

# Akustische Tomographie zur gleichzeitigen Bestimmung von Temperatur- und Strömungsfeldern in Innenräumen

M. Barth, A. Raabe

## Zusammenfassung

Das Verfahren der akustischen Laufzeit-tomographie nutzt die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von den Parametern Temperatur und Strömung entlang des Ausbreitungsweges akustischer Signale, um diese Parameter zu bestimmen. Es wird ein Algorithmus vorgestellt, der eine tomographische Rekonstruktion der 2-dimensionalen Strömungsfelder innerhalb eines Messgebietes erlaubt, wobei die räumliche Auflösung des Vektorfeldes der Auflösung des Temperaturfeldes entspricht. Neben Ergebnissen von Simulationen verschiedener Strömungssituationen wird eine Anwendung vorgestellt, welche die Anwendbarkeit des Verfahrens zur Detektion von Strömungs- und Temperaturverteilung in einem abgeschlossenen Raum demonstriert.

## Abstract

Acoustic travel time tomography uses the dependency of sound speed from temperature and flow properties along the propagation path to measure these parameters. An algorithm is introduced which is capable of resolving the two-dimensional flow field within a certain measuring area comparable to the resolution of the temperature field. Different flow fields have been simulated in order to show the reconstruction properties of the algorithm. Furthermore an experiment has been carried out, which demonstrates the applicability of the acoustic tomographic method to detect temperature and flow fields indoor.

## 1. Einleitung

Informationen über Strömung und Temperatur in einem bestimmten Gebiet werden häufig gewonnen, indem ein Sensor in das Messgebiet eingebracht wird und Daten an einem bestimmten Punkt aufgezeichnet werden. Eine Kombination von Punktmessungen an verschiedenen Orten innerhalb des Messgebietes soll dabei Informationen über die Verteilung der Größen in einem inhomogenen Gebiet liefern. Eine räumliche Verteilung kann damit zwar abgeschätzt werden, Kenntnisse über die Repräsentativität der Einzelwerte für einen bestimmten Messbereich fehlen jedoch oft und eine Störung des Untersuchungsgebietes durch die Sensoren selbst kann nicht ausgeschlossen werden.

Eine Datenerfassung ohne Beeinflussung des Messgebietes kann mittels Fernerkundungsverfahren geschehen. Bei diesen Verfahren werden Signale analysiert, wobei diese entweder aktiv ausgesendet und durch bestimmte Eigenschaften innerhalb des Messgebietes modifiziert werden (aktive Fernerkundungsverfahren) oder es werden natürlich auftretende Signale analysiert, die im Messgebiet selbst erzeugt und modifiziert werden oder dieses durchlaufen und dabei mit dem Medium wechselwirken (passive Fernerkundungsverfahren).

Ein aktives Fernerkundungsverfahren für meteorologische Fragestellungen stellt die akustische Laufzeit-tomographie dar (s. z.B. Ziemann et al., 2002). Dieses Verfahren nutzt die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit akustischer Signale in einem Medium von dessen Eigenschaften, um diese zu bestimmen. Für atmosphärische Betrachtungen (Medium Luft) sind Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit entlang des Ausbreitungsweges die Haupteinflussgrößen, welche die Schallausbreitungsgeschwindigkeit beeinflussen. Diese Abhängigkeit, die zur Ortung von Schallquellen als Störgrößen korrigiert werden müssen (s. z.B. Spiesberger und Fristrup, 1990), dienen im Rahmen der akustischen Laufzeit-tomographie als Messsignal. Bei diesem Verfahren werden akustische Signale erzeugt, ausgesendet und emp-

fangen. Aus den Laufzeiten dieser Signale lässt sich bei bekanntem Schallausbreitungsweg die Schallgeschwindigkeit berechnen. Diese wiederum lässt Rückschlüsse auf die Eigenschaften entlang des Ausbreitungsweges zu. Betrachtet man Messungen entlang verschiedener Ausbreitungswege, die über ein definiertes Messgebiet verteilt sind, kann man mittels tomographischen Inversionstechniken auf eine räumliche Verteilung der Parameter im Untersuchungsgebiet schließen. Die Anwendbarkeit des Verfahrens beschränkt sich dabei nicht nur auf Freifeldmessungen (Ausbreitungsweg bis 500 m), sondern ist in einer skalierten Variante auch auf kleinerer Skala, z. B. in Innenräumen, anwendbar (Holstein et al., 2004).

## 2. Schallausbreitung in Luft

Grundlage für die Bestimmung von Strömung und Temperatur aus akustischen Sondierungen ist die Messung der effektiven Schallgeschwindigkeit  $c_{eff}$  entlang des Ausbreitungsweges. Diese beinhaltet den skalaren Einfluss der Temperatur (feuchteabhängige akustisch virtuelle Temperatur  $T_{av}$ ) als auch den vektoriellen Einfluss der Strömung (Strömungsvektors entlang des Ausbreitungsweges  $v$ ) auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines akustischen Signals, wobei beide Größen zeit- ( $t$ ) und ortsabhängige ( $r$ ) Variablen darstellen

$$c_{eff}(T_{av}, v) = c(T_{av}(r, t)) + v(r, t) \quad (1)$$

Bei bekannter Schalllaufweglänge  $s_{Weg}$  kann der Betrag der effektiven Schallgeschwindigkeit entlang des Schallausbreitungsweges mittels gemessener Schalllaufzeit  $t_{Weg}$  berechnet werden

$$c_{eff} = \frac{s_{Weg}}{t_{Weg}} \quad (2)$$

Zur Trennung der Einflussgrößen Temperatur und Wind wird der vektorielle Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit ausgenutzt. Eine Erhöhung der effektiven Schallgeschwindigkeit entlang des Ausbreitungsweges in Strömungsrichtung steht einer Verringerung in Gegenwindrichtung mit demselben Betrag gegenüber. Durch Summation bzw. Subtraktion der effektiven Schallgeschwindigkeiten entlang der entgegengesetzten Schallausbreitungswege (Hin- und Rückweg) ergibt sich für den temperaturabhängigen Anteil bzw. die Strömung

$$c(T_{av}) = \frac{s_{Weg}}{2} \left( \frac{1}{t_{Weg, hin}} + \frac{1}{t_{Weg, rück}} \right) \text{ bzw. } v = \frac{s_{Weg}}{2} \left( \frac{1}{t_{Weg, hin}} - \frac{1}{t_{Weg, rück}} \right) \quad (3)$$

Der Zusammenhang zwischen der temperaturabhängigen Schallgeschwindigkeit  $c(T_{av})$  und der akustisch virtuellen Temperatur  $T_{av}$ , wird durch die Gleichung

$$c^2 = \gamma_{tr} \cdot R_{tr} \cdot T_{av}, \text{ wobei } T_{av} = T(1 + 0,513q) \quad (4)$$

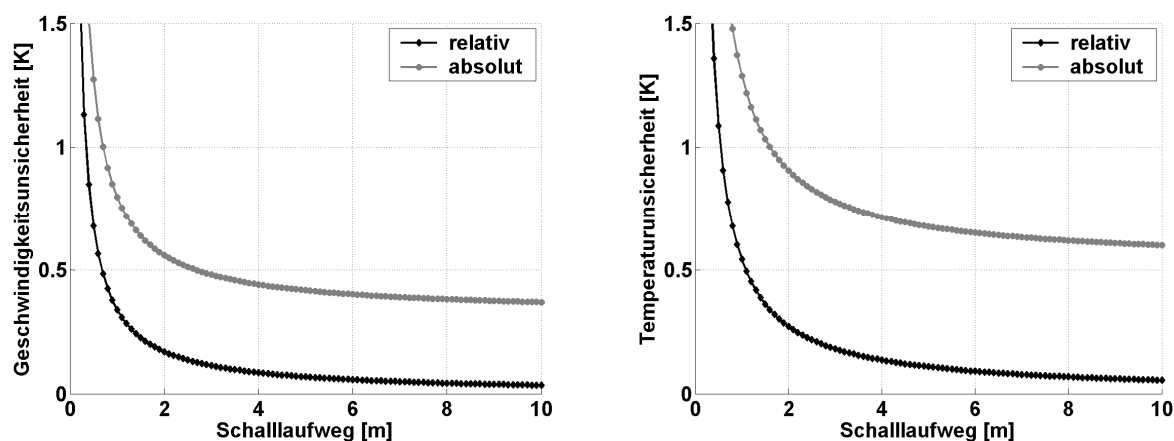
beschrieben, wobei die atmosphärischen Parameter  $R_{tr}$  (spezifische Gaskonstante trockener Luft) bzw.  $\gamma_{tr}$  (Verhältnis der Wärmekapazitäten von Luft bei konstantem Druck und konstantem Volumen) die Werte  $287,05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  bzw. 1,4 annehmen. Sowohl die spezifische Gaskonstante als auch das Verhältnis der Wärmekapazitäten sind von der aktuellen Gaszusammensetzung abhängig. Die Zusammensetzung der trockenen Atmosphäre ist in dem betrachteten Skalenbereich konstant, einzig der Wasserdampfgehalt variiert im Bereich von wenigen Prozent. Um jedoch die Lufttemperatur für beliebige Feuchteanteile aus der Schallgeschwindigkeit mit den Parameterwerten für trockene Luft berechnen zu können, wird eine feuchteabhängige Korrektur (spezifische Feuchte  $q$ ) durchgeführt.

Für die Umrechnung der akustisch virtuellen Temperatur in einen feuchteunabhängigen Temperaturwert, muss folglich zusätzlich die Feuchte bestimmt werden. Da die räumliche Variabilität dieser Größe jedoch deutlich geringeren Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit hat, als die Variabilität von Temperatur und Strömung, ist es ausreichend, die Feuchtekorrektur an-

hand eines einzigen Feuchtemesswertes, der zusätzlich zu den akustischen Messungen innerhalb der Messfläche gewonnen wurde, durchzuführen.

### 3. Genauigkeitsabschätzungen

Die Genauigkeit bei der Bestimmung von Verteilungen der Temperatur und Strömung in einem Messgebiet wird maßgeblich durch die Güte bei der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit entlang der Schallausbreitungswege beeinflusst. Diese wiederum ist abhängig von der Messgenauigkeit bei der Bestimmung der Schallweglänge (Positionen der Schallsender und Empfänger bei geradliniger Schallausbreitung) als auch der Laufzeit der akustischen Signale. Derzeit kann die Laufzeit mit einer Genauigkeit von ca.  $3 \mu\text{s}$  gemessen werden, woraus sich die in Abbildung 1 (links) dargestellten Unsicherheiten für die Bestimmung der Geschwindigkeit ergeben.



**Abbildung 1: Unsicherheiten bei der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit aus der Laufzeit akustischer Signale in Abhängigkeit von der Schallweglänge (links) und sich daraus ergebende Unsicherheiten für die Temperaturbestimmung entlang der Schallausbreitungswege (rechts). Dargestellt sind absolute Unsicherheiten (grau), welche sich aus dem gekoppelten Einfluss der Unsicherheiten bei der Laufweg- als auch der Laufzeitbestimmung ergeben. Relative Änderungen (schwarz) beziehen sich auf eine Anfangsmessung unter bekannten homogenen Bedingungen (keine Temperaturunterschiede, keine Strömung), wodurch eine Laufwegkorrektur vorgenommen werden kann, so dass die Unsicherheiten bei der Laufwegbestimmungen vernachlässigt werden können.**

Hierbei wird unterschieden, ob die Messungen absolut (graue Linie) oder relativ zu einer Anfangsverteilung (schwarze Linie) erfolgen. Absolute Unsicherheiten bezeichnen hierbei eine unabhängige Messung, bei der sowohl Unsicherheiten bei der Bestimmung der Laufzeit- als auch der Laufwege betrachtet werden müssen. Betrachtet man relative Änderungen bezüglich eines Anfangswertes für die effektive Schallgeschwindigkeit (bekannte homogene Temperaturverteilung ohne Strömung), kann die Unsicherheit der Laufwegbestimmung vernachlässigt werden.

Aus den Unsicherheiten bei der Geschwindigkeitsbestimmung ergeben sich die auf der rechten Seite dargestellten Unsicherheiten für die Temperaturbestimmung entlang der einzelnen Schallstrahlen in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Sendern und Empfängern.

### 4. Tomographische Rekonstruktion von Verteilungen

Als Tomographie werden bildgebende Verfahren bezeichnet, mit deren Hilfe aus Messwerten, die entlang verschiedener Ausbreitungswege durch ein Medium erfasst wurden, Schnittbilder durch das Medium erzeugt werden. Analysierbare Informationen über das Medium werden dabei aus den Wechselwirkungen der Sondierungsenergie mit dem Medium selbst gewonnen (z. B. Dämpfung, Signallaufzeit).

Wie in Abschnitt 2 dargestellt, wirken sich Temperatur und Strömung auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit akustischer Signale in Luft aus. Aus Laufzeitmessungen entlang verschiedener, möglichst homogen verteilter Schallausbreitungswege lassen sich mittels tomographischer Verfahren zweidimensionale Verteilungen dieser Größen bestimmen, wobei zunächst eine Trennung zwischen dem skalaren Einfluss der Temperatur und dem vektoriellen Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die einzelnen Laufzeitmessungen erfolgen muss.

Für die tomographische Rekonstruktion wird das Messgebiet zunächst in Teilflächen unterteilt und die Eigenschaften entlang der Schallstrahlen (Temperatur oder Strömung) auf diese Teilflächen rückprojiziert. Die Rekonstruktion der skalaren Größe Temperatur erfolgt in Abhängigkeit der Strahlstückabschnitte pro Gitterzelle für jeden Schalllaufweg. Für die Rekonstruktion des Strömungsfeldes werden die Vektorkomponenten (x- und y-Richtung) getrennt betrachtet und in Abhängigkeit von der Ausbreitungsrichtung analysiert.

Hierbei muss ein Gleichungssystem zwischen den bekannten Schallstrahleigenschaften  $l_{ij}$  entlang des  $i$ -ten Schallstrahls innerhalb der  $j$ -ten Tomographiegitterzelle und den Messwerten  $\tau_i$  gelöst werden, um die gesuchten Parameter  $p_j$  für alle  $N$  Gitterzellen zu erhalten.

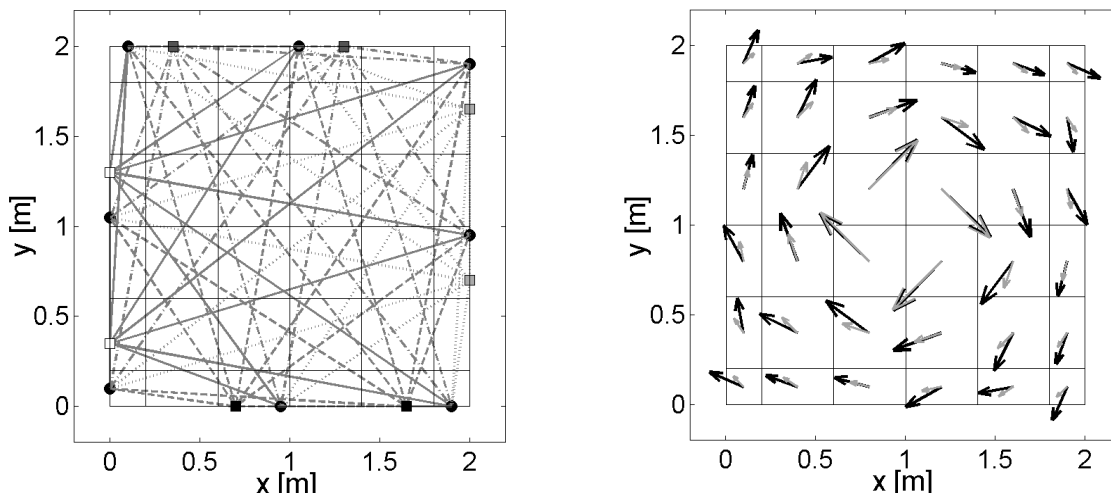
$$\tau_i = \sum_{j=1}^N p_j \cdot l_{ij} \quad (5)$$

Die Messgrößen  $\tau_i$  entsprechen für die Temperaturrekonstruktion der Schalllaufzeit der Signale, die vom Strömungseinfluss getrennt wurden. Die Schallstrahleigenschaften  $l_{ij}$  beschreiben die Schallweglänge des  $i$ -ten Schallstrahls in der  $j$ -ten Gitterzelle, unabhängig von dessen Ausbreitungsrichtung. Errechnet werden in diesem Fall inverse Schallgeschwindigkeiten (Langsamkeiten)  $p_j$  für alle  $N$  Gitterzellen, welche nach Gleichung (4) in Temperaturwerte innerhalb der entsprechenden Gitterzelle umgerechnet werden können.

Für die Strömungsrekonstruktion dienen als Messgrößen  $\tau_i$  die Geschwindigkeitskomponenten in x- bzw. y-Richtung entlang der Schallstrahlen, die nach Gleichung (3) von der effektiven Schallgeschwindigkeit separiert wurden. Im Strömungsfall werden die Schallstrahlabschnitte bezüglich ihrer Richtungsanteile gewichtet (x- und y-Richtungsanteil des betrachteten Schallstrahls in der entsprechenden Gitterzelle) betrachtet. Die tomographisch errechneten Parameter  $p_j$  entsprechen dann sofort den Strömungskomponenten innerhalb der  $N$  Gitterzellen.

In Abbildung 2 sind die Rekonstruktionseigenschaften des neu implementierten Algorithmus für die Vektorfeldtomographie an einem Beispiel dargestellt. Für die Simulation wurde ein hochaufgelöstes Wirbelströmungsfeld erzeugt, welches entsprechend der Schallstrahlverläufe in Strömungskomponenten entlang der Schallstrahlen umgerechnet wurde.

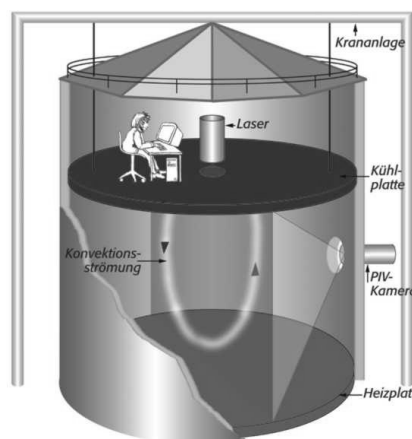
Für die Rekonstruktion der Verteilung wurde ein Gitter über das Messgebiet gelegt (links), in welchem die simulierten Strömungskomponenten rekonstruiert wurden. Das Ergebnis der Rekonstruktion ist rechts dargestellt. Im Vergleich zu den Rekonstruktionsergebnissen (schwarze Pfeile) ist ebenfalls das vorgegebene simulierte Strömungsfeld gezeichnet, welches auf das Rekonstruktionsgitter gemittelt wurde (graue Pfeile). In den zentralen Gitterzellen ist eine deutliche Übereinstimmung zwischen Schallgeschwindigkeit und -richtung zu erkennen, während die Randbereiche stärkere Abweichungen von den Vorgaben zeigen, was insbesondere durch die geringere Schallweglänge für die verschiedenen Vektorkomponenten begründet liegt.



**Abbildung 2:** Links: Schematische Darstellung eines vorgegebenen symmetrischen Versuchsaufbaus mit Lage der Sender (Kästchen) und Empfänger (Kreise) am Rand des Untersuchungsgebietes und sich aus dem Aufbau ergebenden Schallstrahlverläufen. Die senkrechten und waagerechten Linien markieren die Gitterzellen mit einer Seitenlänge von je 0,4 m. Rechts: Vergleich zwischen vorgegebenem und auf die Gittergröße gemitteltem Strömungsfeld (graue Pfeile) mit dem rekonstruierten Strömungsfeld (schwarze Pfeile) im Tomographiegitter.

**5. Anwendung der Strömungsrekonstruktion: Ilmenauer Fass**

Eine erste experimentelle Umsetzung zur tomographischen Rekonstruktion von Strömungsfeldern erfolgte in einem Raum der TU Ilmenau, dem Ilmenauer Fass. Das Ilmenauer Fass (Abb. 3; s. z.B. Ilmenauer Fass online, 2005) bezeichnet einen Versuchsaufbau zur Untersuchung von Konvektionsphänomenen. Es besteht aus einem abgeschlossenen Raum mit einem Durchmesser von ca. 7 m, der nach unten durch eine beheizbaren Platte fest abgeschlossen ist. Die obere Begrenzung bildet eine frei aufgehängte Kühlplatte, mit welcher die Höhe des Volumens (maximal etwa 7 m) variiert werden kann. In Abhängigkeit von den thermischen Bedingungen und vom Verhältnis zwischen Breite und Höhe des betrachteten Volumens bilden sich charakteristische Strömungsmuster aus, die sich in Intensität und Art unterscheiden (Qiu und Tong, 2001).



**Abbildung 3:** Ansicht des Ilmenauer Fasses von außen (links) sowie Prinzipskizze von Aufbau und Funktionsweise des Konvektionsexperiments „Ilmenauer Fass“ (aus: Ilmenauer Fass, 2005)

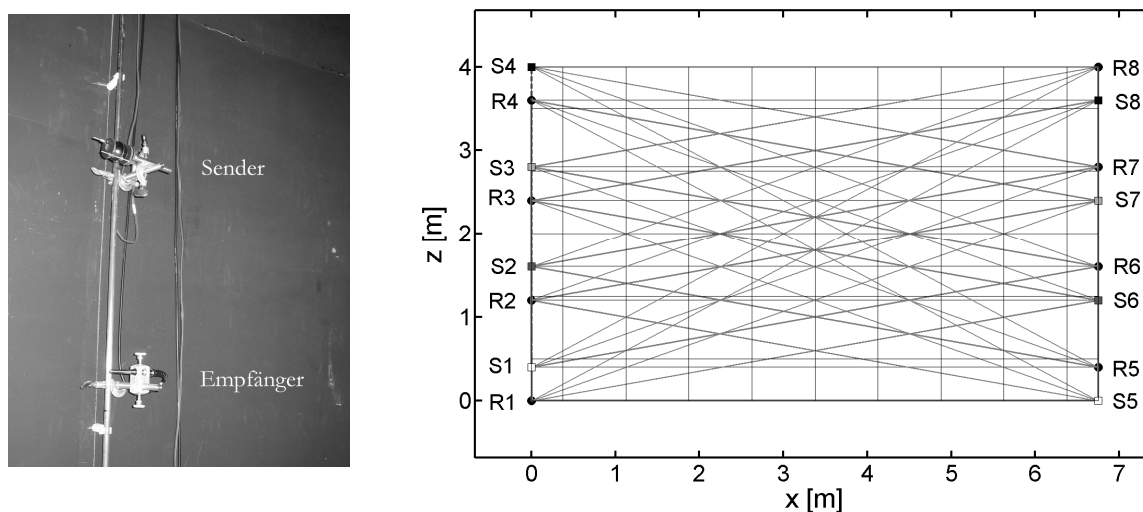
Ziel des Experiments war die gleichzeitige Erfassung von Temperatur- und Strömungsverteilung mittels akustischer Laufzeittomographie. Insbesondere sollte die Anwendung der Mess-

technik zeigen, dass eine tomographische Rekonstruktion des Strömungsfeldes mit derselben räumlichen Auflösung wie die Rekonstruktion der Temperaturverteilung möglich ist.

Im Rahmen der Untersuchung verschiedener Eigenschaften des Ilmenauer Fasses waren unter differenzierten Versuchsbedingungen (Plattenabstand, Temperaturgradient) Messdaten erfasst und analysiert worden (z. B. Resagk et al., 2004). Diese Messungen umfassten u.a. die Analyse der Strömungsmuster mit sehr zeitintensiven optischen Verfahren (LDA: Laser-Doppler-Anemometer), als auch die Bestimmung der vertikalen Temperaturstruktur im Ilmenauer Fass mittels Punktmessungen. Die Kenntnis der Strömungsrichtung wurde ausgenutzt, um die (2-dimensionale) Versuchsanordnung zur akustischen Tomographie in der Fläche maximaler Strömung zu platzieren. Die Temperaturanalysen sagten voraus, dass innerhalb der Kammer kaum Temperaturgradienten nachweisbar sind, wenn sich das System nach der Aufwärmphase in einem quasistationären Zustand befindet, da die Temperaturgradienten innerhalb einer solchen Konvektionskammer auf eine Grenzschicht beschränkt sind, deren Dicke nur wenige Millimeter beträgt (Belmonte et al., 1994).

### 5.1. Messaufbau

Die Anordnung der Schallsender und Empfänger zur Bestimmung der Verteilungen von Temperatur und Strömung im Ilmenauer Fass erfolgte an Rohren, die an vertikalen, sich gegenüberliegenden Begrenzungsflächen im erwarteten Hauptluftstrom befestigt waren (Abb. 5, links). Die Anordnung der Schallsender und Empfänger wurde derart gestaltet, dass eine Trennung zwischen dem Einfluss der Temperatur und der Strömung auf die Schallausbreitungsgeschwindigkeit durch die Betrachtung paralleler Streckenpaare möglich war.



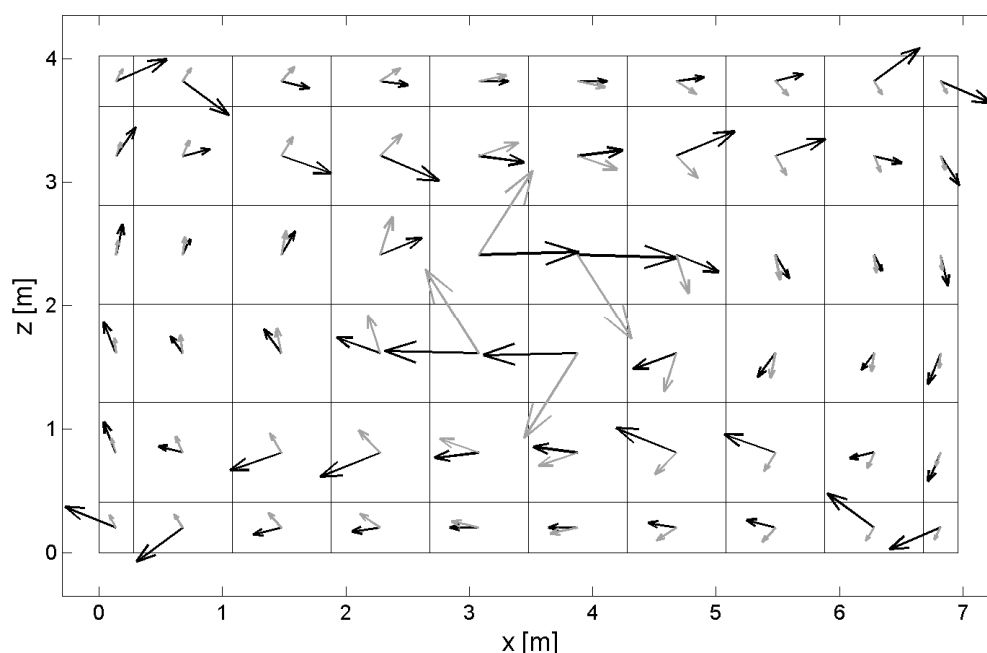
**Abbildung 4:** Links: Sender und Empfänger zur akustisch tomographischen Bestimmung der Verteilungen von Strömung und Temperatur im Ilmenauer Fass. Rechts: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus im Ilmenauer Fass bestehend aus 8 Sendern (S1...S8) und 8 Empfängern (R1...R8) sowie der resultierenden Schallausbreitungswege (graue Linien). Die Seitenlänge einer Gitterzelle für die Rekonstruktion beträgt 0,8 m (durchgezogene Linien).

Die Messfläche hatte eine effektive Ausdehnung von etwa 4 m Höhe und 7 m Breite. Der Abstand der Messfläche zum Boden betrug ca. 0,4 m und der Abstand zur oberen Begrenzung ca. 1 m. Für die tomographische Rekonstruktion der Luftparameter (Temperatur und Strömung) wurde das Messgebiet in 60 Flächenelemente unterteilt, die (mit Ausnahme des Randbereichs) jeweils eine Größe von 0,8 m × 0,8 m aufwiesen. Ein Schema des Versuchsaufbaus mit der Lage der Schallsender und Empfänger (Kreise und Rechtecke am Messfeldrand) den

sich ergebenden Schallstrahlenverläufen und der Aufteilung des Messgebietes in Teilflächen zur tomographischen Rekonstruktion ist in Abbildung 4 (rechts) dargestellt.

## 5.2. Simulation rekonstruierter Strömungsfelder

Um eine Abschätzung der Rekonstruktionsgenauigkeit des tomographischen Algorithmus bei der Berechnung des Strömungsfeldes im Ilmenauer Fass treffen zu können, wurde mit synthetischen Daten getestet, wie sich der Messaufbau auf die rekonstruierten Strömungsfelder auswirkt. Hierfür wurde zunächst ein räumlich hochaufgelöstes Strömungsmuster simuliert, dessen Eigenschaften der zu erwartenden Strömungssituation im Ilmenauer Fass (Ausbildung einer Konvektionsströmung) entspricht. Dieses Strömungsfeld wurde entsprechend des gewählten Aufbaus der Schallsender- und Empfänger (s. Abb. 5, rechts) in Strahlinformationen umgerechnet, die als Eingangsgrößen für den tomographischen Algorithmus dienten. Ein Vergleich zwischen dem vorgegebenem Strömungsmuster (gemittelt auf Tomographiegittergröße, graue Pfeile) und dem tomographisch rekonstruierten Feld (schwarze Pfeile) ist in Abbildung 5 dargestellt.



**Abbildung 5: Analyse zur Rekonstruktionsgenauigkeit des Algorithmus zur Vektortomographie am Beispiel der Anwendung im Ilmenauer Fass mit vorgegebenen Sender- und Empfängerpositionen (vgl. Abb. 5, rechts). Das vorgegebene Strömungsfeld wurde mit hoher räumlicher Auflösung synthetisch erzeugt und entsprechend des Tomographiegitters gemittelt (graue Pfeile). Die aus den Strahlinformationen abgeleiteten und rekonstruierten Strömungseigenschaften sind durch schwarze Pfeile gekennzeichnet.**

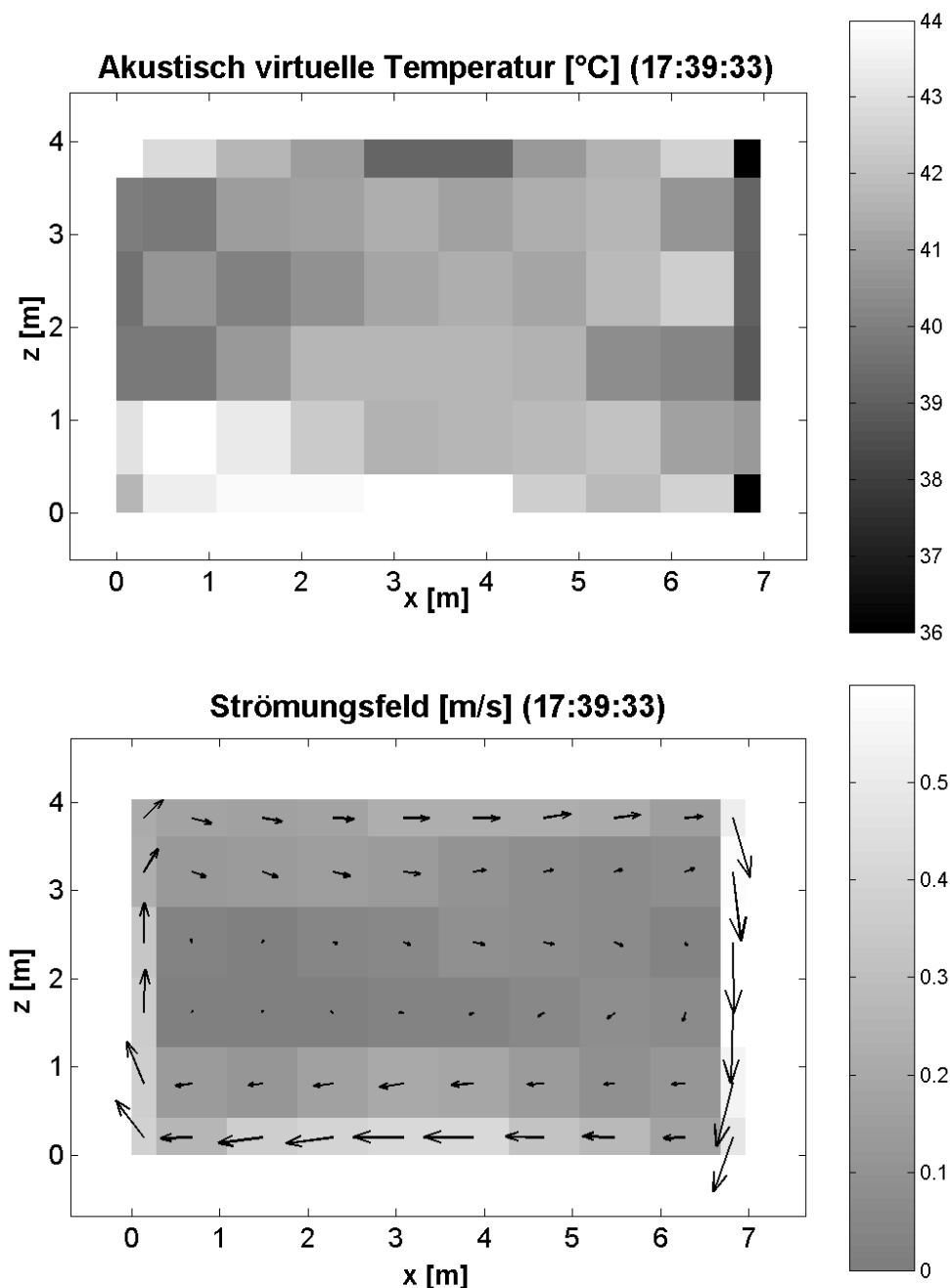
Der Verlauf der Strömung (im Uhrzeigersinn) stimmt zwischen vorgegebenem und rekonstruiertem Strömungsfeld überein. Ebenfalls überein stimmen in weiten Teilen die Beträge der Zellenwerte der Strömung.

Dennoch ist auffällig, dass insbesondere im zentralen Teil des Gitters deutliche Abweichungen der Strömungsrichtungen auftreten, die sich, abgeschwächt, ebenfalls nach oben und unten fortsetzen. Ursache hierfür ist die ungleiche Überdeckung des Messgebietes mit Schallstrecken. Aufgrund der Gegebenheiten im Ilmenauer Fass konnten die Schallsender und Empfänger für dieses Experiment ausschließlich an den Seitenwänden montiert werden. Ein deutlich größerer Anteil der Schallstrahlen verlief daher in horizontaler Richtung, während deutlich weniger Informationen in vertikaler Richtung ausgewertet werden konnten.

Diese Artefakte, die sich aus dem Aufbau des Messsystems ergeben, sind bei der Bewertung und Beurteilung der rekonstruierten gemessenen Strömungsfelder zu beachten.

### 5.3. Rekonstruktion von Temperatur- und Strömungsfeldern

Zunächst wurden die beiden Einflussgrößen auf die Schallgeschwindigkeit, Temperatur und Strömung, getrennt und anschließend die Verteilungen dieser Größen für das vorgegebene Gitter tomographisch rekonstruiert. Abbildung 6 zeigt je ein Tomogramm von Temperatur (oben) und Strömung (unten) im Ilmenauer Fass, welche aus den Laufzeitmessungen zu einem Zeitpunkt berechnet wurden. Die Messung erfolgte während der Aufheizung im Fassinneren, einem Zeitbereich, in dem sich noch keine stationären Bedingungen eingestellt hatten.



**Abbildung 6: Tomographisch rekonstruierte Verteilungen der akustisch virtuellen Temperatur (oben, Grauskala in °C) und der Strömungsverhältnisse (unten, Grauskalierung: Geschwindigkeitsbetrag in m/s, Pfeile: Strömungsrichtung) aus einer akustischen Messung während der Erwärmung im Inneren des Ilmenauer Fasses.**

Das obere Tomogramm in Abbildung 6 stellt die Temperaturverteilung innerhalb des Messgebietes in °C dar. Hierbei wird deutlich, dass der untere Bereich, in dessen Nähe sich die Heizfläche befindet, wärmer ist als der obere Bereich, der in Kühlplattennähe ist. Dies wird



insbesondere während der Aufwärmphase deutlich. Befindet sich das System im stationären Gleichgewicht, sind die Temperaturunterschiede innerhalb der Messfläche minimal (ohne Abbildung), was mit den Ergebnissen der Analyse der Temperaturprofile mittels Punktmessungen im „Ilmenauer Fass“ übereinstimmt. Des Weiteren fällt auf, dass die Temperaturabnahme mit der Höhe nicht gleichmäßig erfolgt, sondern dass insbesondere in der linken unteren Ecke eine höhere Temperatur nachweisbar ist, als auf der rechten Seite in gleicher Höhe. Dies lässt sich mit dem Strömungsmuster in der Kammer begründen, was in Abb. 6 unten zur gleichen Zeit, gewonnen aus den akustischen Messungen, dargestellt ist. Deutlich sichtbar ist der Wirbel (Pfeile zeigen in Bewegungsrichtung), der sich im Uhrzeigersinn dreht. Ebenfalls ist ersichtlich, dass die Geschwindigkeiten (Grauskala: Geschwindigkeitsbetrag in m/s) in den Randbereichen des Messfeldes größer sind, als im Zentrum. Ursache hierfür ist die Umlenkung der Strömung an den Seitenwänden und der fortwährende Antrieb der Konvektion durch die Temperaturgegensätze zwischen Boden und Decke. Im Inneren des Ilmenauer Fasses herrschen geringe Geschwindigkeiten vor, die nahe an der aktuellen Nachweisgrenze des Verfahrens für Strömungen (ca. 0,15 m/s für Relativmessungen bei den betrachteten Schallweglängen, vgl. Abb. 1) und darunter liegen.

Des Weiteren zeigt das Strömungsfeld im mittleren Bereich sowohl am Oberrand, als auch im unteren Bereich des Tomogramms eine Strömungstendenz zum Zentrum des Raumes hin. Dieses Ausbeulen zur Mitte hin tritt jedoch auch beim Tomogramm der synthetischen Datensätze (Abb. 7) auf und deutet auf die Auswirkungen der Messgeometrie hin.

## 6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die experimentelle Umsetzung der akustischen Laufzeittomographie im Ilmenauer Fass hat gezeigt, dass das Verfahren in der Lage ist, Temperatur- und Strömungsfelder zeitgleich zu erfassen. Der geringe zeitliche Aufwand im Vergleich zu anderen Verfahren, mit denen z.B. Profile innerhalb solcher Räume gewonnen werden, stellt eine Stärke der akustischen Tomographie dar. Des Weiteren zeichnet sich das Verfahren durch eine nahezu störungsfreie Datenerfassung aus, da das Messgebiet nicht durch das Einbringen von Sensoren beeinflusst wird.

Da insbesondere die Rekonstruktionsgenauigkeit des (vektoriellen) Strömungsfeldes von der Anordnung der Sender und Empfänger und einer gleichmäßigen (Winkel-) Überdeckung des Messgebietes mit Schallstrahlen abhängt, ist bei der Planung des Messaufbaus auf eine entsprechende Verteilung der Schallsender und Empfänger zu achten. Ist eine freie Wahl der Positionen durch lokale Gegebenheiten nicht möglich, sollten vor der Interpretation von Messergebnissen synthetische Daten erzeugt und anhand der verwendeten Messgeometrie rekonstruiert werden, um durch die Messgeometrie hervorgerufene Artefakte einschätzen und mit einem geeigneten Verfahren eliminieren zu können.

Es ist denkbar, ein solches System zur dauerhaften Überwachung von Temperatur- und Strömungsfeldern in Innenräumen fest zu installieren. Hierfür ist die Erweiterung des derzeitigen 2-dimensionalen Rekonstruktionsalgorithmus für eine 3-dimensionale Rekonstruktion vorgesehen. Diese soll es erlauben, Temperatur- und Strömungsfelder ohne Vorkenntnisse ihrer Struktur in einem Volumen zu erfassen. Insbesondere in Innenräumen kann dabei genutzt werden, dass die Sensoren direkt an den Begrenzungsflächen des Raumes angebracht und die direkten Schallausbreitungswege innerhalb des Volumens betrachtet und analysiert werden können.

Um eine weitere Reduktion der Sensoren zu erreichen, bzw. die Genauigkeit der räumlichen Auflösung bei gleicher Sensorenzahl zu erhöhen, ist es denkbar, indirekte Schallausbreitungswege mit Reflexionen an Begrenzungsflächen zu analysieren. Hierfür ist es nötig, ein Schallausbreitungsmodell mit dem akustischen System zu koppeln, um die Ausbreitungswege reflektierter Strahlen zu berechnen und für die tomographische Rekonstruktion nutzen zu können.

## Danksagung

Zunächst wollen wir uns für die Möglichkeit, in der Konvektionskammer „Ilmenauer Fass“ Messungen durchführen zu können, bei den Mitarbeitern der TU Ilmenau, insbesondere bei R. du Puits und C. Resagk, bedanken. Für die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der Messungen bedanken wir uns bei M. Seliger und K. Arnold.

## Literatur

- Belmonte, A., A. Tilgner, A. Libchaber, 1994: Temperature and velocity boundary layers in turbulent convection. *Physical Review E*, **50**, 1, S. 269-279.
- Holstein, P., A. Raabe, R. Müller, M. Barth, D. Mackenzie, E. Starke, 2004: Acoustic tomography on the basis of travel-time measurements. *Meas. Sci. Technol.*, **15**, S. 1420-1428.
- Ilmenauer Fass online im Internet (November 2005): <http://www.tu-ilmenau.de/ilmenauer-fass>
- Qiu, X.-L., P. Tong, 2001: Large-scale velocity structures in turbulent thermal convection. *Physical Review E*, **64**, 3, S. 036304-1 - 036304-13.
- Resagk, C., R. du Puits, A. Thess, F. H. Busse, A. Tilgner, 2004: Velocity and temperature measurements in a large-scale Rayleigh-Bénard experiment using LDA and micro thermistors. *12th Int. Symp. Appl. Laser Techniques to Fluid mechanics*, Lisbon.
- Spiesberger, J. L., K. M. Fristrup, 1990: Passive localization of calling animals and sensing of their acoustic environment using acoustic tomography. *Am. Nat.*, **135**, S. 107-153.
- Ziemann, A., K. Arnold, A. Raabe, 2002: Acoustic Tomography as a Remote Sensing Method to Investigate the Near-Surface Atmospheric Boundary Layer in Comparison with In Situ Measurements. *J. Atmos. Ocean. Techn.*, **19**, S. 1208-1215.

## Adresse der Autoren

Stephanstraße 3, 04103 Leipzig (mbarth@uni-leipzig.de)