaturfeldes darstellen. Typischer Weise überspannt die Messtechnik eine Fläche von einigen 100 m x 100 m. Die tomographische Technik liefert eine Unterteilung der Gesamtfläche in Einzelflächen von 50 m x 50 m so dass über den Beobachtungszeitraum hinweg im Abstand von einer halben Minute innerhalb der Gesamtfläche die ortsbezogene Variabilität von Windgeschwindigkeit bzw. Lufttemperatur darstellbar ist.

Tomographie in der atmosphärischen Bodenschicht und Messgenauigkeit:

Ein akustisches tomographisches Verfahren unter den Randbedingungen einer turbulenten Atmosphäre wurde durch Spiesberger und Frstrup (1990) zur Positionsbestimmung von Tieren und Vögeln genutzt. Wilson und Thomson (1994) zeigten die prinzipielle Anwendbarkeit tomographischer Verfahren zur gleichzeitigen Beobachtung von Wind- und Lufttemperaturfeldern. In Leipzig begannen die Arbeiten zu einem Verfahren, das die Laufzeit von Schallimpulsen zwischen mehreren Sendern und Schallempfängern ausnutzt, um durch tomographische Algorithmen auf einer räumliche Verteilung von meteorologischen Größen im durchschallten Gebiet zu schließen, Mitte der 90er Jahre (Raabe u.a., 1996).

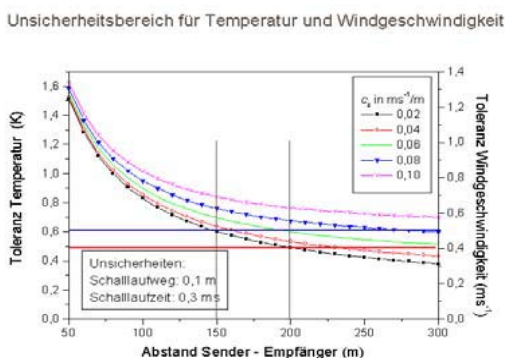


Abb. 1: Die Standardabweichung der aus Laufzeiten von Schallsignalen abgeleiteten Temperatur- und Windgeschwindigkeitsdaten in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger bei Vorgabe bestimmter Unsicherheiten und bei Berücksichtigung verschiedener vertikaler Schallgeschwindigkeitsgradienten

Wenn es möglich sein soll, horizontale, flächenbezogene Windgeschwindigkeits- und Lufttemperaturdaten mit einem Größtfehler von $\pm 0,5 \text{ m/s}$ bzw. $\pm 0,5 \text{ K}$ aus Schallgeschwindigkeitsmessungen abzuleiten, dann muss die Entfernung zwischen Sender und Empfänger mindestens 150m betragen und diese Entfernung muss auf 10cm genau bestimmt werden. Gleichzeitig darf die Unsicherheit der Laufzeitmessung der Schallsignale nicht 0,3ms überschreiten und der vertikale Gradient der Schallgeschwindigkeit muss sich in einem Bereich zwischen $0,02 \text{ s}^{-1}$ und $0,1 \text{ s}^{-1}$ bewegen (Arnold, 2000, s. Abb. 1). Mit geodätischen Positionsvermessungstechniken und der Nutzung einer Schallfrequenz von etwa 1000Hz kann man diese Grenzen einhalten.

Eine tomographische Technik kann akustische Laufzeitdaten zur Rekonstruktion der räumlichen Verteilungen von Größen, die die Schallgeschwindigkeit beeinflussen, dann nutzen, wenn Beobachtungen aus verschiedenen Blickwinkeln zur Verfügung stehen. In Abhängigkeit von der Genauigkeit der Laufzeitbestimmung, der Anzahl von Sendern und Empfängern und der Größe des von diesen Geräten abgedeckten Gebietes kann dann die Gesamtfläche beispielsweise in mehrere quadratische Teilflächen zerlegt werden. Für eine oft verwendete Anordnung von $N=5$ Sendern und $M=6$ Empfängern über einem Gebiet der Ausdehnung 250m x 300m, sind das etwa $N \cdot M = 30$ Teilflächen der Größe 50m*50m. Eine solche Messanordnung ist in der Lage eine Änderung von 1K der Lufttemperatur über das Messgebiet hinweg nachzuweisen. (Abb. 2, Ziemann, 2000).

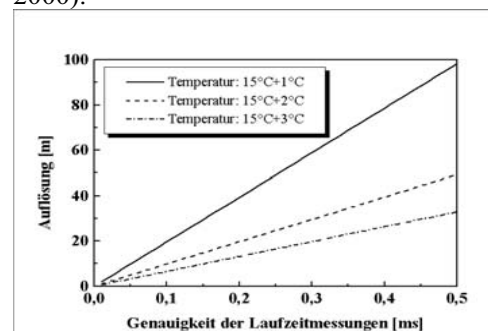


Abb. 2: Das tomographische Verfahren kann eine Gesamtfläche in Teilflächen bestimmter Ausdehnung auflösen, die von der Genauigkeit der Laufzeitmessung und von einer zur erwartenden Veränderung der meteorologischen Größe (hier Lufttemperatur) abhängt.

Das verwendete tomographische Verfahren (eine iterative algebraische Rekonstruktionstechnik, SIRT, Ziemann 2000, Raabe u.a. 2001), nutzt geradlinige Schallstrahlen. Mit dieser Einschränkung kann

gearbeitet werden, wenn die Entfernung zwischen Sender und Empfänger 500m nicht übersteigt. Der Vergleich zwischen konventionell und auf tomographischen Weg ermittelten Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsdaten zeigt, dass die Streuung der gegeneinander dargestellten Beobachtungen die geforderten Fehlergrenzen von $\pm 0,5K$ bzw. $\pm 0,5m/s$ einhalten (Abb. 3). Voraussetzung ist eine ungestörte Strömung über einer unveränderlichen Unterlage der Atmosphäre. Diese Bedingung ist auf dem Grenzschichtmessfeld des Deutschen Wetterdienstes in Lindenberg (DWD-GM) gegeben (Beyrich, 2000). Systematische Abweichungen verdeutlichen die Schwierigkeit, Messungen die üblicherweise an einem Punkt erfolgen, mit den auf tomographischen Weg ermittelten flächengemittelten Werten in Übereinstimmung zu bringen

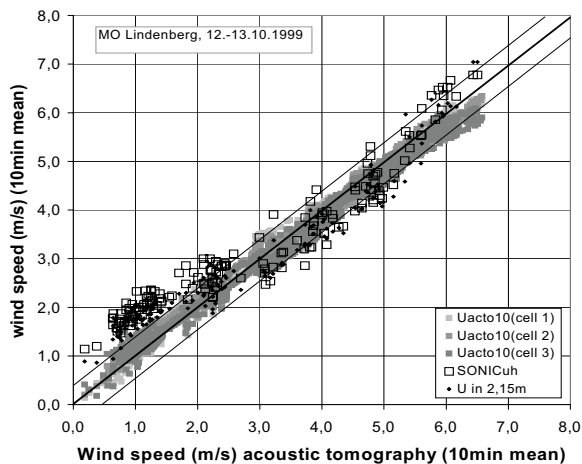


Abb. 3: Vergleich zwischen akustisch und konventionell bestimmten 10 Min. Mitteln der Windgeschwindigkeit auf dem DWD-GM Lindenberg am 12.- 13.10.1999

Tomographie über heterogenem Gelände

Die Empfindlichkeit der tomographischen Messtechnik erlaubt es über einer heterogenen Unterlage die zeitabhängig unterschiedliche Erwärmung über den verschiedenen Teilen des Beobachtungsgebietes zu verfolgen (s.a. Ziemann u.a., 2001). In dem hier gezeigten Beispiel überspannt das tomographische Meßsystem eine Wiese und einen Teich im Leipziger Auwald (Rosental, 200m x 180m). So ist die Lufttemperatur über dem Teich am Tag oft niedriger als über der Wiese, nachts kehrt sich das Verhältnis während der Messzeit um. (s. Abb. 4. und 5).

Spiesberger, J.L., Frstrup, K.M., 1990: Passive localization of calling animals and sensing their acoustic environment using acoustic tomography. *Am. Natural.* **135**, 107-153.
 Wilson, D.K. und Thomson, D.W., 1994: Acoustic tomographic monitoring of the atmospheric surface layer. *J. Atmosph. Ocean. Technol.* **11**, 751-769
 Ziemann, A. 2000: Eine theoretische Studie zur akustischen Tomographie in der atmosphärischen Grenzschicht. *Wiss. Mit. Inst. f. Meteorol. Uni. Leipzig*, **18**, 141 S.
 Ziemann A.; Arnold K.; Raabe A., 2001.: Acoustic tomography as a method to identify small-scale land surface characteristics. *ACUSTICA*, **87**, 731-737.

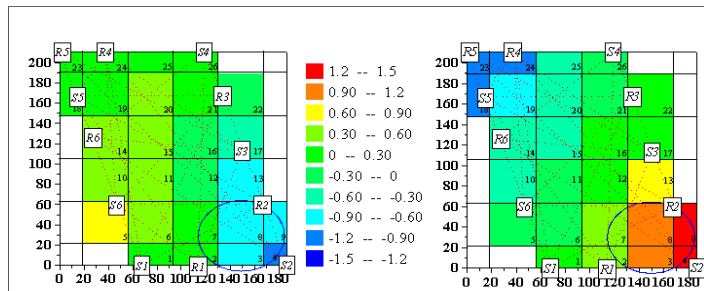


Abb. 4: In der bodennahen Luftschicht tomographisch ermittelte regionale Abweichung der Lufttemperatur [K] vom Mittelwert über einer heterogenen Unterlage

Leipzig, Rosental: 1. August 2000 (16:00 links, 23:00 rechts).
 S1-S6 6 Schallquellen, R1-R6 6 Schallempfänger
 Landschaftsstruktur: Grasland und Teich (Kreis)

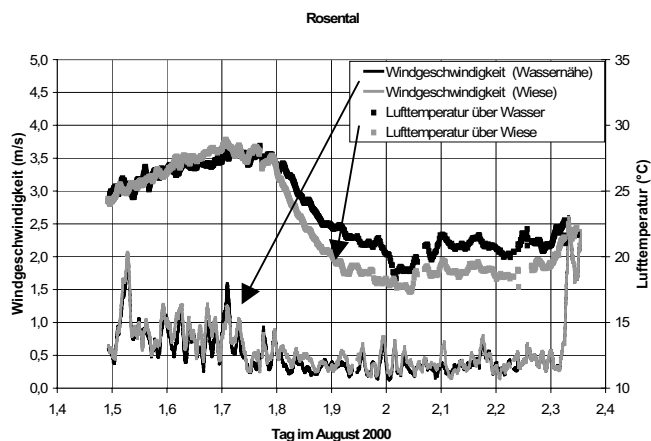


Abb. 5: Der Tagesgang von Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit über verschiedenen Teilen des Messgebietes (Rosental, Leipziger Auwaldwiese).

Schlussfolgerung

Mit dem hier vorgestellten Verfahren der akustischen Laufzeittomographie ist es möglich, im Gebiet der bodennahen Luftschichten flächendeckende Mittelwerte der Lufttemperatur bzw. der Windgeschwindigkeit mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5K$ bzw. $\pm 0,5m/s$ zu ermitteln. Das Verfahren ist empfindlich genug, um kleinräumige, horizontale Unterschiede im Wind und Lufttemperaturfeld nachzuweisen. Damit wird es möglich, bodennahe, flächengemittelte meteorologischen Daten auch über komplexen Geländestrukturen zu erfassen

Literatur

Arnold, K., 2000: Ein experimentelles Verfahren zur Akustischen Tomographie im Bereich der atmosph. Grenzschicht. *Wiss. Mit. Inst. f. Meteorol. Uni. Leipzig*, **18**, 136 S.
 Beyrich, F.(ed.), 2000: LITFASS-98 Experiment Report. DWD, Forschung u. Entwicklung, Arbeitserg. **62**, 78 S.
 Raabe, A., Arnold, K. und Ziemann, A., 2001: Near surface averaged air temperature and wind speed determined by acoustic travel time tomography, *Meteorol. Z.*, **10**, 61-70.
 Raabe, A., Arnold, K., Ziemann, A., 1996: Akustische Tomographie im Bereich der atmosphärischen Grenzschicht. *Wiss. Mit. Inst. f. Meteorol. Uni. Leipzig*, **4**, 113-123.
Atmosph. Ocean. Technol. **11**, 751-769.