

Messung der Bodenimpedanz im Freiland

Roland Kruse, Ping Rong, Volker Mellert

Universität Oldenburg, Institut für Physik, 26111 Oldenburg, Email:roland@aku.physik.uni-oldenburg.de

Einleitung

Die Impedanz von Böden ist ein wichtiger Parameter für die Vorhersage der Schallausbreitung im Freiland. Im Allgemeinen kann sie nur mit *in-situ* Verfahren bestimmt werden, da die in Laborverfahren [1] eingesetzten kleinen Proben nicht repräsentativ für den häufig geschichteten und inhomogenen Boden sind. Verbreitet für die *in-situ* Impedanzmessung sind Impuls- Echo Verfahren [2] sowie das Transferfunktions- (Zwei-Mikrofon-) Verfahren [3]. Eine Variante des Letzteren ist in der Norm ANSI S1.18 [4] standardisiert, jedoch ist erst in der nächsten Revision eine Direktbestimmung der Impedanz vorgesehen. Die Verwendung eines Verfahrens in einer Norm erfordert ein hohes Maß an Anwendungssicherheit (Robustheit). In diesem Zusammenhang wurde untersucht, wie empfindlich das Transferfunktionsverfahren auf geringe und kaum vermeidbare Messunsicherheiten reagiert. Dieses können sowohl Ungenauigkeiten in der Geometrie als auch der Transferfunktion sein. Abschließend wird eine Geometrie vorgeschlagen, die besonders unempfindlich auf solche Messfehler reagiert. Alle präsentierten Impedanzen sind normalisiert und folgen einer $\exp(+i\omega t)$ Zeitabhängigkeit.

Problemdarstellung

Messungen der Transferfunktion wurden an fünf Positionen auf einem Fußballplatz ausgeführt. Schallquelle war ein 10 cm Lautsprecher in einer $(13 \text{ cm})^3$ Box. Das Testsignal war rosa Rauschen mit einem Pegel von 80 dB(A). Als Mikrofone wurden B&K 4189 mit Windschutz eingesetzt. Die Transferfunktion selbst wurde mit B&K PULSE 10 gemessen. Geometrie B aus [4] wurde verwendet: Quellhöhe (h_s) = 20 cm, oberes Mikrofon (h_{ru}) = 20cm, unteres Mikrofon (h_{rl}) = 5 cm, Abstand Quelle – Mikrofone (R) = 1 m. Zur Ermittlung der Impedanz aus der Geometrie und der Transferfunktion wurde ein verbreitetes Schallfeldmodell für lokal reagierende Oberflächen („F-term solution“) aus [5] benutzt. Da eine analytische Lösung nach der Oberflächenimpedanz nicht möglich ist wurde das Newton- Raphson Verfahrens verwendet, um die Impedanz zu finden, für der die gemessene und die vorhergesagte Transferfunktion übereinstimmen. Diese sehr effiziente Lösung wurde in [6] vorgeschlagen. Alle Berechnungen erfolgten mit Matlab 2006b, die m-files sind auf der Webseite des Autors [7] zu finden. Das Ergebnis dieser Messung findet sich in Abb.1. Während die Impedanz ab ca. 400 Hz gut den Vorhersagen für poröse Absorber entspricht ist der unterhalb dieser Frequenz zu beobachtende Abfall nicht zu erwarten.

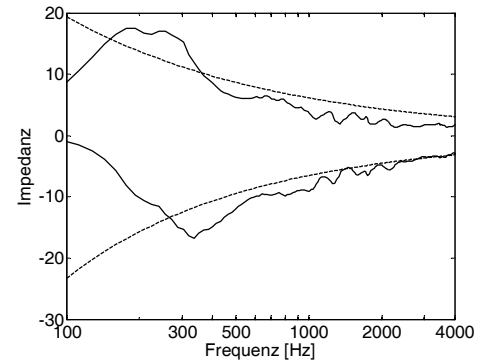


Abbildung 1: Impedanz einer Rasenfläche, bestimmt mit dem Transferfunktionsverfahren und Geometrie B [4], sowie angepasstes Absorbermodell (- - -).

Einfluss von Messfehlern

Zur Vorhersage des Einflusses von Messungenauigkeiten, insbesondere im Frequenzbereich unter 400 Hz, wurde zunächst ein Zwei- Parametermodell [4] im Frequenzbereich 400 – 4000 Hz angepasst, um eine Abschätzung der Impedanz Z_0 unterhalb dieses Bereiches zu erhalten (Abb.1). Die Absorberparameter ergaben sich zu $\sigma_e = 200 \text{ kPas/m}^2$ und $\alpha = 40 \text{ m}^{-1}$, vergleichbar mit den Angaben der ANSI S1.18 für Rasen. Mittels dieser Impedanz wurde, unter Verwendung der Geometrie B, die Transferfunktion bestimmt. Anschließend wurde mit einer leicht veränderten Geometrie oder einer veränderten Transferfunktion die Impedanz erneut berechnet und mit Z_0 verglichen. In Abb.2 ist das Ergebnis einer Änderung der Transferfunktion um +0,2 dB bzw. +0,5° dargestellt. Man erkennt den großen Effekt dieser kleinen Fehler, unter ca. 300 Hz weicht die Impedanz deutlich von „Sollwert“ ab. Die Abweichungen sind nicht nur frequenzabhängig. Wie in Abb. 3 zu erkennen sind die Effekte der einzelnen Fehler, hier Betrag und Phase der Transferfunktion bei 250 Hz, nicht unabhängig.

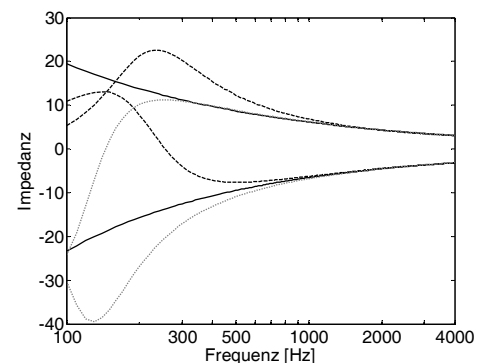


Abbildung 2: Auswirkung eines Fehlers von +0,2 dB (- - -) bzw. +0,5° (···) in der Transferfunktion auf die vorhergesagte Impedanz der Rasenfläche.

Weiterhin sind die Effekte unsymmetrisch: Für die meisten Fehlerkombinationen ist der Realteil der Impedanz zu niedrig und der Imaginärteil zu hoch. Dies entspricht gut der Beobachtung (Abb.1).

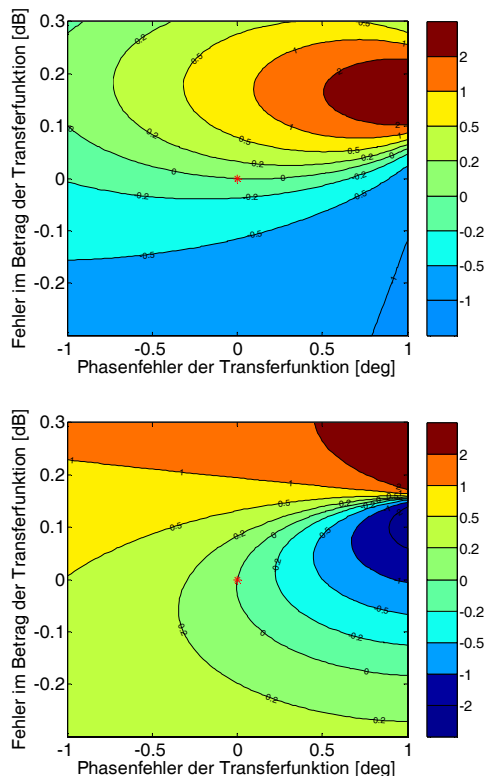


Abbildung 3: Relativer Fehler der Impedanz aufgrund von Fehlern in Betrag und Phase der Transferfunktion bei 250 Hz. Realteil oben, Imaginärteil unten.

Äquivalente Untersuchungen bezüglich des Einflusses von Ungenauigkeiten in der Messgeometrie ergaben, dass diese einen geringeren Einfluss auf das Ergebnis besitzen. Jedoch führen auch Fehler in den Mikrofonhöhen zu nicht unwesentlichen Abweichungen.

Optimierung der Geometrie

Die Empfindlichkeit des Transferfunktionsverfahrens gegenüber Ungenauigkeiten ist abhängig von der gewählten Geometrie. Es wurde daher versucht, eine Geometrie zu finden, die im Frequenzbereich von 100 – 400 Hz möglichst robust ist. Dies geschah unter den in Tab. 1 angegebenen Grenzen für den Bereich der Geometrie sowie den Annahmen über die praktisch erreichbare Messgenauigkeit. Es wurde für alle Geometrien der mittlere relative Fehler ATE gemäß Gl. 1 berechnet. Hierbei waren E_x die Standardabweichungen als Folge der Einzelfehler in Transferfunktion und Geometrie, Z_0 die „wahre“ Impedanz und N die Anzahl der Frequenzpunkte. Die Berechnung erfolgte somit in Analogie zum Gauss’schen Fehlerfortpflanzungsgesetz. Die Geometrie mit kleinstem ATE ergab sich:

$h_{rl} = 5$ cm, $h_{ru} = 95$ cm, $h_s = 50$ cm, $R = 3$ m.
 Im Fall der Rasenfläche beträgt der mittlere erwartete Fehler im Bereich 100 – 400 Hz 19,5 % im Vergleich zu 55,2 % für Geometrie B: es konnte eine wesentliche Verbesserung

gegenüber den in der Norm vorgeschlagenen Geometrien erzielt werden. Es ist zu beachten, dass der Fehler mit zunehmender Impedanz größer wird. Bei härteren Oberflächen ist somit selbst bei der Verwendung einer optimierten Geometrie mit inakzeptablen Fehlern bzw. der Notwendigkeit einer unter Freilandbedingungen nicht realisierbaren Messgenauigkeit zu rechnen. Die Anwendung des Transferfunktionsverfahrens kann in solchen Situationen nicht empfohlen werden.

Tabelle 1: Randbedingungen für die Optimierung der Geometrie. Bereich der Geometrie sowie Abschätzung der Messgenauigkeit.

	Bereich [m]	Fehlerannahme
Transferfunktion		$\pm 0,2$ dB; $\pm 0,5^\circ$
Untere Mikrofonhöhe	0,05 - 1	± 2 cm
Abstand oberes/unteres Mikrofon	0,1 - 1	± 2 cm
Quellenhöhe	0,2 – 1,5	± 2 cm
Abstand Quelle- Mikr.	1 - 3	± 5 cm

$$ATE = \frac{1}{N} \sum_f \frac{\sqrt{E_T^2 + E_{hru}^2 + E_{hrl}^2 + E_{hs}^2 + E_R^2}}{|Z_0|} \quad (1)$$

Literatur

1. ISO 10534-2. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method. International Organization for Standardization. 1998
2. CEN/TS 1793-5. Road traffic noise reducing devices - Test method for determining the acoustic performance - Intrinsic characteristics - In situ values of sound reflection and airborne sound insulation. European Committee for Standardization. 2003
3. Allard JF, Champoux Y. In Situ Two-Microphone Technique for the Measurement of the Acoustic Surface Impedance of Materials. Noise Control Engineering Journal (1989); 32(1): 15-23
4. ANSI S1.18-1999 (R2004). Template Method for Ground Impedance. American National Standards Institute. (2004)
5. Nobile MA, Hayek SI. Acoustic propagation over an impedance plane. Journal of the Acoustical Society of America (1985); 78(4): 1325-1336
6. Taherzadeh S, Attenborough K. Deduction of ground impedance from measurements of excess attenuation spectra. Journal of the Acoustical Society of America (1999); 105(3): 2039-2042
7. <http://www.physik.uni-oldenburg.de/aku/22103.html>