

Astrid Ziemann und Manuela Barth

## **Hören, wie warm es ist – Neue Wege in der Atmosphärenakustik**

### **1 Einleitung**

Frühe Messungen der Lufttemperatur wurden mit Galileo- oder Ausdehnungsthermometern durchgeführt. Inzwischen steht eine Vielzahl von Messverfahren zur Verfügung, welche über den Kontakt zwischen Messgerät und umgebender Luft eine Temperaturbestimmung vornehmen können. Bei diesen in-situ-Messungen kommen die Messelemente direkt mit dem Messobjekt in Berührung und können dessen Zustand signifikant beeinflussen. Bei Messungen mit massebehafteten Sensoren ist außerdem der Wärmeleitung mit einer relativ langen Wartezeit bis zur Angleichung der Temperatur des Messgerätes an die Temperatur der Umgebungsluft Rechnung zu tragen. Dabei werden weitere äußere Einflüsse wirksam (z.B. Wärmestrahlung). Demgegenüber können Fernmessverfahren die Eigenschaften einer Strömung untersuchen, ohne einen Einfluss auf das Luftvolumen auszuüben. Ein Vorteil solcher Verfahren besteht also darin, dass die bekannten Schwierigkeiten direkter Messungen, z.B. Strahlungsfehler, überwunden werden. Im Gegensatz zu in-situ-Messungen an einem Punkt bestimmen Fernmessverfahren außerdem einen räumlichen Mittelwert der Temperatur eines Luftvolumens und sind damit durch eine größere räumliche Repräsentativität gekennzeichnet.

Akustische Fernmessverfahren, z.B. das SODAR (SONic Detection And Ranging) oder das Ultraschallanemometer, wenden aktiv ausgesendete Schallwellen und ihre Wechselwirkung mit der turbulenten Atmosphäre zur Sondierung der vertikalen Atmosphärenschichtung bzw. der Temperatur kleiner Luftvolumina an. Hierbei wird die bekannte Tatsache genutzt, dass sich die raum-zeitlich variablen meteorologischen Größen (z.B. Lufttemperatur) auf verschiedene Schallausbreitungsparameter (z.B. Schallgeschwindigkeit) auswirken. Für die Bereitstellung von Flächen- bzw. Volumenmittelwerten für den Vergleich mit Daten aus Atmosphärenmodellen wird jedoch zusätzlich ein Fernmessverfahren benötigt, dass auch eine Sondierung in horizontaler Richtung über Entfernungen von wenigen Metern bis zu einigen 100

Metern vornehmen kann. Dieses Verfahren wurde aus der Kombination einer tomographischen Aufzeichnung von Schallausbreitungsparametern mit einem speziellen inversen Auswertungsalgorithmus (Ziemann et al., 1999<sup>1</sup>) in der akustischen Laufzeittomographie gefunden.

## 2 Methode der akustischen Laufzeittomographie

Unter dem Begriff Tomographie (altgriechisch: *tome* – Schnitt, *grafi* – Schrift) werden verschiedene bildgebende Verfahren zusammengefasst, mit denen die räumliche Struktur eines Objektes ermittelt werden kann. Die spezielle Methode der Strahltomographie basiert auf der Idee, dass ein gemessener Datensatz aus Linienintegralen, den sogenannten Projektionen, über eine Untersuchungsgröße aufgebaut ist. Das Ziel der tomographischen Analysemethoden besteht in der Rekonstruktion eines Modells der zu untersuchenden physikalischen Größe, so dass die mit dem Modell projizierten Daten möglichst gut mit den gemessenen Linienintegralen übereinstimmen. Die Messdaten können durch eine Transmission, Reflexion, Refraktion oder Beugung von Wellen als Energie- und Informationsträger durch ein Medium gewonnen werden. Bei geeignetem Empfang können die Wellen zur räumlichen Darstellung von physikalischen Größen des durchstrahlten Mediums herangezogen werden. Eine Inhomogenität im Messgebiet wirkt sich dabei auf jede Einzelmessung unterschiedlich aus. Erst die gemeinsame, mehrfachüberdeckende Bearbeitung vieler solcher einzelnen Messdaten ergibt ein Schnittbild des zu untersuchenden Mediums inklusive der vorhandenen Inhomogenitäten.

Im Vergleich zur inzwischen standardmäßigen Anwendung tomographischer Methoden im Bereich der Geophysik und Ozeanographie, wurde die Tomographie als eine Mess- und Analysemethode für die Rekonstruktion bodennaher meteorologischer Felder bisher nur von wenigen Forschergruppen genutzt (Spiesberger und Fristrup, 1990<sup>2</sup>; Wilson und Thomson, 1994<sup>3</sup>, Raabe et al., 2001<sup>4</sup>). Eine Ursache dafür ist die Voraussetzung für tomographische Rekonstruktionsverfahren, ein während der Messzeit nahezu konstanter Zustand des sondierten Messgebietes. Die Einhaltung dieser Bedingung ist

- 1 Ziemann, A., Arnold, K. and Raabe, A., 1999: Acoustic travel time tomography. A method for remote sensing of the atmospheric surface layer, Meteorol. Atmosph. Phys., 71, 43–51.
- 2 Spiesberger, J.L. and Fristrup, K.M., 1990: Passive localization of calling animals and sensing of their acoustic environment using acoustic tomography, Am. Natural., 135, 107–153.
- 3 Wilson, D.K. and Thomson, D.W., 1994: Acoustic tomographic monitoring of the atmospheric surface layer, J. Atmosph. Ocean. Technol., 11, 751–769.
- 4 Raabe, A., Arnold, K., Ziemann, A., 2001: Near surface spatially averaged air temperature and wind speed determined by acoustic travel time tomography, Meteorol. Z., N.F., 10, 61–70.

innerhalb der turbulenten atmosphärischen Grenzschicht nur bei einer zeitgleichen Messung und für relativ kurze Entfernungen (bis ca. 1 km) zwischen Sendern und Empfängern zu erfüllen. Weitere Anforderungen an ein experimentelles tomographisches Verfahren entstehen durch die Kombination von Bedingungen aus der Atmosphärenforschung, der Signalanalyse und der Mathematik (Invertierungstechniken). Abgesehen von diesen Ansprüchen an das Mess- und Analyseverfahren plädieren die zahlreichen Vorteile für die Anwendung tomographischer Verfahren in der Meteorologie: hohe Anzahl an Messwerten in Bezug auf die vorhandenen Sensoren, Bereitstellung eines synoptischen Abbilds der Untersuchungsgröße, trägheitsloses Fernmessverfahren, Untersuchungsmöglichkeiten unzugänglicher Gebiete.

Bei dem Verfahren der akustischen Laufzeittomographie wird aus Messungen der akustischen Signallaufzeit auf den Zustand der durchquerten Atmosphärenschicht geschlossen. Dabei werden Schallimpulse kurzer Dauer ausgesendet und von einem Empfänger an einer anderen räumlichen Position aufgezeichnet. Aus der bekannten Entfernung zwischen Sender und Empfänger und den gemessenen akustischen Laufzeiten lässt sich die Schallgeschwindigkeit ermitteln, deren raum-zeitliche Variabilität durch die Eigenschaften der Luftschicht, insbesondere Temperatur und Bewegungszustand, bestimmt wird.

Die Laufzeit eines akustischen Signals entlang des Schallstrahls ergibt sich als Linienintegral

$$t_{\text{Strahl}} = \int_{\text{Strahl}} \frac{dl}{c_{\text{eff}}} \quad (1)$$

mit dem Kurvenelement entlang des Schallstrahls  $dl$  und der effektiven Schallgeschwindigkeit

$$c_{\text{eff}} = v + c_L \quad (2)$$

wobei  $v$  die Windkomponente in Schallausbreitungsrichtung und  $c_L$  die Laplacesche Schallgeschwindigkeit sind. Zu den räumlichen und zeitlichen Modifikationen der Laplaceschen Schallgeschwindigkeit durch Veränderungen der akustischen virtuellen Lufttemperatur (Lufttemperatur  $T$  und spezifische Luftfeuchte  $q$ )

$$T_{\text{av}} = T(1 + 0,513q) \quad (3)$$

kommt die Wirkung des richtungsabhängigen Windvektorfeldes auf die Schallausbreitung hinzu (siehe Ziemann, 2000<sup>5</sup>). Eine Trennung zwischen

Temperatur- und Windeinfluss auf die Schalllaufzeit kann durch einen geeigneten Messaufbau (reziproke, bidirektionale Schallausbreitung) oder numerische Verfahren (iteratives Trennungungsverfahren) erfolgen. In den nachfolgenden Anwendungsbeispielen (siehe Kapitel 3) kommt das Prinzip der reziproken Schallstrecken zum Einsatz, d.h., die Schallsignale bewegen sich zwischen gegenüberstehenden Sender- und Empfängerpaaren jeweils auf ein- und demselben Weg hin und zurück. Über die unterschiedlichen Laufzeiten zwischen den Sendern und Empfängern lassen sich dann auf einfache Weise die Laplacesche Schallgeschwindigkeit und die Windvektorkomponente in Schallausbreitungsrichtung bestimmen (Arnold et al., 2004<sup>6</sup>). Daraus lassen sich Laufzeiten berechnen, die nur von der Temperatur bzw. nur vom Windvektor abhängig sind und als Eingangsdaten für den tomographischen Rekonstruktionsalgorithmus dienen, um eine räumliche Verteilung der Temperatur- und Strömungsänderungen im Messgebiet zu ermitteln (Barth und Raabe, 2006)<sup>7</sup>.

Da nur eine endliche Anzahl von Messwerten vorliegt, kann auch nur eine endliche räumliche Auflösung der Untersuchungsgrößen Temperatur und Windvektor erzielt werden. Die Ausgangsgleichung (1) für die gemessenen Linienintegrale muss deshalb diskretisiert werden. Die räumliche Auflösung des Messfeldes und damit die Gitterzellengröße hängen hauptsächlich von der Schallstrahlendichte im Untersuchungsgebiet, der Genauigkeit der Laufzeitmessungen und der Schallgeschwindigkeitsunterschiede innerhalb des Messfeldes ab (siehe Ziemann, 2000). Es resultiert das folgende Gleichungssystem für  $i$  gemessene Laufzeitwerte zu einem Zeitpunkt:

$$t_i = \sum_{j=1}^J l_{ij} s_j \quad (4)$$

mit der bekannten Strahlstücklänge  $l_{ij}$  des  $i$ -ten Schallstrahls in der  $j$ -ten Gitterzelle sowie der Langsamkeit  $s_j$  in der  $j$ -ten Gitterzelle, welche die reziproke

- 5 Ziemann, A., 2000: Eine theoretische Studie zur akustischen Tomographie in der atmosphärischen Grenzschicht, Wiss. Mitt. Inst. für Meteorol. Univ. Leipzig und Inst. für Troposphärenforschg. Leipzig, 19, 138 S..
- 6 Arnold, K., Ziemann, A., Raabe, A. and Spindler, G., 2004: Acoustic tomography and conventional meteorological measurements over heterogeneous surfaces, Meteorol. Atmosph. Phys., 85, 175–186.
- 7 Barth, M. und Raabe, A., 2006: Akustische Tomographie zur gleichzeitigen Bestimmung von Temperatur- und Strömungsfeldern in Innenräumen. Wiss. Mitt. Inst. für Meteorol. Univ. Leipzig, 37, 71–80.

temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit bzw. die Strömungsgeschwindigkeit in Schallausbreitungsrichtung darstellt.

Mit der Verwendung eines iterativen algebraischen Rekonstruktionsverfahrens für die Laufzeiteninvertierung können Absolutwerte der Schallgeschwindigkeit in den Gitterzellen bestimmt werden. Die Simultane Iterative Rekonstruktionstechnik (SIRT; siehe Gilbert, 1972<sup>8</sup>) zeichnet sich wegen ihrer Stabilität und relativ geringen Artefaktbildung gegenüber anderen iterativen Verfahren aus und wird deshalb für die Invertierung der Laufzeitdaten und Herstellung von räumlichen Mittelwerten der Temperatur und des Windvektors verwendet.

Die SIRT-Methode geht dabei nach folgendem Lösungsschema vor. In einem ersten Schritt wird eine Verteilung der gesuchten Parameterwerte durch einfache Rückprojektion der gemessenen Laufzeitdaten in die Gitterzellen gewonnen. Die Residuen zwischen den berechneten und den gemessenen Laufzeitwerten werden für die Verbesserung der Lösung (räumliche Verteilung der Langsamkeiten) bis zum Erreichen eines Konvergenz- bzw. Abbruchkriteriums genutzt. Die Konvergenz und die Lösungssuche der SIRT-Methode sind dabei von der Abfolge der Strahlenbearbeitung unabhängig. Das Verfahren wird außerdem nicht von der Reihenfolge der Gitterzellenbearbeitung beeinflusst, entscheidend ist nur die Anzahl und die Strahlstücklänge der Strahlen, die ein Gitterelement durchqueren.

Die Leistungsfähigkeit eines solchen tomographischen Rekonstruktionsalgorithmus wird u.a. von folgenden Punkten bestimmt: Genauigkeit der Entfernungsbestimmung und Gültigkeit der Approximation geradliniger Schallstrahlen zwischen Sender und Empfänger, Genauigkeit der Signallaufzeitbestimmung, Abdeckung des Beobachtungsgebietes durch verschieden gerichtete Schallstrahlen.

Das Messsystem sowie der Auswertungsalgorithmus wurden in den vergangenen Jahren bei mehreren Feldexperimenten eingesetzt (z.B. Raabe et al., 2005<sup>9</sup>, Tetzlaff et al., 2002<sup>10</sup>, Ziemann et al., 2002<sup>11</sup>). Diese Untersu-

8 Gilbert, P.F.C., 1972: Iterative methods for three-dimensional reconstruction from projections. *J. Theor. Biol.*, 36, 105–117.

9 Raabe, A., Arnold, K., Ziemann, A., Beyrich, F., Leps, J.-P., Bange, J., Zittel, P., Spieß, Th., Foken, Th., Göckede, M., Schröter, M. and Raasch, S., 2005: STINHO – STructure of turbulent transport under INHOMogeneous surface conditions – part 1: The micro- $\alpha$  scale field experiment. *Meteorol. Z.*, 14, 315–327.

10 Tetzlaff, G., Arnold, K., Raabe, A. and Ziemann, A., 2002: Contributions of the method of acoustic travel time tomography to area covering measurements in real terrain, *Meteorol. Z.*, 11, 273–283.

11 Ziemann, A., Arnold, K. and Raabe, A., 2002: Acoustic tomography as a method to describe measuring sites, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 19, 1208–1215.

chungen haben gezeigt, dass mit dem Verfahren der akustischen Laufzeitotomographie Absolutwerte meteorologischer Größen mit einer Genauigkeit bestimmt werden können, die mindestens der anderer Punktmessungen und Fernerkundungsverfahren entspricht. Bei einer aktuell erreichbaren Bestimmungsgenauigkeit der akustischen Laufzeit von ca. 0,3 ms für Freifeldmessungen, die messtechnisch und auswertungsspezifisch bedingt ist, kann eine Temperaturbestimmung für die Einzelmessung zu einem Zeitpunkt auf ca. 0,5 K genau erfolgen. Die Genauigkeit bei der Windbestimmung mit Hilfe der akustischen Laufzeitotomographie liegt in einem Bereich um ca.  $0,3 \text{ m s}^{-1}$ .

Die Anwendbarkeit der akustischen Tomographie beschränkt sich nicht nur auf den Größenmaßstab von Feldexperimenten (siehe Kapitel 3.1). Die akustische Laufzeitotomographie als ein skalierbares Verfahren ist auch im deutlich kleineren Maßstab, z.B. in Innenräumen oder im Windkanal anwendbar (siehe Kapitel 3.2).

### 3 Anwendungen der Akustischen Laufzeitotomographie

Die akustische Laufzeitotomographie in der Feldversion bietet die Möglichkeit, den Inhomogenitätsgrad der meteorologischen Felder über einer natürlichen Oberfläche mit einer horizontalen Ausdehnung von bis zu  $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$  in einer Auflösung bis zu einigen Dekametern zu charakterisieren (Ziemann et al., 2001<sup>12</sup>) und damit die meteorologischen Größen in einem konsistenten Format für den Vergleich mit Atmosphärenmodellen bereitzustellen. Neben dem Vergleich zwischen Messwerten und Modelldaten (Weinbrecht et al., 2004<sup>13</sup>) wurde das Tomographie-Verfahren auch eingesetzt, um den Einfluss einer thermodynamisch inhomogenen Oberfläche auf die horizontale Homogenität der meteorologischen Felder zu prüfen. Solche Untersuchungen sind eine Voraussetzung für die Anwendung bekannter Theorien zur Parametrisierung der atmosphärischen Grenzschicht (z.B. Monin-Obukhov-Theorie).

#### 3.1 Messkampagne Melpitz

Die Feld-Messkampagne STINHO-1 (Structure of the turbulent fluxes under inhomogeneous surface conditions) fand im Herbst 2001 an der Forschungsstation des IfT (Institut für Troposphärenforschung Leipzig) in Melpitz bei

12 Ziemann, A., Arnold, K. and Raabe, A., 2001: Acoustic tomography as a method to identify small-scale land surface characteristics, *Acustica*, 87, 731–737.

13 Weinbrecht, S., Raasch, S., Ziemann, A., Arnold, K. and Raabe, A., 2004: Comparison of large-eddy simulation data with spatially averaged measurements obtained by acoustic tomography – presuppositions and first results. *Boundary-Layer Meteorol.*, 111, 441–465.

Torgau (geographische Koordinaten: 51,32 N, 12,54 E, Höhe über NN: 86 m) statt (Arnold et al., 2004<sup>14</sup>). Die Forschungsstation befindet sich auf einer Wiese umgeben von Ackerland. Die Beobachtungen waren Teil des Verbundprojekts VERTIKO (Vertikaltransporte von Energie und Spurenstoffen an Ankerstationen und ihre räumliche/zeitliche Extrapolation unter komplexen natürlichen Bedingungen), das im Rahmen des Atmosphärenforschungsprogramms AFO2000 durchgeführt wurde.

### **3.1.1 Messaufbau**

Das tomographische Messfeld mit einer Ausdehnung von 300 x 700 m<sup>2</sup> wurde über zwei Gebieten mit unterschiedlicher Landnutzung (Wiese und nahezu vegetationsloses Ackerland) aufgebaut. Aufgrund der unterschiedlichen (Strahlungs-)Eigenschaften der Oberflächen wurden auch horizontale Unterschiede im Temperaturfeld in ca. 2 m Höhe erwartet.

Bei dem Experiment wurden von zwölf Schallsendern gleichzeitig Schallpulse ausgesendet, die an acht Mikrofonen empfangen wurden. Die Laufzeit der Schallsignale wurde durch eine Korrelation des ausgesendeten und des empfangenen Signals berechnet. Eine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Signaleinsätzen von verschiedenen Sendern wurde durch die Messfeldgeometrie und daraus resultierende Laufzeitunterschiede bestimmt (siehe Arnold et al., 1999<sup>15</sup>). Die akustische Messtechnik wurde so um das Messfeld herum bzw. im Feld verteilt (siehe Abbildung 1: Schematischer Messaufbau in Melpitz (300 m x 700 m) zur Detektion der horizontalen Temperaturverteilung. Für die akustischen Sondierungen wurden 8 Schallsender (S1...S8) und 12 Mikrofone (R1...R12) eingesetzt. Zur tomographischen Rekonstruktion des Temperaturfeldes in den Gitterzellen (graue Linien, 100 m x 100 m) wurden die Schallgeschwindigkeiten entlang der Schallstrahlverläufe (schwarze Linien) genutzt.), dass eine optimale Überdeckung des Gebietes mit Schallstrahlen erreicht wurde. Zur Trennung des Einflusses von Temperatur und Wind auf die Laufzeit der Schallsignale wurden bidirektionale Schallstrecken (siehe Arnold et al., 2004) aufgebaut, d.h. eine Schallausbreitung in einer Richtung und in der Gegenrichtung mit geringem räumlichen Versatz zwischen beiden Schallstrecken wurde ermöglicht.

---

14 Arnold, K., Ziemann, A., Raabe, A. and Spindler, G., 2004: Acoustic tomography and conventional meteorological measurements over heterogeneous surfaces, *Meteorol. Atmosph. Phys.*, 85, 175–186.

15 Arnold, K., Ziemann, A. und Raabe, A., 1999: Acoustic tomography inside the atmospheric boundary layer, *Phys. Chem. Earth (B)*, 24, 133–137.

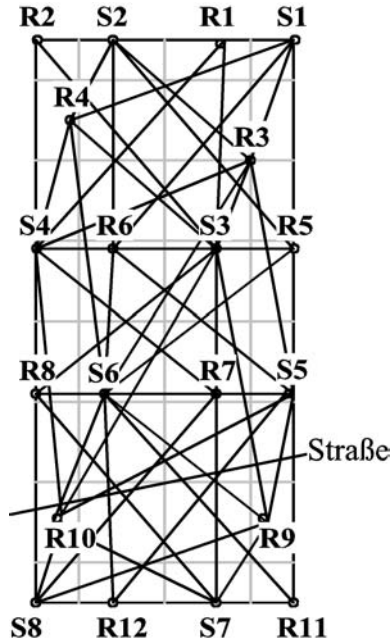


Abb. 1: Schematischer Messaufbau in Melpitz (300 m x 700 m) zur Detektion der horizontalen Temperaturverteilung. Für die akustischen Sondierungen wurden 8 Schallsender (S1...S8) und 12 Mikrofone (R1...R12) eingesetzt. Zur tomographischen Rekonstruktion des Temperaturfeldes in den Gitterzellen (graue Linien, 100 m x 100 m) wurden die Schallgeschwindigkeiten entlang der Schallstrahlverläufe (schwarze Linien) genutzt.

Um die Approximation geradliniger Schallstrahlen für die tomographische Invertierung der Laufzeitmessungen anwenden zu können, wurde die auszuwertende Schallstreckenlänge auf 400 m begrenzt (siehe Ziemann et al., 2001). Damit standen 62 von 96 theoretisch möglichen Schallpfaden für die Auswertung zur Verfügung. Der SIRT Algorithmus wurde nun auf die nur noch temperaturabhängigen Laufzeiten angewendet, um die Laplacesche Schallgeschwindigkeit und daraus das Temperaturfeld abzuleiten. Mit einer Punktmessung der Luftfeuchte wurde die akustisch virtuelle Temperatur in die Lufttemperatur umgerechnet. Dabei wurde der Einfluss einer horizontal variablen Luftfeuchte auf die akustisch virtuelle Temperatur gegenüber der räumlichen Variabilität der Lufttemperatur vernachlässigt. Für jede Gitterzelle der Größe 100 m x 100 m folgt somit ein Wert für die Lufttemperatur im Minutentakt, d.h. 32 horizontal verteilte Messwerte pro Minute.



### 3.1.2 Ergebnisse

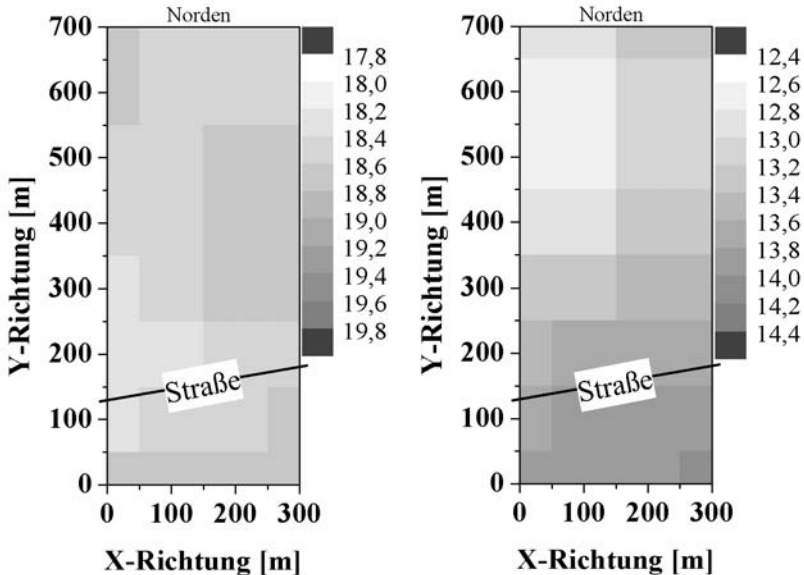


Abb. 2: Tomogramme (horizontale Schnittbilder) der mittleren Lufttemperatur in Grad C (Graustufen) in einer Höhe von 2 m über Grund am 06.10.2001 für den Zeitraum 13:30–13:50 MOZ (mittlere Ortszeit) – linkes Bild – und 22:30–22:50 MOZ – rechtes Bild – auf dem Messfeld in Melpitz.

Die Abbildung 2: Tomogramme (horizontale Schnittbilder) der mittleren Lufttemperatur in Grad C (Graustufen) in einer Höhe von 2 m über Grund am 06.10.2001 für den Zeitraum 13:30-13:50 MOZ (mittlere Ortszeit) – linkes Bild – und 22:30-22:50 MOZ – rechtes Bild – auf dem Messfeld in Melpitz. zeigt Beispiele für solche Temperatur-Tomogramme, welche Schnittbilder durch das Temperaturfeld in einer Höhe von ca. 2 m über der Oberfläche darstellen. Entsprechend einer zeitlichen Mittelung über 20 Minuten verbessert sich die Wertegenauigkeit auf ca. 0,2 K. Die hier dargestellten Messergebnisse wurden am 6.10.2001, einem sonnigen Herbsttag, aufgenommen. Die Temperatur in 2 m Höhe stieg tagsüber von ca. 5 °C am Morgen auf ca. 18 °C am Nachmittag. Die Windgeschwindigkeit in dieser Höhe war gering, mit einem Hauptmaximum am frühen Nachmittag von 3 m/s und einen sekundären Maximum von 2 m/s am Abend. Besonders der Ackerboden war gut durchfeuchtet, wodurch sich die Unterschiede in den Strahlungseigenschaften der beiden

Oberflächen deutlich verringerten. Messungen des turbulenten fühlbaren Wärmeflusses zeigten kaum Unterschiede zwischen den beiden Oberflächentypen, tagsüber wurden sogar etwas geringere Werte über dem Acker gegenüber der Wiesenfläche bestimmt (siehe Arnold et al., 2004).

Aus diesem Grund sind tagsüber auch nur geringe horizontale Unterschiede im Temperaturfeld sichtbar. Während der abendlichen Abkühlungsphase nehmen die räumlichen Temperaturdifferenzen zwischen Acker- und Wiesenfläche zu und erreichen Werte bis zu 2 K zwischen 22 und 23 Uhr. Eine kleinräumige Advektion wärmerer Luftmassen von einem nahen Waldgebiet, das in Richtung der Ackerfläche lag, zeigte sich zunächst mit höheren Temperaturen über dem Acker. Im weiteren Zeitverlauf wanderte dieses Gebiet, ohne größere Mischung mit der Umgebung, durch das gesamte Messgebiet hindurch.

Mit dem Verfahren der akustischen Laufzeittomographie ist es möglich, solche Inhomogenitäten in den meteorologischen Feldern sichtbar zu machen und damit die Repräsentativität konventioneller Messungen an einem Punkt abzuschätzen.

### 3.2 Messkampagne Ilmenauer Fass

Neben dem akustisch tomographischen Messsystem zur Erfassung meteorologischer Felder im Freien wurde am Institut für Meteorologie eine skalierte Variante entwickelt, welche kleinräumige Messungen (1 m bis ca. 20 m) erlaubt (Holstein et al., 2004<sup>16</sup>). Mit diesem skalierten System können sowohl neue Algorithmen im kleinen Maßstab getestet, als auch Sondierungen und Rekonstruktionen von Temperatur- und Strömungsfeldern in kleineren Messgebieten, wie z.B. in Innenräumen oder Hallen, vorgenommen werden.

Ein Experiment zur Erfassung von Temperatur- und Strömungsfeldern wurde 2005 im „Ilmenauer Fass“ (Ilmenauer Fass online, 2006<sup>17</sup>) durchgeführt. Dieses Großgerät der TU Ilmenau zur Turbulenzforschung ist ein zylindrischer Raum mit einem Durchmesser von 7 m und einer maximalen Messhöhe von etwa 7,2 m. Das Fass zeichnet sich durch eine Heizplatte am Boden und eine variabel aufgehängte Kühlplatte als obere Begrenzungsfläche aus. In Abhängigkeit von den thermischen Bedingungen sowie vom Verhältnis von Breite zu Höhe des Volumens bilden sich im Inneren des Fasses konvektiv induzierte Wirbelstrukturen aus (Resagk et al., 2004<sup>18</sup>).

16 Holstein, P., Raabe, A., Müller, R., Barth, M. Mackenzie, D. and Starke, E., 2004: Acoustic tomography on the basis of travel-time measurements. *Meas. Sci. Technol.*, 15, 1420–1428.

17 Ilmenauer Fass online (Juni 2006): <http://www.tu-ilmenau.de/ilmenauer-fass>

Die Anwendung der akustisch tomographischen Messtechnik im Ilmenauer Fass sollte zeigen, inwieweit konvektive Strukturen aufgelöst und zeitgleich Temperatur- und Strömungsverteilungen mit gleicher räumlicher Auflösung erfasst werden können.

### 3.2.1 Messaufbau

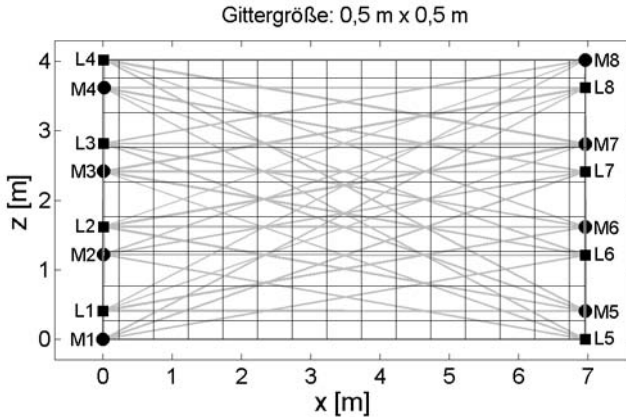


Abb. 3: Messaufbau im Ilmenauer Fass zur Detektion der Vertikalstruktur von Temperatur und Strömung. Für die akustischen Sondierungen wurden 8 Schallsender (Quadrate; L1...L8) und 8 Mikrofone (Kreise; M1...M8) eingesetzt. Zur tomographischen Rekonstruktion der Felder in den Gitterzellen (schwarze Linien) innerhalb der Messfläche wurden die Schallgeschwindigkeiten entlang der sich ergebenden Schallstrahlverläufe (graue Linien) genutzt.

Das kleinskalige akustisch tomographische System erlaubt derzeit die Erfassung und Rekonstruktion zweidimensionaler Verteilungen von Strömung und Temperatur. Es verfügt über 8 akustische Eingangs- und 4 unabhängige Ausgangskanäle, mit denen jeweils ein spezifisches Signal gesendet werden kann. Um die Konvektionsströmung im Ilmenauer Fass zu detektieren, wurden insgesamt 8 Schallsender, von denen jeweils 2 identische Signale ausgesendet haben, und 8 Empfänger an den Wänden des Fasses angebracht, um eine vertikal ausgerichtete Messfläche analysieren zu können (vgl. Abbildung 3: Messaufbau im Ilmenauer Fass zur Detektion der Vertikalstruktur von Temperatur und Strömung. Für die akustischen Sondierungen wurden 8

18 Resagk, C., du Puits, R., Thess, A., Busse, F.H. and Tilgner, A., 2004: Velocity and temperature measurements in a large-scale Rayleigh-Bénard experiment using LDA and micro thermistors. 12th Int. Symp. Appl. of Laser Techniques to Fluid mechanics, Lisbon.

Schallsender (Quadrate; L1...L8) und 8 Mikrofone (Kreise; M1...M8) eingesetzt. Zur tomographischen Rekonstruktion der Felder in den Gitterzellen (schwarze Linien) innerhalb der Messfläche wurden die Schallgeschwindigkeiten entlang der sich ergebenden Schallstrahlverläufe (graue Linien) genutzt.). Die Unterscheidung der Schallsender mit identischen Signalen bei der Analyse erfolgte entsprechend des Systems für Freilandmessungen durch eine geeignete Wahl des Aufbaus, wobei sich die Laufzeiten gleicher Signale an allen Empfängern hinreichend voneinander unterscheiden. Die Messfläche hatte eine Ausdehnung von etwa 7 m Breite und 4 m Höhe. Die untere Begrenzung der Messfläche befand sich etwa 0,4 m über der Heizplatte, die obere Grenze der Messfläche verlief etwa 1 m unterhalb der Kühlplatte.

Die Trennung zwischen den beiden Einflussgrößen Temperatur und Strömung erfolgte über die Betrachtung paralleler Messstrecke. Hierbei wird ausgenutzt, dass sich die Strömungsgeschwindigkeit, im Gegensatz zur Temperatur, richtungsabhängig auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der akustischen Signale auswirkt. Für die Rekonstruktion der Verteilungen von Temperatur und Strömung standen somit 56 paarweise parallele Strecken zur Verfügung.

### 3.2.2 Ergebnisse

Die Messungen im Ilmenauer Fass erfolgten während voll ausgeprägter Konvektion (quasistationäres Temperaturfeld) mit einer zeitlichen Auflösung von 20 Sekunden. Für die tomographische Rekonstruktion der Verteilungen von Temperatur und Strömung wurde das Messgebiet in 135 Teilflächen mit einer Größe von  $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$  eingeteilt (vgl. Abbildung 3: Messaufbau im Ilmenauer Fass zur Detektion der Vertikalstruktur von Temperatur und Strömung. Für die akustischen Sondierungen wurden 8 Schallsender (Quadrate; L1...L8) und 8 Mikrofone (Kreise; M1...M8) eingesetzt. Zur tomographischen Rekonstruktion der Felder in den Gitterzellen (schwarze Linien) innerhalb der Messfläche wurden die Schallgeschwindigkeiten entlang der sich ergebenden Schallstrahlverläufe (graue Linien) genutzt.). Um auch in Gitterzellen, durch welche nur kurze Schallstrahlabschnitte verlaufen, verlässliche Werte zu rekonstruieren, wurden benachbarte Gitterzellen bei der Berechnung der einzelnen Gitterwerte einbezogen. Beispielhafte Verteilungen der Temperatur und der Strömung zu zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten sind in Abbildung 4: Tomographisch rekonstruierte Verteilung der Temperatur- und Strömungsverteilung im Ilmenauer Fass, die aus 2 aufeinanderfolgenden akustischen Messungen am 17.1.2005 rekonstruiert wurden. Die hinterlegte

Grauskalierung entspricht den akustisch virtuellen Temperaturwerten in Grad C, die Pfeile repräsentieren das Strömungsfeld, dargestellt. Die Grauskalierung spiegelt hierbei die akustisch virtuelle Temperatur in Grad C und die Pfeile das Strömungsfeld innerhalb der Messfläche wider.

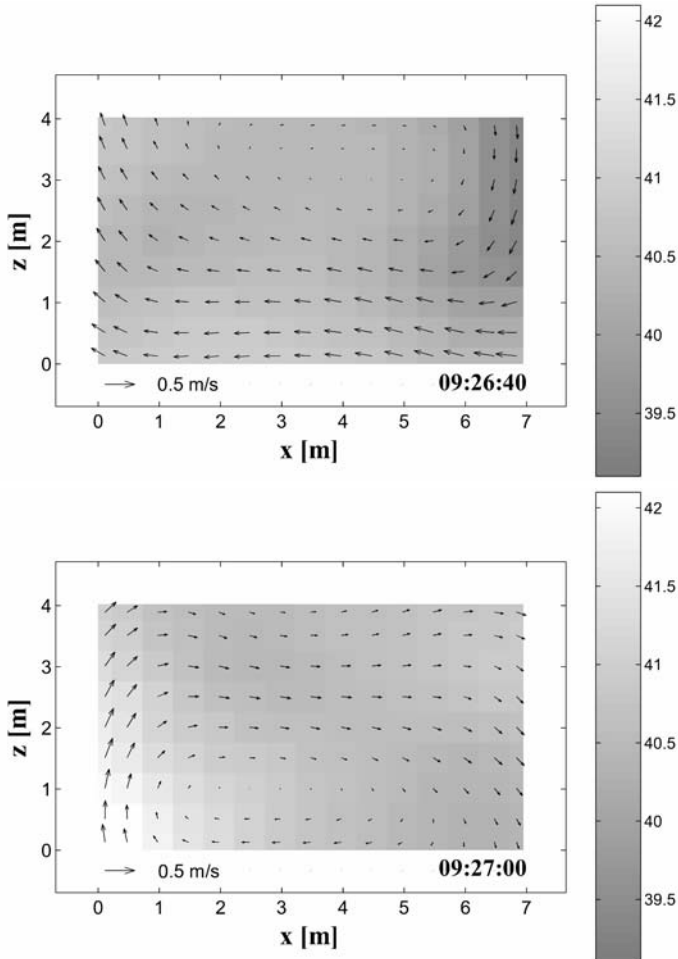


Abb. 4: Tomographisch rekonstruierte Verteilung der Temperatur- und Strömungsverteilung im Ilmenauer Fass, die aus 2 aufeinanderfolgenden akustischen Messungen am 17.1.2005 rekonstruiert wurden. Die hinterlegte Grauskalierung entspricht den akustisch virtuellen Temperaturwerten in Grad C, die Pfeile repräsentieren das Strömungsfeld.

Markant für beide Zeitpunkte ist die Wirbelstruktur der Strömung in Uhrzeigerichtung. Es fällt jedoch auf, dass sich das Wirbelzentrum zwischen den beiden Messungen verlagert hat. Ebenfalls auffällig ist in beiden Fällen die nahezu konstante Temperaturverteilung im gesamten Untersuchungsgebiet, welche lediglich in den Randbereichen (insbesondere links unten und rechts oben) durchbrochen wird. In diesen Gebieten wird warme Luft von der Heizplatte am Boden mit der Strömung nach oben und kühle Luft von der Kühlplatte nach unten transportiert.

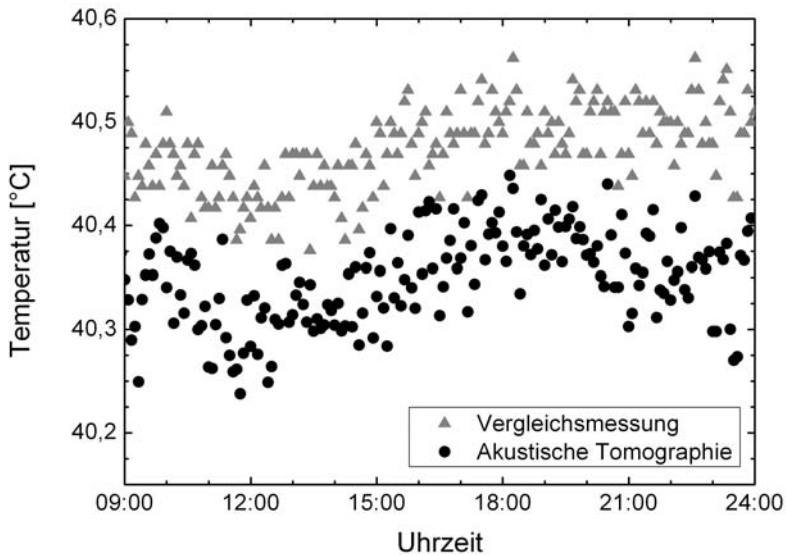


Abb. 5: Vergleich des zeitlichen Verlaufs der gemessenen Temperatur im Ilmenauer Fass am 17.1.2005. Die Lufttemperatur wurde mit einem konventionellen Temperatursensor bestimmt. Die dargestellten Werte der akustisch bestimmten Temperatur sind die aus den akustischen Messungen rekonstruierten Werte in der zentralen Zelle des Tomographiegitters. Der Feuchteinfluss auf die akustischen Temperaturmessungen wurde durch die mittleren Werte zweier unabhängiger Feuchtesensoren in verschiedenen Höhen im Ilmenauer Fass korrigiert.

Zum Vergleich der akustisch bestimmten und tomographisch rekonstruierten Temperaturwerte wurden Messungen mit einem konventionellen Temperaturfühler im Zentrum des Ilmenauer Fasses durchgeführt. Diese Daten liegen als zeitliche Mittelwerte mit einer Auflösung von 5 Minuten vor. Um einen direkten Vergleich mit den akustisch bestimmten Temperaturen zu ermöglichen, wurden die rekonstruierten Zellenwerte ebenfalls zeitlich gemittelt. Des

Weiteren wurde der Einfluss der Feuchte auf die akustisch bestimmte Temperatur nach Gleichung (3) mittels Werten zweier unabhängiger Temperatur-Feuchtesensoren korrigiert. In Abbildung 5 ist ein beispielhafter zeitlicher Verlauf dargestellt. Die Daten der akustisch bestimmten Temperatur stammen aus einer Gitterzelle des Tomographiegebietes, die der Position des Temperaturfühlers entsprach.

Der Verlauf beider Temperaturreihen ist nahezu identisch. Sie unterscheiden sich lediglich durch einen sehr geringen Versatz, der maximal etwa 0,2 K beträgt.

#### **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Das vorgestellte skalierbare Verfahren der akustischen Tomographie ist in der Lage, meteorologische Felder mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu sondieren. Vom Feldmaßstab bis zum Windkanalmaßstab kann somit die Repräsentativität von konventionellen Punktmessungen nachgewiesen sowie konsistente Daten für die Validierung von numerischen Modellen bereitgestellt werden.

Neben einer kontinuierlichen Optimierung der Hard- und Software sollen sich künftige Anwendungen des Verfahrens mit der Untersuchung von Temperatur- und Strömungsfeldern im beheizbaren Windkanal und mit der Umströmung von Hindernissen beschäftigen. Im größeren Maßstab von (Lager-) Hallen sind innenraumklimatische Studien geplant. Zukünftig sollten die Messdaten der akustischen Tomographie außerdem dazu genutzt werden, um Zusammenhänge zwischen Atmosphären- und Schallausbreitungsgrößen besser zu beschreiben und zu modellieren. Ein Schwerpunkt ist hierbei die stabile atmosphärische Grenzschicht mit intermittenter, inhomogener und anisotroper Turbulenz, für welche die bisher entwickelten meteorologischen und akustischen Modelle nur eingeschränkt anwendbar sind.

#### **5 Danksagung**

Hiermit danken wir den Kollegen der AG Akustik/Fernerkundung vom Leipziger Institut für Meteorologie (LIM), insbesondere K. Arnold und A. Raabe, sowie M. Seliger und Studenten des LIM für die Unterstützung bei der Bereitstellung, Bearbeitung und Auswertung der experimentellen Daten. Besonderer Dank gilt G. Spindler und T. Conrath vom IfT Leipzig für die Möglichkeit, das Messgelände in Melpitz zu nutzen sowie für die Bereitstellung zusätzlicher Messdaten. Den Kollegen aus Ilmenau: R. de Puits, C.

Resagk, A. Thess sei gedankt für die Möglichkeit, Messungen im Ilmenauer Fass durchführen zu können, sowie für die Bereitstellung von Temperaturvergleichswerten.

Die Untersuchungen mit der Feldversion der akustischen Laufzeittomographie wurden vom Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung im Rahmen von AFO2000 (Verbundprojekt VERTIKO, Projektnummer: 07 ATF 37) unterstützt.