

Messung akustischer Parameter für tomografische Verfahren

Matthias Domke¹, Peter Holstein², Armin Raabe³

¹ Ingenieurbüro Akustik & Audiotechnik, 06679 Granschütz, Deutschland, Email: domke.matthias@t-online.de

² Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik, 06120 Halle, Deutschland, Email: peter.holstein@iwmh.fraunhofer.de

³ Universität Leipzig, Institut für Meteorologie, 04103 Leipzig, Deutschland, Email: raabe@uni-leipzig.de

Einleitung

Die akustische Laufzeittomografie ist ein Fernerkundungsverfahren, mit dem die räumliche Verteilung physikalischer Zustandsgrößen innerhalb eines Untersuchungsgebietes ermittelt werden kann. Die Grundlage ist die Abhängigkeit der akustischen Laufzeit eines Schallsignals vom Zustand des durchquerten Mediums. Bei der Anwendung der akustischen Laufzeittomografie wird das Untersuchungsgebiet in Gitterzellen eingeteilt. Eine bestimmte Anzahl von Schallsendern und Schallempfängern wird so um das Untersuchungsgebiet herum angeordnet, dass jede Gitterzelle von möglichst vielen Schallstrahlen durchquert wird. Mit n als Schallstrahlenindex und m als Gitterzellenindex ergibt sich folgendes Gleichungssystem für die Laufzeiten der einzelnen Schallstrahlen:

$$\tau_n = \sum_m s_{nm} \cdot l_m \quad (1)$$

Darin ist s der Weg des n -ten Schallstrahls in der m -ten Gitterzelle und l die Langsamkeit als reziproker Wert der Schallgeschwindigkeit c . Nach Messung der Schalllaufzeiten kann das Gleichungssystem nach l bzw. c aufgelöst werden. Aus der Schallgeschwindigkeit c lässt sich im strömungsfreien Fall unter Vernachlässigung der Luftfeuchtigkeit die Temperatur T in den einzelnen Gitterzellen bestimmen. Im strömungsbehafteten Medium können mit reziproken Strecken die Einflüsse von Strömung und Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit voneinander getrennt werden. Abbildung 1 zeigt einen Messaufbau mit vier Schallsendern und vier Schallempfängern sowie eine damit ermittelte Temperaturverteilung in den Gitterzellen des Untersuchungsgebietes.

Messung der Schalllaufzeit

Die Messung der Schalllaufzeit wird im allgemeinen derart durchgeführt, dass ein digital vorliegendes breitbandiges Anregungssignal über einen DA-Wandler und einen Schallsender in das Untersuchungsgebiet abgestrahlt wird. Nach der Durchquerung des Untersuchungsgebietes wird das Schallsignal von einem Schallempfänger aufgenommen und über einen AD-Wandler der Signalverarbeitung zugeführt. Diese ermittelt unter Verwendung des Anregungssignals die akustische Laufzeit des Schallweges im Untersuchungsgebiet. Bei diesem Verfahren entstehen jedoch Fehler, da das Anregungssignal auch vom Messsystem selbst und vor allem von den Schallwandlern beeinflusst wird. Das Ziel dieser Arbeit war es deshalb, im Frequenzbereich bis 20 kHz den

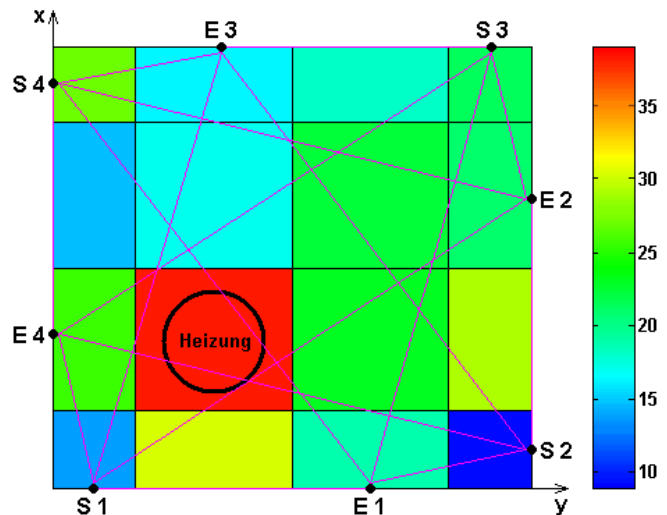


Abbildung 1: Messaufbau für akustische Laufzeittomografie mit vier Sendern und vier Empfängern sowie der ermittelten Temperaturverteilung im Untersuchungsgebiet

Einfluss von Schallwandlern und Messsystem zu verringern und damit die Messgenauigkeit zu erhöhen. Damit wäre es in Zukunft auch möglich, andere Parameter des Untersuchungsgebietes durch Auswertung der gemessenen komplexen Übertragungsfunktion zu bestimmen.

Randbedingungen der Schallwandler

Die im Messaufbau verwendeten Schallsender haben einen Membranradius von 7 mm, was zu einem Einsetzen der Bündelung ab ca. 11 kHz und bei 20 kHz zu einem Richtungsmaß von ca. -8 dB führt. Die Resonanz und damit die untere Grenzfrequenz liegt im nicht eingebauten Zustand bei 750 Hz. Durch den Einbau in ein Gehäuse mit einem Volumen von 2790 mm³ steigt diese auf 1000 Hz. In diesem Frequenzbereich (1 kHz bis 20 kHz) ist die Korrektur vorzunehmen.

Vorkorrektur

Die Korrektur wird in zwei Stufen (Vor- und Nachkorrektur) vorgenommen. Ziel der Vorkorrektur ist es, durch Verwendung eines speziell konstruierten Anregungssignals einen möglichst konstanten Amplitudenfrequenzgang der Schallsender zu erreichen. Dadurch wird bei allen Frequenzen die gleiche Energie ins Untersuchungsobjekt abgestrahlt.

Da die Schallsender bei Anordnungen wie in Abbildung 1 einen Abstrahlwinkel von 180 Grad haben müssen, wurde deren Amplitudenfrequenzgang auch in diesem Winkel-

bereich in Schritten von fünf Grad gemessen. Diese gemessenen Amplitudenfrequenzgänge unterschieden sich im Wesentlichen nur durch den frequenz- und winkelabhängigen Richtungsfaktor. Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt aus der gemessenen Kurvenschar.

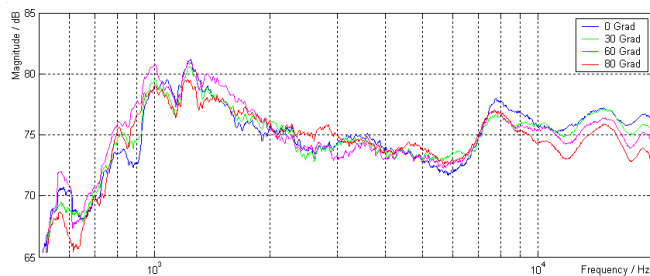


Abbildung 2: gemessene Amplitudenfrequenzgänge bei unterschiedlichen Abstrahlwinkeln

Zur Erstellung des Anregungssignals wurden die winkelabhängigen Amplitudenfrequenzgänge zunächst gemittelt, und im nächsten Schritt die Frequenzbereiche unterhalb von 1 kHz und oberhalb von 20 kHz mit den Amplitudenwerten bei 1 kHz bzw. 20 kHz überschrieben. Danach wurde der Amplitudenfrequenzgang derart verschoben, dass dessen Minimum bei 0 dB lag. Durch Invertierung wurde nun ein Amplitudenfrequenzgang gebildet, der invers zum Schallsender verläuft und somit diesen im angestrebten Übertragungsbereich korrigiert. Um Frequenzen außerhalb des Übertragungsbereiches zu unterdrücken, wurden noch ein Hochpassfilter mit 12 dB pro Oktave bei 1 kHz und ein Tiefpassfilter mit 12 dB pro Oktave bei 20 kHz gesetzt. Den Amplitudenfrequenzgang des zu konstruierenden Anregungssignals zeigt Abbildung 3.

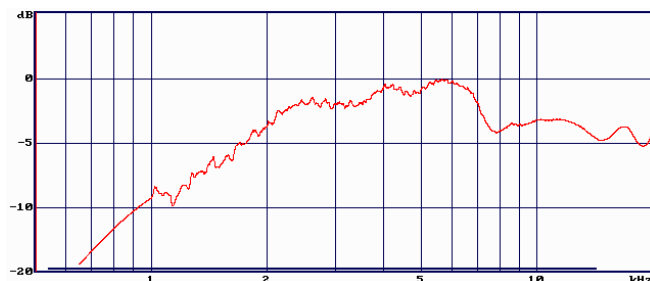


Abbildung 3: Amplitudenfrequenzgang des für die Vorkorrektur zu erstellenden Anregungssignals

Für das zu erstellende Anregungssignal wurde nun die Gruppenlaufzeit derart berechnet, dass der Anstieg im aktuellen Frequenzschritt der Energie des Anregungssignals im entsprechenden Frequenzschritt folgt. Dazu wurde das Messprogramm Monkey Forest verwendet, das über eine entsprechende eingebaute Funktion verfügt. Anschließend wurde aus der Gruppenlaufzeit der Phasengang berechnet und danach aus Amplituden- und Phasenfrequenzgang der Realteil und Imaginärteil des zu erstellenden Anregungssignals bestimmt. Das Anregungssignal entsteht danach durch inverse FFT als Sweepersignal mit konstanter Hüllkurve, wodurch sich Messsystem und Untersuchungsobjekt optimal aussteuern lassen. Abbildung 4 zeigt die

Amplitudenfrequenzgänge bei einem Abstrahlwinkel von 30° mit und ohne Vorkorrektur.

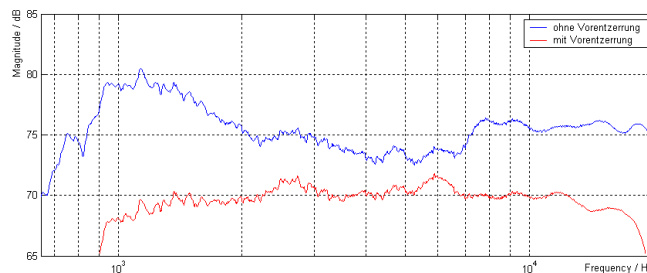


Abbildung 4: gemessene Amplitudenfrequenzgänge bei einem Abstrahlwinkel von 30° mit (rot) und ohne (blau) Vorkorrektur

Nachkorrektur

Zur Erstellung einer Funktion für die Nachkorrektur wurde das Übertragungsverhalten einer Sender-Empfänger-Kombination gemessen. Danach wurde eine Zielfunktion mit konstantem Amplitudenfrequenzgang und Nullphasengang erstellt und aus beiden durch Division die zur Nachkorrektur notwendige Funktion erzeugt. In dieser wurden dann wieder die Frequenzbereiche unterhalb von 1 kHz und oberhalb von 20 kHz überschrieben, da dort keine Korrektur vorgenommen werden muss. Als letzter Schritt wurden zur Unterdrückung von Störungen noch Filter mit 24 dB pro Oktave als Hochpass bei 1 kHz und als Tiefpass bei 20 kHz eingefügt. Abbildung 5 zeigt den Amplitudenfrequenzgang der Funktion für die Nachkorrektur.

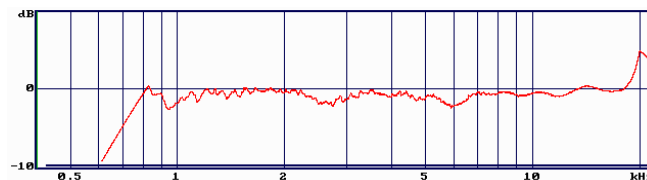


Abbildung 5: Amplitudenfrequenzgang der Funktion zur Nachkorrektur des Übertragungsverhaltens einer Sender-Empfänger-Kombination

Zusammenfassung

Mit der Vorkorrektur kann der über den Abstrahlbereich gemittelte Amplitudenfrequenzgang eines Schallsenders kompensiert und die Messung an das Störspektrum des Untersuchungsobjektes angeglichen werden. Die Nachkorrektur kompensiert das komplexe Übertragungsverhalten von Schallwandlern und Messsystem und unterdrückt Störungen. Vor- und Nachkorrektur lassen sich unter MATLAB effizient in den Messalgorithmus einbetten.

Literatur

- [1] Arnold, K., 2000: Ein experimentelles Verfahren zur akustischen Tomografie in der atmosphärischen Grenzschicht. Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig
- [2] Müller, S.: Building Excitation Signals. Dokumentation zum Messsystem Monkey Forest