

Tomografische Rekonstruktion der Raumtemperaturverteilung aus einer Raumimpulsantwort

M. Bleisteiner⁺, M. Barth*, A. Raabe*, P. Holstein**

⁺) *Fachgebiet Audiokommunikation, TU Berlin, Einsteinufer 17, 10587 Berlin,
E-Mail: marcus.bleisteiner@gmail.com*

^{*}) *Institut für Meteorologie, Universität Leipzig, Stephanstr. 3, 04103 Leipzig
E-Mail: raabe@uni-leipzig.de*

^{**}) *SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, Nauendorfer Str. 2, 06112 Halle (Saale)*

Summary

Temperature can be estimated by acoustic propagation time measurements along known sound paths. By using a multitude of known sound paths in combination with a tomographic reconstruction technique a spatial and temporal resolution of the temperature field can be achieved. Based on it, this article focuses on an experimental method in order to determine the spatially differentiated development of room temperature with only one loudspeaker and one microphone. The theory of geometrical room acoustics is being used to identify sound paths under consideration of reflections. The propagation time along a specific sound path is derived from the room impulse response. Temporal variances in room impulse response can be attributed primarily to a change in air temperature and airflow. It is shown that in the absence of airflow a three-dimensional acoustic monitoring of the room temperature can be realized with a fairly limited use of hardware.

Zusammenfassung

Die Temperatur kann mithilfe von akustischen Laufzeitmessungen auf definierten Schallstrecken ermittelt werden. Der Einsatz multipler Schallstrecken, in Verbindung mit einem tomografischen Rekonstruktionsverfahren, erlaubt eine räumliche Auflösung der genannten klimatologischen Größe. Aufbauend darauf, befasst sich dieser Artikel mit einer experimentellen Methode zur Erfassung der räumlich und zeitlich aufgelösten Entwicklung der Raumtemperatur mit lediglich einem Lautsprecher und einem Mikrofon. Die Theorie der geometrischen Raumakustik wird genutzt, um Schallstrecken, unter der Berücksichtigung von Reflexionen, zu identifizieren. Die zu den Ausbreitungswegen gehörenden Laufzeiten werden aus einer gemessenen Raumimpulsantwort abgeleitet. Zeitliche Varianzen in Raumimpulsantworten sind in erster Linie auf die Veränderung der Lufttemperatur und von Strömungsverhältnissen zurückzuführen. Es wird gezeigt, dass bei Abwesenheit von Raumluftströmungen, eine dreidimensionale, akustische Überwachung der Raumtemperatur mit einem sehr geringen Einsatz an Messtechnik realisiert werden kann.

1. Einleitung

Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit in der Atmosphäre wird maßgeblich von der Temperatur und von Strömungen beeinflusst (Bohn, 1988). Lediglich die Luftfeuchtigkeit führt proportional zur Sättigung zusätzlich zu einer geringfügigen Erhöhung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit. Unter der Annahme der Abwesenheit des vektoriellen Einflusses durch Strömungen, kann mithilfe einer akustischen Laufzeitmessung zwischen einem Lautsprecher und einem Mikrofon die mittlere Temperatur auf dieser Schallstrecke mit bekannter Länge ermittelt werden (Kaimal und Businger, 1963). Durch Betrachtung vieler, in der Ebene oder im Raum verteilter Schallstrecken gelingt eine mehrdimensionale, örtlich aufgelöste Temperaturerfassung. Hierfür wird ein tomografisches Verfahren verwendet, das die auf den Einzelstrecken erfassten Schalllaufzeiten in räumlich verteilte Temperaturfelder überführt. Bei bisherigen Anwendungen dieser Messmethode wurde eine Vielzahl von Schallsendern und Empfängern eingesetzt. Diese wurden so um ein Untersuchungsgebiet angeordnet, dass eine möglichst homogene Überdeckung des Messgebietes mit Schallwegen erreicht werden konnte. Anfänglich wurde diese Messmethode für mikrometeorologische Fragestellungen zur Aufzeichnung von Lufttemperaturfeldern über strukturierten atmosphärischen Unterlagen eingesetzt (Wilson und Thomson, 1994., Tetzlaff u.a., 2002) später dann im Rahmen der Verfahrensentwicklung auf kleinere Raumbereiche z.B. in einem Windkanal (Holstein et. al., 2004, Barth und Raabe, 2011).

Der vorliegende Artikel beschreibt eine experimentelle Methode, die ebenfalls eine Erfassung der Temperaturverteilung im Raum ermöglicht. Dabei werden aber lediglich ein Lautsprecher und ein Mikrofon verwendet. Als weitere, virtuelle Schallquellen werden mehrfache Reflexionen des einzelnen Schallemiters an Raumbegrenzungsflächen hinzugezogen. Nach der Theorie der geometrischen Raumakustik ergibt sich, abhängig von der Position des Senders und des Empfängers, eine Vielzahl von Schallstrecken, die eine Untersuchungsumgebung hinreichend abdecken können. Der theoretische Verlauf der Schallstrecken wird mit einem Spiegelschallquellenmodell nach Allen und Berkley (1979) bestimmt. Alle Reflexionen eines Impulses, der von einer Schallquelle ausgeht, überlagern seinen Direktschall und ergeben die Impulsantwort eines Raumes. Entsprechen die Positionen für den Sender und den Empfänger bei der Messung der Raumimpulsantwort denen des Spiegelschallquellenmodells, können aus dieser die Laufzeiten, die zu den modellierten Schallstrecken gehören, abgeleitet werden. Hierfür wird ein statistisch aufbereitetes Reflektogramm verwendet. Jede Nichtlinearität durch eine globale bzw. partielle Temperaturänderung im Raum erzeugt bei der Schallausbreitung, aufgrund von Modulationen durch das Ausbreitungsmedium, zeitliche Varianzen, die im Reflektogramm abgebildet werden (Vorländer und Kob, 1997, Svensson und Nielsen, 1999).

Das Verfahren bei der experimentellen Messmethode, das im Folgenden vorgestellt wird, wurde im Zuge einer Abschlussarbeit entwickelt (Bleisteiner, 2014). Aufgrund einer Einschränkung durch die Messhardware, wurde eine Erfassung der Temperaturverteilung relativ zu einem Ausgangszustand bzw. -zeitpunkt in einem quaderförmigen Raum umgesetzt. Der Artikel stellt eine Ausführung der

entscheidenden, oben genannten theoretischen Hintergründe dar, um mit einem geringen Hardwareeinsatz eine örtlich differenzierte, akustische Überwachung der Raumtemperaturentwicklung zu ermöglichen. Weiterhin wird die praktische Umsetzung beschrieben, die den Bau und die Validierung eines spezialisierten Messlautsprechers, den Einsatz der verwendeten Messtechnik, sowie den Messalgorithmus beinhaltet. Anhand einer Beispielmessung in einem realen Raum wird das Potential der Messmethode gezeigt. Abschließend wird das System bewertet und Erweiterungsmöglichkeiten werden aufgeführt.

2. Theoretische Hintergründe

Das präsentierte Verfahren beruht auf der Verknüpfung einer akustischen Laufzeiterfassung auf modellierten Schallstrecken, unter der Berücksichtigung von Reflexionen an Begrenzungsflächen (Wände), mit einer anschließenden tomografischen Rekonstruktion der räumlichen Temperaturverteilung. Die Laufzeiten werden dabei aus der Impulsantwort des zu vermessenden Raumes abgeleitet, die mittels der Korrelationsmesstechnik bestimmt wird.

2.1 Korrelationsmesstechnik und Raumimpulsantwort

Mit der Korrelationsmesstechnik können sowohl Laufzeiten zwischen einem Sender und einem Empfänger, als auch die Übertragungseigenschaften eines LTI-Systems, in Form einer Impulsantwort, ermittelt werden. Zur Ermittlung einer Raumimpulsantwort kann dabei ein zeitlich ausgedehntes, breitbandiges Anregungssignal verwendet werden, dessen Autokorrelationsfunktion impulsförmig ist (Vorländer, 1994). Ein entscheidender Vorteil einer längeren, breitbandigen Anregung ist, dass ein System mit deutlich mehr Energie angeregt werden kann und dadurch eine besser zu verwertende Impulsantwort entsteht. In der Praxis wird ein LTI-System mit einem Signal angeregt, worauf an dessen Ausgang das Faltungsprodukt des Signals mit der Impulsantwort anliegt. Durch eine Kreuzkorrelation mit dem Anregungssignal erhält man die reine Impulsantwort. Aufgrund von Nichtlinearitäten der Messkette, macht es jedoch Sinn, mit einer Aufnahme des Anregungssignals zu korrelieren, welche unter Freifeldbedingungen entstanden ist (Tervo, 2011).

Ein geeignetes Signal für die Korrelationsmesstechnik ist eine Maximallängenfolge, bzw. MLS (Maximum Length Sequence). Hierbei handelt es sich um eine binäre Pseudozufallsfolge, deren Konstruktion und Eigenschaften in Lücke (1992) dargelegt werden. Eine MLS hoher Ordnung besitzt eine Autokorrelationsfunktion, die einem idealen Impuls recht nahe kommt. Die MLS-Methode kann zudem gewährleisten, dass selbst bei ungünstigen Störsignalpegeln verwertbare Messergebnisse zu erwarten sind (Dunn und Hawksford, 1993).

2.2 Spiegelschallquellenverfahren

Die Spiegelschallquellenmethode ist ein Standardverfahren der akustischen Simulation, um Raumimpulsantworten zu modellieren. Dabei werden sowohl die Schalllaufwege, als auch die dazugehörigen Laufzeiten, durch die strikte Beachtung des geometrischen Reflexionsgesetzes, berechnet (Möser, 2012). Dies geschieht unter der Angabe der Raumgeometrie, sowie der Position des Schallemitters und des

Schallempfänger. Die Ordnung M , besagt dabei, wie oft ein Schallereignis bei der Bildung der Schallstrecke an den Raumbegrenzungsflächen reflektiert wird. Niedrige Ordnungen führen zu diskreten frühen Reflexionen in der Raumimpulsantwort. Für die mathematische Bestimmung einer Raumimpulsantwort mithilfe von Spiegelschallquellen wird in Dokmanic et. al. (2013) von einer Impulsfolge der Form

$$h_m(t) = \sum_i \alpha_i \delta(t - \tau_i) \quad (1)$$

ausgegangen. Dabei wird ein um τ_i verzögerter Impuls δ aufgrund von Absorptionsvorgängen an Raumbegrenzungsflächen durch α_i in seiner Amplitude verringert. Um die Verzögerungen τ_i , welche äquivalent zur Schalllaufzeit einer individuellen Reflexion an einer bestimmten Raumbegrenzungsfläche sind, zu erhalten, wird die originale Schallquelle S an der entsprechenden Fläche gespiegelt. Somit erhält man die Spiegelschallquelle \tilde{S}_i welche δ um α_i verringert wiedergibt. An dem Ort des Empfängers R ergibt sich die Impulsfolge h_m aufgrund der verschiedenen Abstände von S und \tilde{S}_i zu R . Mehrfachspiegelungen von S an (unterschiedlichen) Raumbegrenzungsflächen ergeben Reflexionen höherer Ordnung. Die Raumimpulsantwort ist die Summe aus dem Direktschall, der von S ausgeht, und allen Signalen der Spiegelschallquellen, die entsprechend der Ordnung M geometrisch bestimmt wurden.

Eine Spiegelschallquelle erster Ordnung wird mit

$$\tilde{S}_i = S + 2\langle P_i - S, n_i \rangle n_i \quad (2)$$

bestimmt. Bei n_i handelt es sich um den Normalenvektor der i -ten Raumbegrenzungsfläche und P_i ist ein beliebiger Punkt auf dieser Fläche. Die Laufzeit einer Reflexion ist folglich

$$\tau_i = \frac{\|\tilde{S}_i - R\|}{c}, \quad (3)$$

wobei c die Schallausbreitungsgeschwindigkeit ist.

Spiegelschallquellen höherer Ordnung werden in Bezug auf eine Spiegelschallquelle der Ordnung $M = M - 1$ errechnet. Damit gilt für Spiegelschallquellen zweiter Ordnung

$$\tilde{S}_{ij} = \tilde{S}_i + 2\langle P_j - \tilde{S}_i, n_j \rangle n_j \quad (4)$$

wobei zudem

$$\|S - \tilde{S}_{ij}\| = \|\tilde{S}_i - \tilde{S}_j\| \quad (5)$$

erfüllt werden muss.

Die Konstruktion von Spiegelschallquellen kann sehr gut visualisiert werden, wozu die Abb. 1 dient.

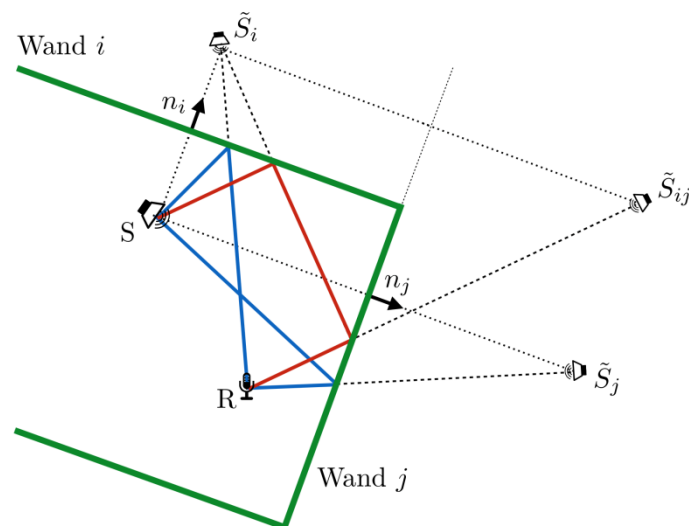


Abb. 1: Spiegelschallquellenmodell mit Reflexionen erster und zweiter Ordnung (Bleisteiner, 2014)

2.3 Akustische Laufzeitotomographie

Die Laufzeit akustischer Signale in ruhender Luft hängt maßgeblich von der Temperatur entlang des bekannten Ausbreitungsweges ab. Ein Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit c und Lufttemperatur T kann unter Berücksichtigung der spezifischen Feuchte q geschrieben werden als

$$c = \sqrt{\gamma \cdot R_s \cdot T_{av}} \quad \text{mit} \quad T_{av} = (1 + 0,513 \cdot q) \cdot T \quad (6)$$

Hierbei wird T_{av} mit akustisch virtuelle Temperatur bezeichnet. In Analogie zur virtuellen Temperatur werden durch Verwendung dieser Größe alle Einflüsse des variablen Wasserdampfgehaltes berücksichtigt. Bei dieser Art der Betrachtung können die Werte für $\gamma = 1,4$ (Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten bei konstantem Druck und konstantem Volumen für trockene Luft) und $R_s = 287,05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (spezifische Gaskonstante für trockene Luft) unabhängig von der vorherrschenden Feuchte verwendet und als konstant angesehen werden.

Die Laufzeit eines akustischen Signals τ entlang eines Weges l lässt sich mit Hilfe des räumlich variablen Schallgeschwindigkeitsfeldes (bzw. dessen Kehrwerten, den Langsamkeiten s) schreiben als

$$\tau = \int_l \frac{1}{c(r)} dl = \int_l s(r) dl \quad (7)$$

Wird nun ein Untersuchungsgebiet entlang verschiedener Wege durchschallt, lassen sich räumliche Verteilungen der Langsamkeiten und hieraus die akustische virtuelle Temperatur ableiten. Hierfür werden tomographische Rekonstruktionstechniken eingesetzt. Im Folgenden soll nur ein kurzer Überblick gegeben werden, ausführliche Informationen zum hier verwendeten Verfahren der akustischen Laufzeitotomographie

sind z. B. in Barth (2009) und für dreidimensionale Anwendungen in Barth und Raabe (2011) gegeben.

Für die vorgestellten Analysen fand ein iteratives algebraisches Verfahren, die simultane iterative Rekonstruktionstechnik (SIRT), Verwendung. Voraussetzung für die Anwendung eines solchen Verfahrens ist die Untergliederung des Messgebietes in diskrete Teilgebiete, in denen die gesuchte Größe jeweils als konstant angenommen wird. Für ein Gebiet aus J Zellen kann die Laufzeit des i -ten Schallstrahles in der Form

$$\tau_i = \sum_{j=1}^J s_j \cdot l_{ij} \quad (8)$$

angegeben werden, wobei s_j die Langsamkeit in der j -ten Zelle und l_{ij} die Länge des i -ten Schallstrahls in der j -ten Zelle darstellen.

Mit Hilfe des SIRT-Algorithmus wird eine Lösung für die Verteilung der Langsamkeiten s_{ij} bei bekannten Schallstrahlabschnitten und gemessenen Schalllaufzeiten in einem iterativen Prozess bestimmt. Dabei werden folgende Berechnungsschritte ausgeführt

1. Festlegung einer Startverteilung für die Langsamkeiten
2. Berechnung von Laufzeitwerten aus den vorgegebenen Langsamkeiten und den bekannten Schallwegen durch das Gitter
3. Bestimmung von Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Laufzeiten für alle Schallwege und Berechnung von Korrekturwerten für die Verteilung der Langsamkeiten im Gitter entsprechend dieser Differenzen
4. Anpassung der Verteilung der Langsamkeiten entsprechend der berechneten Korrekturwerte
5. Wiederholung der Schritte 2 bis 4 bis zum Erreichen eines Abbruchkriteriums (z.B. festgelegte Anzahl an Iterationen)

Im Ergebnis erhält man eine Verteilung der Langsamkeiten, die sich entsprechend des oben angegebenen Zusammenhangs in eine Verteilung der akustisch virtuellen Temperatur überführen lässt.

3. Praktische Umsetzung

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen aus Abschnitt 2 wurde eine experimentelle Messmethode entwickelt, die bestimmten Anforderungen genügen sollte: Die akustische Erfassung der räumlichen Verteilung und des zeitlichen Verlaufs der Lufttemperatur soll mit lediglich einem Lautsprecher und einem Mikrofon erfolgen, die in einem Raum positioniert werden. Mit dem System soll ein Messintervall von wenigen Sekunden, eine hohe Temporauflösung, sowie Robustheit gegenüber Störschall erreicht werden.

3.1 Experimentelles Verfahren

Unter der Verwendung eines Spiegelschallquellenmodells werden aus den bekannten Positionen des Schallsenders und -empfängers sowie der Geometrie des Raumes theoretische Schallstrecken sowie dazugehörige Laufzeiten berechnet. Das Modell gibt zudem Auskunft darüber, welche Raumbegrenzungsflächen bei einer Reflexion

beteiligt sind und an welchen Punkten der Schall reflektiert wird. Dies ist die Voraussetzung für die örtliche Diskretisierung des Raumes zur Rekonstruktion der räumlichen Verteilung der Lufttemperatur. In der Abb. 2 ist exemplarisch die Schallstreckenverteilung eines Spiegelschallquellenmodells zweiter Ordnung in einem quaderförmigen Raum zu sehen. Basierend auf der räumlichen Verteilung der Schallstrecken kann auch die Güte der Raumabdeckung für die tomografische Rekonstruktion eingeschätzt werden. Die korrespondierenden Laufzeiten werden für jeden Schallpfad unter Annahme einer homogenen Temperaturverteilung abgeschätzt.

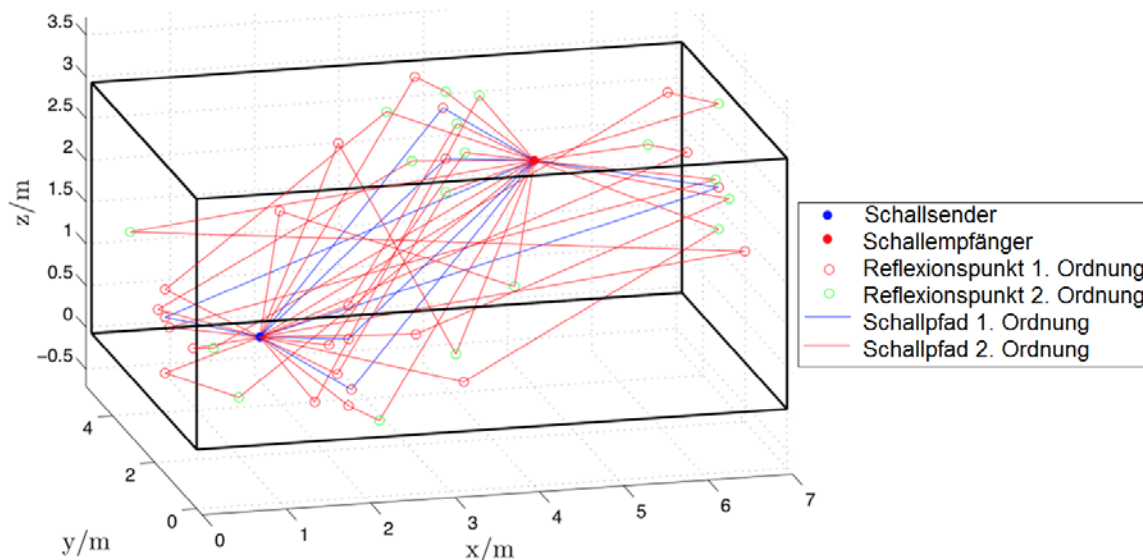


Abb. 2: Dreidimensionale Darstellung der Schallstreckenverteilung eines Spiegelschallquellenmodells zweiter Ordnung (Bleistener, 2014)

Die gemessenen Schalllaufzeiten werden aus dem Reflektogramm des Raumes abgeleitet, dem eine Impulsantwort zugrunde liegt, welche auf denselben geometrischen Voraussetzungen basiert wie das Spiegelschallquellenmodell. Somit ist die wesentliche Aufgabe bei der Messmethode, Reflexionen im Reflektogramm zu detektieren und deren Laufzeiten der entsprechenden modellierten Schallstrecke zuzuordnen. Dafür werden die aus dem Modell berechneten Laufzeiten verwendet, mit deren Hilfe ein Kurzzeitanalysefenster bei der zu erwartenden Reflexion gesetzt wird. Die theoretischen Schalllaufzeiten für alle Schallwege von Reflexionen erster und zweiter Ordnung aus dem Spiegelschallquellenmodell (vgl. Abb. 2) sind als rote Linien in Abb. 3 eingetragen. Um diese Laufzeiten werden die Kurzzeitfenster zentriert. Die Stelle des Maximums im Reflektogramm (blaue Linien in Abb. 3) innerhalb des Fensters repräsentiert die gemessene Laufzeit, welche per peak picking ermittelt wird.

Bevor das Reflektogramm analysiert wird, wird dieses mit einer Statistik zweiter Ordnung aufbereitet, um Reflexionen eindeutiger als solche zu identifizieren. Statt des energiebasierten Signals wird die Signalform (Kurtosis bzw. Wölbung) des Reflektogramms in Form einer Kurtosis-Analyse betrachtet. Damit werden Reflexionen niedriger Ordnung hervorgehoben. Der Schalldruck einer Reflexion kann als stochastische Funktion mit Normalverteilung modelliert werden und die Kurtosis

stellt ein Maß für den Grad der Normalverteilung dar. Für eine praktische Implementierung nach Usher (2010) werden hierfür zwei gleitende Kurzzeitfenster mit den Längen l_k und m_k verwendet, wobei $l_k \ll l_m$ gilt. Beide Fenster sind um das Sample n des Datenvektors x zentriert. Die Berechnung des aufbereiteten Reflektogramms erfolgt durch

$$k_{n,l,m} = \frac{(\mu_{n,l_k} - \mu_{n,m_k})^4}{\sigma_{n,m_k}^4}. \quad (9)$$

Dabei sind μ_{n,l_k} und μ_{n,m_k} die Mittelwerte der beiden Fenster und bei σ_{n,m_k} handelt es sich um die Standardabweichung der Werte im Fenster mit der Länge m_k . Die Abb. 3 zeigt das Reflektogramm eines realen Raumes, bevor und nachdem es der Kurtosis-Analyse unterzogen wurde.

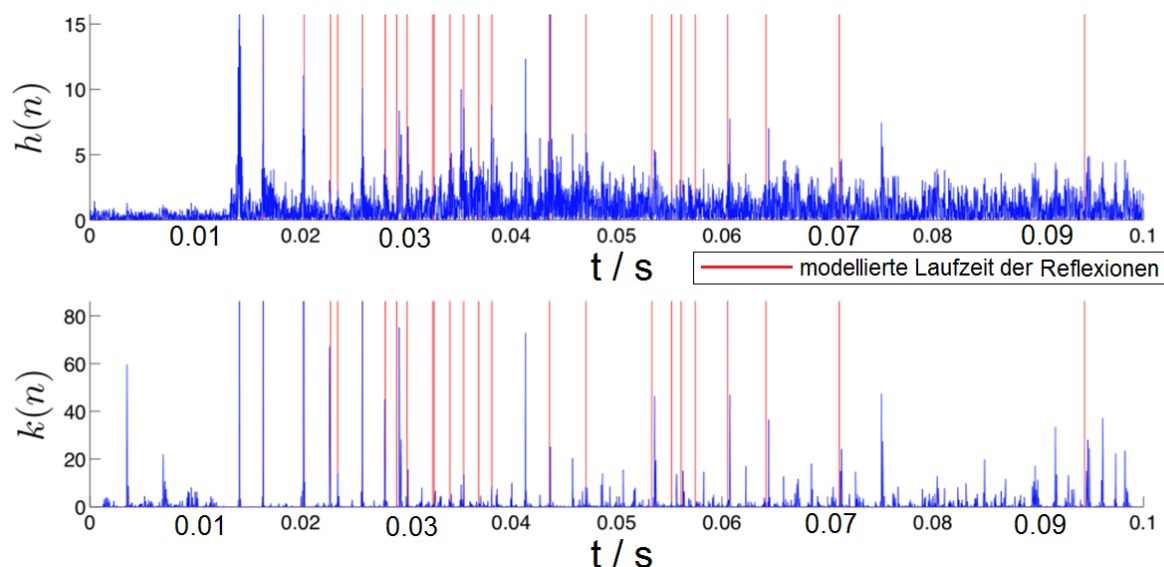


Abb. 3: Wirkung der Kurtosis-Analyse auf ein Reflektogramm (Bleisteiner, 2014)

Bei der softwaretechnischen Umsetzung des Messverfahrens wurden neben dem eigentlichen Messverfahren mehrere Algorithmen zu Vermeidung der Registrierung von fehlerhaften Laufzeiten implementiert, die beispielsweise auf geometrische Ungenauigkeiten zurückzuführen sind (Bleisteiner, 2014).

3.2 Messtechnik

Zur Bestimmung der Raumimpulsantwort mit der Korrelationsmesstechnik werden im Kontext der vorgestellten Messmethode spezifische Anforderungen an den Messlautsprecher gestellt. Im Idealfall sollte dieser eine maximal breitbandige Monopol-Punktquelle darstellen. Solch ein Lautsprecher existiert in der Realität nicht (Masiero et. al., 2011), jedoch ist mit dem Bau eines spezialisierten Versuchslautsprechers eine Schallquelle entstanden, die sich als geeignet herausgestellt hat, was theoretisch in Bleisteiner (2014) ausgeführt und messtechnisch evaluiert wurde. Es handelt sich dabei um einen kleinen tropfenförmigen Breitbandlautsprecher mit einem speziell angepassten Gehäuse

(Gehäuseinnenvolumen: 0,25 Liter) und dem 2-Zoll-Treiber Visaton FRS 5 XTS (VISATON, 2014), in Anlehnung an Masiero et. al. (2011).

Als Schallempfänger wird für das Messsystem das 1/4-Zoll-Elektret-Kondensatormikrofon AVM MI-17 (AVM, 2014) eingesetzt. Der Wandler ist als Druckempfänger mit einer Freifeldentzerrung ausgelegt. Weiterhin wird das Anregungssignal vom Leistungsverstärker Kemo M032S (Kemo, 2014) verstärkt, der sich, bei genügend Ausgangsleistung, durch kompakte Ausmaße und einen geringen Energiebedarf auszeichnet, wodurch das Messsystem sehr mobil realisiert werden konnte.

Eine besondere Rolle spielt die eingesetzte Messkarte DT 9847-1-1 (Data Translation, 2014) in Verbindung mit der Software. Dabei ist positiv hervorzuheben, dass der DA/AD-Wandler eine Digitalisierungsrate von 216 kHz aufweist, womit eine hohe zeitliche Abtastung und damit eine hohe Temporauflösung erreicht wird. Allerdings gewährleistet die Messkarte keine Synchronität zwischen Sende- und Empfangskanal, was beim triggern jeder Einzelmessung zu einem unbestimmten Sampleversatz führt. Dass die tatsächlichen Schalllaufzeiten im Reflektogramm abgebildet werden, setzt aber eine samplegenaue Synchronität des Eingangs und Ausgangs voraus. Dieser Umstand ist die Ursache, dass lediglich relative Temperaturwerte bezüglich eines (bekannten) Anfangswertes erfasst werden können. Um dennoch die korrekten Laufzeiten aus dem Reflektogramm ableiten zu können, wird eine Methode angewandt, welche sich die theoretische Laufzeit des Direktschalls zwischen dem Lautsprecher und dem Mikrofon zu Nutze macht (Bleisteiner, 2014).

Der komplette Messalgorithmus wurde in der Entwicklungsumgebung Matlab® (The MathWorks, 2014) umgesetzt. Hierbei wurden Funktionen und Skripte implementiert, womit eine Messung vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet wird. Vor der Messung müssen verschiedenen Parameter, wie beispielsweise die Raumgeometrie oder die Messdauer initial angegeben werden. Im Anschluss werden die Programmteile für die eigentliche Messung, Datenaufzeichnung, -analyse und -darstellung ausgeführt. Das Messverfahren wird ausführlich in Bleisteiner (2014) dargestellt.

4 Beispielmessung

Die experimentelle Messmethode wurde in einer kleinen Sporthalle der Firma Sonotec Ultraschallsensorik Halle GmbH (SONOTEC, 2014) am 17.07.2014 erprobt. Der Raum erfüllt die Forderung eines quaderförmigen Aufbaus, wodurch das Spiegelschallquellenmodell auf den realen Raum angewandt werden kann.

4.1 Aufbau und Durchführung

Ein Lautsprecher und ein Mikrofon wurden mithilfe der Visualisierung des Spiegelschallquellenmodells (vgl. Abb. 2) derart in der Untersuchungsumgebung positioniert, dass sich eine gute Abdeckung des Raumes mit Schallstrecken und eine voneinander abweichende Laufzeit für jede Reflexion ergab. Zusätzlich wurden sieben Referenzsensoren zur Erfassung von Temperatur und Feuchte (testostor 171-3; Testo, 2014) im Raum verteilt. Mit den Daten der konventionellen Sensoren werden die Ergebnisse der akustischen Messung verglichen.

Die Sporthalle wurde für die tomografische Rekonstruktion in jeder Dimension in drei Abschnitte unterteilt. In den so definierten 27 Teilvolumen wurde jeweils die Temperatur relativ zum Ausgangszustand registriert. Das Messintervall betrug 10 s. Während der Messung, deren Ablauf in Tab. 1 skizziert ist, wurde die Messgröße aktiv beeinflusst. An einem unteren Eck im Raum wurden mehrere elektronische Heizgeräte platziert. Diese hatten eine Leistung von insgesamt 8,5 kW.

Tab. 1: Zeitlicher Ablauf der Messung

Uhrzeit	Vorgang
12:15:00	Messstart, Einschalten der Wärmequellen
14:15:00	Ausschalten der Wärmequellen
15:15:00	Messstop

4.2 Ergebnisse

Zunächst werden in Abb. 4 die lokalen Temperaturänderungsverläufe aller Tomografie-Zellen gezeigt, in denen sich auch ein Referenzsensor befand und zusammen mit den Daten der konventionellen Temperaturfühler aufgetragen. Das bedeutet, dass die tomographisch rekonstruierte mittlere Temperaturänderung eines Volumens mit einer punktuellen Erfassung im selben örtlichen Bereich verglichen wird.

Gut auszumachen ist bei allen Plots in Abb. 4 die zeitliche Verzögerung bei den konventionellen Thermometern, die mit der Trägheit der NTC-Fühler zu begründen ist. Die leichte Welligkeit aller Kurven rührt von der Regelung der Heizgeräte, welche nicht zu jeder Zeit ihre volle Leistung abgeben. Ob die jeweiligen Temperaturänderungsverläufe miteinander vergleichbar sind, hängt stark von der Positionierung der Referenzsensoren ab. Sind diese eher im Zentrum einer Tomografie-Zelle angebracht, kann eine recht gute Übereinstimmung festgestellt werden (vgl. Abb. 4 a) bis d)). Wenn sich die Thermometer allerdings an einer Raumbegrenzungsfläche mit einer von der Luft abweichenden Temperatur befinden, weichen die Verläufe zum Teil erheblich voneinander ab. Die Referenzsensoren bei Abb. 4 e) und f) befanden sich unmittelbar über dem Hallenboden und bei Abb. 4 g) an einer Außenwand. In jedem Fall führte eine geringere Temperatur der Raumbegrenzungsfläche zu einer Beeinflussung der angrenzenden Luftschicht und somit zu einem abweichenden Verlauf der relativen Temperatur der Punktmessungen im Vergleich zum Verlauf der akustisch tomografisch rekonstruierten Werte.

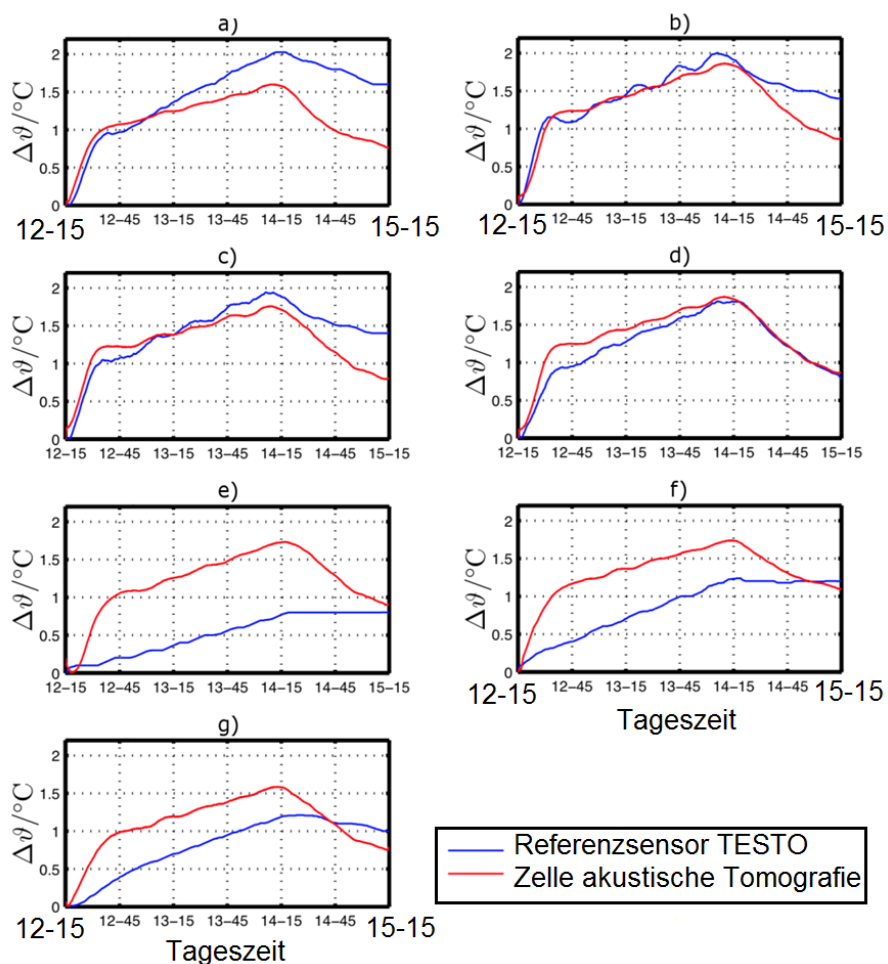


Abb. 4: Vergleich von Temperaturänderungsverläufen an verschiedenen Stellen im Raum (Bleistainer, 2014)

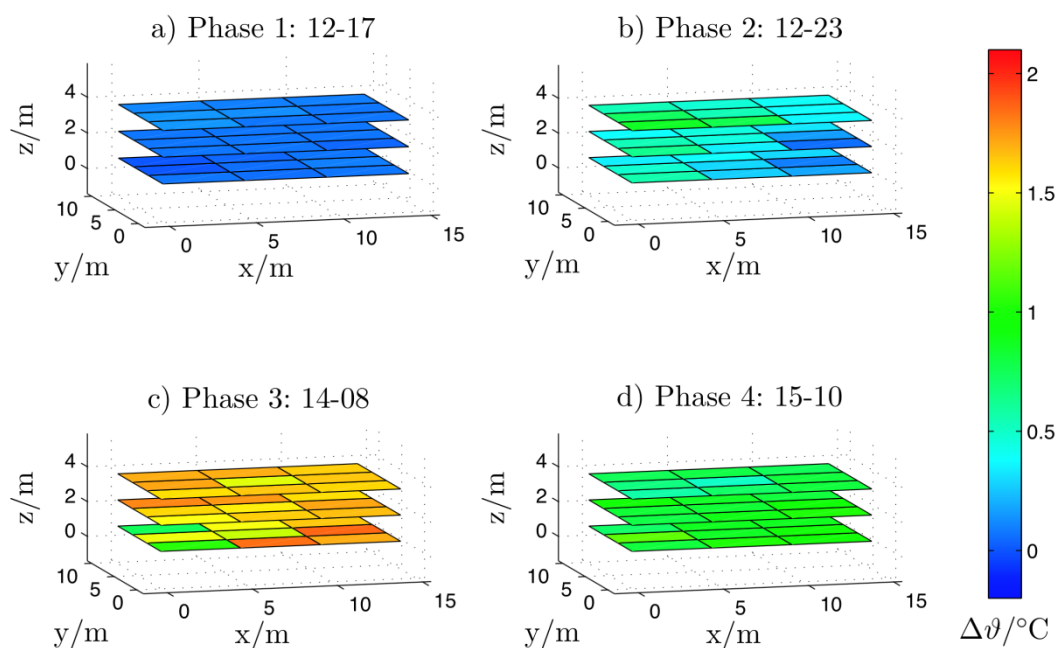


Abb. 5: Phasen der relativen Temperaturverteilung während der Messdauer, die Heizquellen befinden sich in der Raumecke bei $(x,y,z) = (0,0,0)$ m (Bleistainer, 2014)

In Abb. 5 wird die Temperaturänderungsverteilung zu verschiedenen Uhrzeiten dargestellt. Ein jeweiliger Plot ist repräsentativ für eine von vier Phasen, die sich während der Messdauer ausprägen.

Die vier Phasen lassen sich folgendermaßen beschreiben und erklären:

1. Homogene Verteilung der Temperatur zu Beginn der Messung (Ausgangszustand), die einer initialen Referenzmessung entspricht
2. Lokale Erwärmung im Bereich der Wärmequellen bzw. darüber (Aufsteigen der warmen Luft)
3. Diffuse und unrealistische Temperaturverteilung aufgrund einer stark ausgeprägten Konvektionsströmung, die zu einer Umwälzströmung im gesamten Raum führt (Rietschel und Fitzner, 2004). Der vektorielle Einfluss durch Strömungen wird beim derzeitigen Entwicklungsstand des Messsystems nicht berücksichtigt. Der theoretische Fehler der durch die auftretende Strömungsgeschwindigkeit verursacht wird, entspricht in etwa den Abweichungen im Temperaturfeld in Abb. 5, Phase 3 (Bleisteiner, 2014).
4. Nachdem sich die Raumluft nach dem Abschalten der Wärmequellen beruhigt hat, stellt sich wieder eine homogene Verteilung bei einer höheren mittleren Temperatur ein.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Sinne einer Machbarkeitsstudie ist es gelungen, eine experimentelle Messmethode für eine örtlich differenzierte Überwachung der Raumtemperatur zu entwickeln. Dabei konnte die Hardware mit lediglich einem Lautsprecher und einem Mikrofon auf ein Minimum reduziert werden. Hierfür wurde die Technik der akustischen Laufzeit-tomographie mit Methoden der geometrischen Raumakustik kombiniert. Das ist die Voraussetzung für eine schnelle Integrierbarkeit des Messsystems in einer Messumgebung und erlaubt den Betrieb als mobiles System. Als Anwendung ist die Überwachung von technischen Betriebsräumen oder das Einmessen von klimatisierten Räumen vorstellbar. Ein Messintervall von wenigen Sekunden, abhängig von der Länge des Anregungssignals und der Leistung des eingesetzten Computers, ist dabei realistisch. Damit können plötzliche Temperaturschwankungen schnell festgestellt werden, insbesondere da bei einem akustischen System prinzipbedingt keine Sensorträgheit zu verzeichnen ist (Foken, 2006). Durch die Eigenschaften der verwendeten Anregungssignale (MLS) ist zudem unter schwierigen akustischen Bedingungen eine Datenerhebung möglich.

Das Messsystem sollte für realistische Szenarien noch um die Berücksichtigung bzw. Erhebung von Raumluftrömungen erweitert werden, da diese zum gegenwärtigen Entwicklungsstand erhebliche Unsicherheiten verursachen können. Für die reine Temperaturerhebung gilt es, den vektoriellen Einfluss durch Luftbewegungen herauszurechnen. Denkbar wäre es, der Forderung nach reziproken Schallstrecken in Barth und Raabe (2011) nachzukommen, oder Strömungen als systematische Fehler zu betrachten (Vecherin et. al., 2013). Eine weitere Einschränkung ist die idealisierte Form des Raumes als Quader, die durch die Implementierung eines komplexeren Spiegelschallquellenmodells beseitigt werden könnte. Eine weitere Verbesserung der

Messmethode würde durch die numerische Bestimmung einer idealen Sender- und Empfängerposition erreicht werden. Dadurch ergäbe sich eine optimierte Verteilung der Schallstrecken im Raum, wie auch eine bessere Verteilung der Reflexionen im Reflektogramm. Prinzipiell erlaubt das Messprogramm auch den Einsatz konventioneller Audiokarten, was dazu führen würde, dass das System sehr kostengünstig aufgebaut werden könnte. Letztlich würde eine Anregung des Raumes im Ultraschallbereich zur Erhebung der Impulsantwort den Einsatzbereich dahingehend erweitern, dass das System keine wahrnehmbaren akustischen Emissionen erzeugt.

Literatur

Allen, J. B., Berkley, D. A., 1979: Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 65, 943–950.

AVM Mess- und Prüfgerätee für Akustik und Vibration, 2014: Forststr. 32, 64572 Büttelborn - Germany, E Mail: bertram.schapal.avm@t-online.de, URL: <http://www.avm-akustik.de/>.

Barth, M., 2009: Akustische Tomographie zur zeitgleichen Erfassung von Temperatur- und Strömungsfeldern. *Wiss. Mitt. Inst. F. Meteorol. Univ. Leipzig*, 44.

Barth, M., Raabe, A., 2011: Acoustic tomographic imaging of temperature and flow fields in air. *Meas. Sci. Technol.*, 22, 1-13 (doi: 10.1088/0957-0233/22/3/035102)

Bleisteiner, M., 2014: Ableitung von Raumtemperaturverteilungen aus Schallreflexionsmessungen. *Masterarbeit, Fachgebiet Audiokommunikation, TU-Berlin*, URL: https://www2.ak.tu-berlin.de/~akgroup/ak_pub/abschlussarbeiten/2014/BleisteinerMarcus_MasA.pdf.

Bohn, D. A., 1988: Environmental Effects on the Speed of Sound. *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 36, No. 4, pp. 223–231.

Data Translation GmbH, 2014: Im Weilerlen 10, 74321 Bietigheim-Bissingen, Deutschland, URL: www.datatranslation.de/.

Dokmanic, I., Parhizkar, R., Walther, A., Lu, Y. M., Vetterli, M., 2013: Acoustic echoes reveal room shape. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 110, No. 30, pp. 12186–12191.

Dunn, C., Hawksford, M. J., 1993: Distortion immunity of MLS-derived impulse response measurements. *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 41, No. 5, pp. 314–335.

Foken, T., 2006: *Angewandte Meteorologie*. Springer Vlg.

Four Audio GmbH & Co. KG, 2014: Bergdriesch 24-26, 52062 Aachen, Deutschland, E-Mail: info@four-audio.com, URL: <http://www.four-audio.com/de/produkte/monkey-forest.html>.

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

Kaimal, J., Businger, J., 1963: A continuous wave sonic anemometer- thermometer. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 2, No. 1, pp. 156–164.

- Kemo Electronic GmbH, 2014: Leher Landstr. 20, 27607 Langen, Germany, <http://www.kemo-electronic.de>, E-Mail: info@kemo-electronic.de, URL: <http://www.kemo-electronic.de/de/Basteln-Schule/M032S-Universal-Verstaerker-12-W-Plug-Play.php>.
- Lüke, H. D., 1992: *Korrelationssignale*. Springer.
- Masiero, B., Pollow, M., Fels, J., 2011: Design of a fast broadband individual head-related transfer function measurement system. *Proc. Forum Acusticum*, p. 136.
- The MathWorks GmbH, 2014: Adalperostraße 45, 85737 Ismaning, Germany, URL: <http://www.mathworks.de/products/matlab/>.
- Möser, M., 2012: *Technische Akustik*. Springer.
- Rietschel, H., Fitzner, K.; 2004: *Raumklimatechnik: Band 3: Raumheiztechnik*. Springer.
- SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, 2014: Nauendorfer Straße 2, 06112 Halle (Saale), Deutschland, URL: <http://www.sonotec.de/>
- Svensson, P., Nielsen, J. L., 1999: Errors in MLS measurements caused by time variance in acoustic systems. *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 47, No. 11, pp. 907–927.
- Testo AG, 2014: Testo-Straße 1, 79853 Lenzkirch, Deutschland, URL: <http://www.testo.de/>.
- Tervo, S., 2011: Localization and Tracing of Early Acoustic Reflections. *Doctoral Dissertations, Vol. 143/2011, Aalto University publication series*.
- Tetzlaff G, Arnold K, Raabe A and Ziemann A 2002 Observations of area-averaged near-surface wind- und temperature-fields in real terrain using acoustic travel time tomography. *Meteorol. Z., N.F.* **11** 273-283
- Usher, J., 2010: An improved method to determine the onset timings of re- flections in an acoustic impulse response. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 127, No. 4, pp. EL172–EL177.
- Vecherin, S. N., Ostashov, V. E., Wilson, D. K., 2013: Assessment of systematic measurement errors for acoustic travel-time tomography of the atmosphere. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 134, No. 3, pp. 1802–1813.
- VISATON GmbH, 2014: Ohligser Straße 29-31, D-42781 Haan, Tel.: 02129/552-0, Fax 02129/552-10, E-Mail: visaton@visaton.com, URL: http://www.visaton.de/de/industrie/breitband/frs5xts_8.html.
- Vorländer, M., 1994: Anwendung der Maximalfolgenmeßtechnik in der Akustik. *Fortschritte der Akustik*, Vol. 20, pp. 83–102.
- Vorländer, M., Kob, M., 1997: Practical aspects of MLS measurements in building acoustics. *Applied Acoustics*, Vol. 52, No. 3, pp. 239– 258.
- Wilson, D.K. und Thomson, D.W., 1994: Acoustic tomographic monitoring of the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 11, 751-768.