

Ein modulares Messsystem zur Demonstration akustisch tomographischer Verfahren

Manuela Barth, Armin Raabe

Institut für Meteorologie, Universität Leipzig, 04103 Leipzig, E-Mail: mbarth@uni-leipzig.de

Einleitung

Tomographische Verfahren sind eine weit verbreitete bildgebende Methode, um die physikalischen oder chemischen Eigenschaften in einem Gebiet zu analysieren ohne Sensoren direkt in dieses Gebiet einbringen zu müssen. Insbesondere sind solche Verfahren in der medizinischen Diagnostik unverzichtbar. Sie werden aber auch in zahlreichen anderen Anwendungsbereichen eingesetzt, bei denen aus Messungen der Eigenschaften einer Sondierungsenergie entlang unterschiedlicher Wege durch ein Gebiet auf räumliche Verteilungen einer Zielgröße geschlossen werden sollen.

So erlauben z. B. Messungen der Schallgeschwindigkeit in Luft Rückschlüsse auf die Größen Temperatur und Strömung entlang des Schallausbreitungsweges zu ziehen, da die Geschwindigkeit akustischer Signale im Wesentlichen von diesen beiden Größen abhängt. Durch eine Kombination von Schallgeschwindigkeitsmessungen entlang unterschiedlicher Wege durch ein definiertes Gebiet lassen sich mittels tomographischer Verfahren räumliche Verteilungen von Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit und -richtung ableiten. Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens, das als Akustische Tomographie (A-Tom) bezeichnet wird, ist die Skalierbarkeit, was eine Anwendung auf unterschiedlichsten Raumskalen ermöglicht.

In diesem Beitrag werden die Grundlagen des A-Tom Verfahrens beschrieben. Des Weiteren wird ein modulares Messsystem zur zeitgleichen Erfassung von Temperatur- und Strömungsverteilungen vorgestellt, mit dem

- tomographische Verfahren in Aus- und Weiterbildung demonstriert,
- innenraumklimatische Fragestellungen untersucht,
- aber auch atmosphärischer Parameter in der bodennahen Schicht für meteorologische Messungen erfasst werden können.

Theoretischer Hintergrund

Das Verfahren der akustischen Laufzeitomographie liefert räumliche Verteilungen von Temperatur und Strömung in einem Untersuchungsgebiet, die aus Messungen der Schalllaufzeit entlang unterschiedlicher Wege durch das Gebiet bei bekannter Anordnung von Schallsendern und Empfängern um das Gebiet herum abgeleitet werden.

Messprinzip

Das Messprinzip beruht auf der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft vom Zustand des Mediums (insbesondere der Temperatur) und den Strömungsverhältnissen entlang des Ausbreitungsweges akustischer Signale [1][2].

Bei bekannter Schallweglänge d und gemessener Laufzeit τ beträgt die effektive Schallgeschwindigkeit

$$c_{\text{eff}} = c_L + v_s = \frac{d}{\tau} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

Sie setzt sich aus einem vektoriellen Anteil, der Strömungsgeschwindigkeit in Schallausbreitungsrichtung v_s , zusammen und einem skalaren Anteil, der nur von der Temperatur abhängt, der adiabatischen (Laplaceschen) Schallgeschwindigkeit

$$c_L = \sqrt{401,87 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \cdot T_{\text{av}}} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

T_{av} bezeichnet hierbei die akustisch virtuelle Temperatur, die neben der Lufttemperatur T zu einem geringen Teil von dem in der Luft enthaltenen Wasserdampf (spezifische Feuchte q) abhängt

$$T_{\text{av}} = (1 + 0,51q)T \quad [\text{K}] \quad (3)$$

Um die beiden Einflussgrößen Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit zu trennen, werden reziproke Schallwege (Abb. 1) betrachtet.

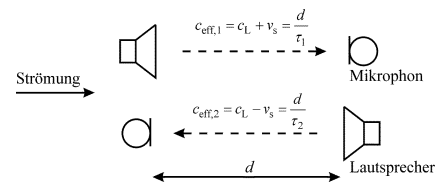


Abbildung 1: Betrachtung reziproker Schallausbreitung zur Trennung von skalarem Temperatur- und vektorielltem Strömungseinfluss.

Die Trennung kann für eine solche Geometrie durch Summation der effektiven Schallgeschwindigkeiten in entgegengesetzten Richtungen bzw. durch Differenzbildung entsprechend

$$c_L = \frac{c_{\text{eff},1} + c_{\text{eff},2}}{2} = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

$$v_s = \frac{c_{\text{eff},1} - c_{\text{eff},2}}{2} = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right)$$

erfolgen.

Empfindlichkeit

Die Schallgeschwindigkeit in trockener Luft beträgt bei 20 °C 343 m/s. Die Strömungsgeschwindigkeit wirkt additiv auf diesen Wert, d.h. breitet sich der Schall in Strömungsrichtung aus, erhöht sich die Schallgeschwindigkeit um den entsprechenden Betrag bzw. verringert sich, wenn die Schallausbreitung entgegengesetzt zur Strömung erfolgt.

Steigt/ sinkt die Temperatur entlang des Schallweges um 1 K, erhöht/ verringert sich die Schallgeschwindigkeit um 0,6 m/s. Nimmt hingegen bei 20 °C die spezifische Feuchte um 1 g/kg zu (dies entspricht einer Änderung der relativen Feuchte von 10%), nimmt die Schallgeschwindigkeit um nur 0,1 m/s zu.

Berechnung von Verteilungen

Die Berechnung der räumlichen Verteilungen aus Messungen der Schallgeschwindigkeit entlang unterschiedlicher Wege durch ein Gebiet erfolgt mit einem algebraisch tomographischen Verfahren, der simultanen iterativen Rekonstruktionstechnik (SIRT) [3]. Hierfür wird das Messgebiet zunächst in diskrete Gitterzellen unterteilt. Für eine gegebene Geometrie der Sender und Empfänger werden nun für eine angenommene Verteilung der Eigenschaften innerhalb des Gitters (Startverteilung für Temperatur und Strömung) Laufzeiten/ Strahlgeschwindigkeiten für alle Schallwege berechnet. Diese Werte werden den gemessenen Daten gegenübergestellt. Aus den Unterschieden werden Korrekturen für die Verteilungen bestimmt. Dieser iterative Prozess zur Verbesserung der Lösungsverteilungen wird so lange ausgeführt, bis ein Abbruchkriterium (z. B. maximale Anzahl an Iterationen) erreicht ist.

Experimentelle Umsetzung

Zur Anwendung der A-Tom, zur Demonstration tomographischer Verfahren und zum Test neuer Hard- und Softwarebestandteile wurde ein modulares Messsystem gebaut. Zur Steuerung der Messung (Festlegung der Messparameter), für die Laufzeitbestimmung durch Kreuzkorrelation zwischen Sende- und Empfangssignalen sowie zur Berechnung der Verteilungen wurde ein Softwarepaket in Matlab entwickelt.

Abbildung 2 zeigt einen beispielhaften Messaufbau im Labormaßstab für zweidimensionale Anwendungen (eine Anwendung des Systems zur dreidimensionalen Erfassung von Temperatur- und Strömungsfeldern ist in [4] beschrieben). Als Schallsignale werden Maximallängenfolgen (pseudostochastisches Rauschen [5]) eingesetzt. Für die Berechnung der räumlichen Verteilungen wurde die Messfläche in Teilflächen mit einer Größe von je $0,3\text{ m} \times 0,3\text{ m}$ unterteilt.

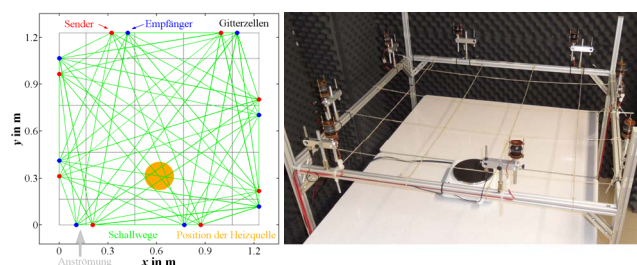


Abbildung 2: Experimentelle Umsetzung der Akustischen Laufzeitotomographie mit je 8 Schallsendern und Empfängern um eine Messfläche mit einer Ausdehnung von $1,23\text{ m} \times 1,23\text{ m}$.

Abbildung 3 zeigt schließlich Beispiele für während des Messprozesses rekonstruierte Verteilungen von Temperatur (links) und Strömung (rechts) zu jeweils einem Zeitpunkt

(zeilenweise) für unterschiedliche Bedingungen (lokale Heizung, inhomogene Anströmung der Messfläche). Änderungen der Bedingungen können dabei sofort am Rechner nachvollzogen und verfolgt werden.

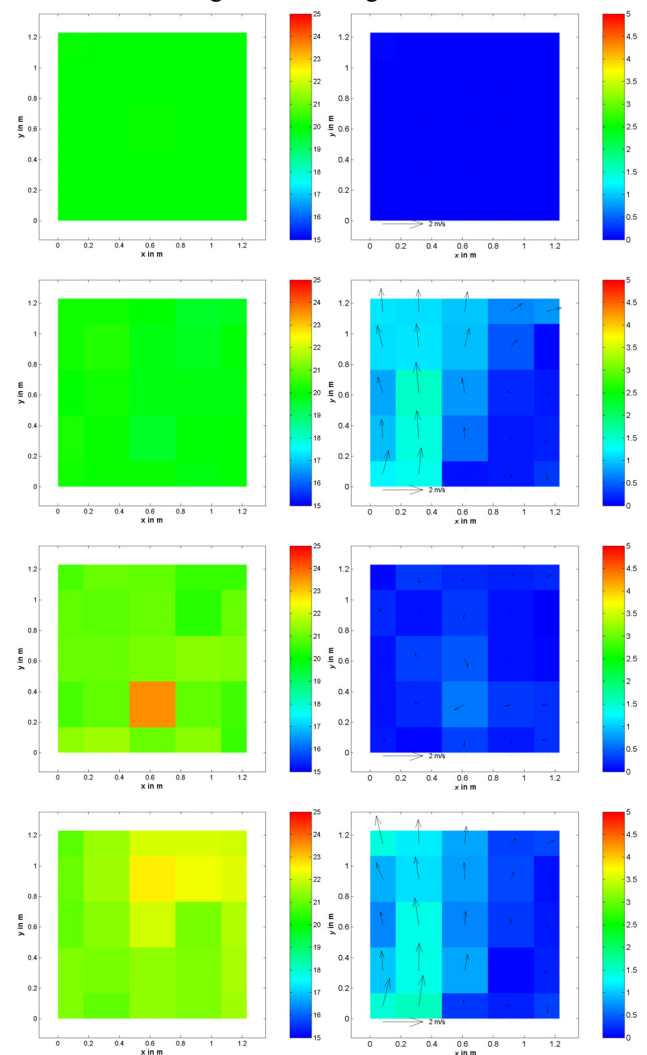


Abbildung 3: Beispiele für tomographisch rekonstruierte Verteilungen von Temperatur in °C (links) und Strömungsgeschwindigkeit in m/s (rechts) aus Laufzeitmessungen bei bekannter Anordnung von Schallsendern und Empfängern.

1. Zeile (oben): Referenzzustand (keine Temperaturinhomogenität, keine Strömung),
2. Z.: homogene Temperatur/ inhomogene Anströmung,
3. Z.: Temperaturinhomogenität/ keine Strömung,
4. Z.: Temperaturinhomogenität/ inhomogene Anströmung

Literatur

- [1] Pierce, A.D.: Acoustics. Acoustical Society of America, Melville, NY, 1989
- [2] Ostashev, V.E.: Acoustics in Moving Inhomogeneous Media. E&FN SPON, London, 1997
- [3] Kak, A.C. & M. Slaney: Principles of Computerized Tomographic Imaging. IEEE, New York, 1988
- [4] Barth, M & A. Raabe: Acoustic tomographic imaging of temperature and flow fields in air. Meas. Sci. Technol. 22 (2011), 035102 (13pp)
- [5] Golomb, S.: Shift Register Sequences. Aegean Park Press, Walnut Creek, CA, 1982