

# Tomografische Rekonstruktion der Raumtemperaturverteilung aus einer Raumimpulsantwort

Armin Raabe<sup>1</sup>, M. Bleisteiner<sup>1</sup>, Peter Holstein<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universität Leipzig, Institut für Meteorologie, Stephanstr. 3, 04103 Leipzig

<sup>2</sup> Steinbeis Transferzentrum "TAAN", Margarethenweg 9a, 04425 Taucha

## Beschreibung des Verfahrens

Die Lufttemperatur kann mithilfe von akustischen Laufzeitmessungen ermittelt werden, wenn die Strecken auf denen sich der Schall ausbreitet bekannt sind. Durchqueren mehrere Schallstrecken einen Raum, so kann mit einem tomografischen Rekonstruktionsverfahren eine Verteilung der Lufttemperatur in diesem Raum ermittelt werden.

In dem hier gezeigten Beispiel (nach [1]) werden Modelle der geometrischen Raumakustik genutzt, um Schallstrecken unter der Berücksichtigung von Reflexionen an den Raumwänden, zu identifizieren. Die zu den Ausbreitungswegen gehörenden Laufzeiten werden aus einer gemessenen Raumimpulsantwort abgeleitet. Zeitliche Varianzen in den Raumimpulsantworten werden als eine Veränderung der Lufttemperatur interpretiert.

## Grundlagen

Das Verfahren basiert auf einer Schallgeschwindigkeitsmessung. Aus der Laplaceschen Schallgeschwindigkeit  $c_L$  wird die akustische virtuelle Temperatur  $T_{a,virt}$  berechnet.

Virtuell, da die so ermittelte Raumlufttemperatur auch in einem geringen Maß von der Luftfeuchte beeinflusst ist.

$$T_{a,virt} = \frac{c_L^2}{402} \quad [\text{K}] \quad (1)$$

Die Schallgeschwindigkeit wird dabei in einem ersten Schritt aus der Länge der berechneten Schallreflexionswege  $D$  und der über eine Raumimpulsantwort diesen Wegen zugeordneten Laufzeit der Schallsignale  $\tau$  ermittelt.

$$c_L = \frac{D}{\tau} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

Ausgehend von einer Schallquelle erreichen die Schallsignale das im Raum positionierte Mikrofon auf ganz unterschiedlichen Wegen (Abb. 1). Da die verschiedenen Schallreflexionswege ganz unterschiedliche Raumbereiche  $D_i$  durchqueren können in dem sich die Schallsignale eine Zeit  $\tau_i$  aufhalten, kann man die beobachtete Schallgeschwindigkeit sich abschnittsweise aus unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten  $c_i$  zusammengesetzt denken.

$$c_L(D) = \sum_i c_i = \sum_i \frac{D_i}{\tau_i} \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

### Positionierung von Sender und Mikrofon im Raum dessen Geometrie vermessen wird



### Berechnung nutzbarer Schallreflexionswege mit einem Spiegelschallquellenmodell

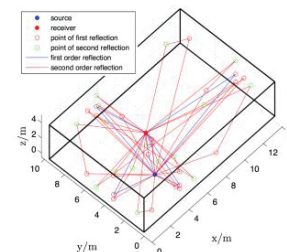


Abbildung 1: Schritt 1 und 2 des Verfahrens zur akustischen Beobachtung der Raumtemperaturverteilung.

Das macht sich ein akustisches tomografisches Verfahren zu nutze [2]. Dieses variiert in den einzelnen Raumbereichen die Lufttemperatur so lange, bis sich für jede beobachtete Schallstrecke sich die dazu beobachtete Schalllaufzeit numerisch rekonstruieren lässt. Im Ergebnis dieses iterativen Verfahrens (SIRT vgl. [2]) kann die Änderung der Raumlufttemperatur in verschiedenen Raumbereichen ermittelt werden (Abb. 2).

## Empfindlichkeit des Verfahrens

Als nutzbare akustische Schallsignale werden in dem hier gezeigten Beispiel Rauschsignale (Maximalfolgen MLS Ordnung 15 - 18; Zeitsignaldauer 0,15s – 1,21s; [3]) verwendet. Im hier realisierten Beispiel wird das Schallsignal mit 200 kHz digitalisiert.

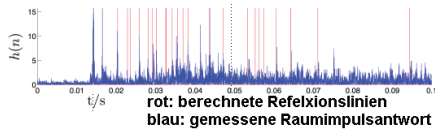
Die Raumimpulsantwort wird als Kreuzkorrelation zwischen gesendetem und empfangenem Signal berechnet [4]. Wichtig an dieser Stelle, dass der Schallsender möglichst die Signale in allen Raumrichtungen gleichverteilt abstrahlt. Das wird durch eine spezielle Form der Lautsprechergehäuses erreicht (s. [1]).

Das Verfahren verfolgt über die Messzeit hinweg die zeitliche Verschiebung der Position der Schallreflexionen in der Raumimpulsantwort [1]. Diese Verschiebung wird bei unveränderter Raumgeometrie und bei vernachlässigbarer Raumluftbewegung allein als Folge der Änderung der

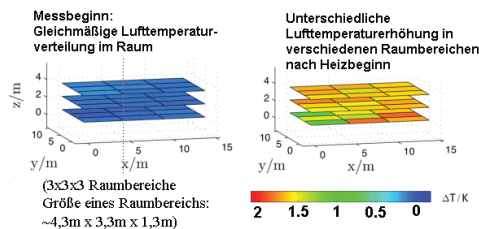
Raumlufttemperatur interpretiert. Unter diesen Voraussetzungen kann eine Raumlufttemperaturänderung von 1 K bei einer Schallpfadlänge von 1m und von 0.05 K bei einer Schallpfadlänge von 20 m beobachtet werden.

- [4] Holstein, P., Raabe, A., Müller, R., Barth, M., Mackenzie, D. Starke, E.: Acoustic tomography on the basis of travel-time measurements. Meas. Sci. Technol. **15** (2004 ) 1420-8

Den berechneten Schallreflexionswegen werden Schallimpulslaufzeiten zugeordnet. Diese werden mit einer gemessenen Raumimpulsantwort verglichen. Dabei werden beobachteten Reflexionslinien den berechneten Schallreflexionswegen zugeordnet



Auf ihrem Weg durch den Raum durchqueren die Schallimpulse verschiedene Raumbereiche. Ein tomografisches Rekonstruktionsverfahren ordnet diesen verschiedenen Raumbereichen Schallgeschwindigkeiten zu, die zu den gemessenen Laufzeiten und Laufwegen passen



Die für die einzelnen Raumbereiche ermittelte Schallgeschwindigkeit wird in die (virtuelle akustische) Raumlufttemperatur umgerechnet.

**Abbildung 2:** Schritt 3 und 4 des Verfahrens zur akustischen Beobachtung der Raumtemperaturverteilung.

## Ergebnis

Die Erfassung der räumlichen und zeitlichen Verteilungen bzw. Veränderungen der Raumtemperatur ist mit lediglich einem Lautsprecher und einem Mikrofon möglich. Wenn die Raumluftströmungen einen untergeordneten Einfluss haben, dann kann so eine dreidimensionale, akustische Überwachung der Raumlufttemperatur mit einem geringen Einsatz an Messtechnik realisiert werden kann. Dieses Verfahren ist dazu geeignet, beispielsweise Informationen für die Raumklimatisierung bereitzustellen. So können diese Informationen als Basis für die Steuerung und Überwachung des Raumklimas dienen, was als Beitrag für einen effizienten Energieeinsatz angesehen werden kann.

## Literatur

- [1] Bleisteiner, M., Barth, M., Raabe, A.: Tomographic reconstruction of indoor spatial temperature distributions using room impulse responses, Meas. Sci. Technol. **27** (2016) 035306 (10pp), doi:10.1088/0957-0233/27/3/035306
- [2] Barth, M., Raabe, A.: Acoustic tomographic imaging of temperature and flow fields in air. Meas. Sci. Technol., **22**(2011) doi: 10.1088/0957-0233/22/3/035102
- [3] Dunn, C., Hawksford, M. J.: Distortion immunity of MLS-derived impulse response measurements. J. Audio Eng. Soc. **41** (1993) 314-35