

23 (1996) Neue Forschungsergebnisse, kurz gefaßt

J. Krüger

## Impedanzmessungen mit einer verbesserten 1-Mikrofon-FFT-Methode

### Einleitung

Zur Bestimmung des Absorptionsgrades und der Impedanz von Proben im Kundtschen Rohr existieren inzwischen mehrere unterschiedliche Verfahren. Die älteste und zugleich aufwendigste Methode ist die schrittweise Abtastung der Stehwellen vor der Probe. Eine deutlich schnellere Messung der Absorption wurde durch die Auswertung der spektralen Transferfunktion zwischen zwei feststehenden Mikrofonen [1] möglich. Die weitere Vereinfachung bzw. Verbesserung dieser Methode führte schließlich zur Verwendung nur eines Mikrofonen [2] und damit zur Einsparung des sehr aufwendig kalibrierten Mikrofonpaares bei gleichzeitiger Erhöhung der Genauigkeit der Meßergebnisse. Am Institut für Bauphysik wird diese 1-Mikrofon-FFT-Methode seit 1992 erfolgreich eingesetzt [3]. Im Zusammenhang mit dem Aufbau eines akustischen Meßkanals [4] mit einem Querschnitt von 250 x 250 mm<sup>2</sup> und 7,5 m Länge wurde die Qualität des Verfahrens weiter gesteigert. Die dabei realisierten Modifikationen werden im folgenden beschrieben.

### Modifikation der Meßanordnung

Für die Berechnung des komplexen Reflexionsfaktors  $\underline{R}$  mit Hilfe der FFT-Methode benötigt man die Transferfunktion  $\underline{H}_{12}$  zwischen zwei definierten Punkten:

$$\underline{R} = \frac{\underline{H}_{12} - e^{-jks}}{e^{+jks} - \underline{H}_{12}} e^{+j2kL} \quad (1).$$

Der Verlauf von  $\underline{H}_{12}$  ergibt sich aus den Übertragungsfunktionen zwischen dem Lautsprecher und dem Mikrofon an den Positionen M1 bzw. M2. Die Übertragungsfunktionen werden bei der 1-Mikrofon-FFT-Methode durch zwei sequentielle Messungen ermittelt. Die zweimalige Messung mit demselben Mikrofon führt zu einer Kompensation der systematischen Fehler des Mikrofonen und der sich anschließenden Signalverarbeitung. Die so mit einfachen Mikrofonen erreichbaren genauen Meßergebnisse hatten zur Folge, daß in einem Normentwurf [5] die 1-Mikrofon-FFT-Methode für Präzisionsmessungen der 2-Mikrofon-FFT-Methode vorgezogen wurde.

Beim Einsatz eines längeren akustischen Meßkanals zur Impedanzmessung ergibt sich aus dem Abstand zwischen

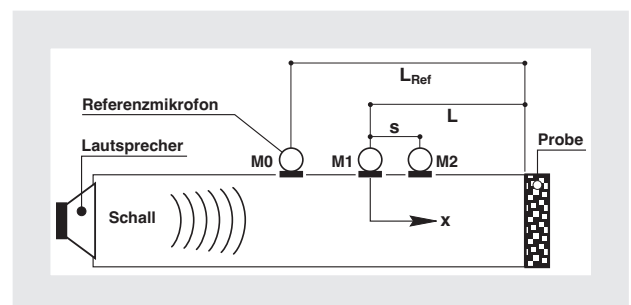


Bild 1: Modifizierte 1-Mikrofon-FFT-Methode zur Absorptionsgradmessung

dem Lautsprecher und den Mikrofonpositionen M1 bzw. M2 eine akustische Laufzeit  $t_L$ . Während dieser Zeit nimmt das Mikrofon keine von der Quelle erzeugten Signale auf. Erreicht  $t_L$  im Vergleich zur gesamten Meßzeit  $t_M$  einen zu großen Wert, so wird das Meßergebnis verfälscht (Delay-Effekt). Die Korrektur durch eine gezielte Verzögerung der Datenerfassung zwischen beiden Kanälen stellt hohe Anforderungen an die Analytoren und ist nur in sehr komplexen Geräten implementiert. Im vorliegenden Fall war das Verhältnis  $t_L/t_M = 0,1$  und nur durch zeit- und rechenaufwendiges Erhöhen der FFT-Länge bzw. der Meßzeit  $t_M$  eine genaue Bestimmung insbesondere geringer Absorptionsgrade möglich. Mit Hilfe eines ortsfesten Referenzmikrofonen, welches das Schallfeld in der Nähe der ersten Mikrofonposition abtastet (Bild 1), wird dieses Problem fast ganz beseitigt. Es ergeben sich im wesentlichen drei Vorteile:

- Die akustische Laufzeit  $t_L$  wird erheblich verkürzt.
- Die Übertragungsfunktion des Lautsprechers und dessen nichtlineare Störungen werden ausgeblendet.
- Beide Meßsignale stammen von Mikrofonen und befinden sich im gleichen Dynamikbereich, was eine bessere Aussteuerbarkeit zur Folge hat.

Die Übertragungsfunktion  $\underline{H}_{12}$  berechnet sich nunmehr aus den zwei Übertragungsfunktionen zwischen dem Referenzmikrofon an der Position M0 und dem Mikrofon an den Punkten M1 bzw. M2. An das Referenzmikrofon werden ebenfalls keine hohen Qualitätsansprüche gestellt, da sich systematische Fehler wiederum durch die sequentielle Meß-

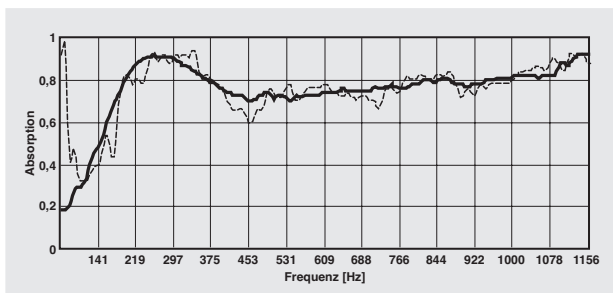


Bild 2: Gemessene Absorption einer 10cm dicken Probe bei Verwendung der Lautsprecherspannung (dünn) bzw. der Mikrofonspannung (fett) als Referenz

weise kompensieren. Der Vorteil der Einfachheit bei hoher Meßgenauigkeit bleibt somit auch bei der modifizierten 1-Mikrofon-FFT-Methode erhalten.

### Modifikation der Analyse

Ein entscheidendes Merkmal für die Genauigkeit der Messungen bzw. der Qualität des Rohres ist dessen Absorption bei schallhartem Abschluß. Es zeigt sich, daß bei einem endlichen Abstand der Mikrofonposition M1 von der Wand die Schallwellen nicht vollständig reflektiert werden ( $\alpha > 0$ ). Diese unvermeidliche Restabsorption resultiert aus folgenden Tatsachen :

- Die Rohrwände sind nicht ideal schallhart.
- Der Schnelleabfall zur Wand führt zu einer inneren Reibung der Luft.
- An der Wandfläche kommt es zur Wärmeableitung.

In [3] wurde die Summe aller drei Faktoren in einer Kalibrierung im schallhart abgeschlossenen Rohr ermittelt, um dann iterativ die resultierende komplexe Ausbreitungskonstante  $\underline{\Gamma}$  zu berechnen. Mit diesem Ergebnis können alle folgenden Messungen an Absorberproben korrigiert werden. Durch den Einsatz von besonders schweren, stabilen, einschaligen Platten bei der Konstruktion von Kundtschen Rohren ist es möglich, die Verluste durch Mitschwingen der Wände zu minimieren. Die Defizite durch viskose Reibung und Wärmeableitung hingegen sind nur von den Abmessungen des Rohres abhängig und damit anhand von Gleichung (2) und (3) berechenbar [6],

$$\underline{\Gamma} = jk_0 + \alpha_L \quad (2)$$

$$\underline{R} = \frac{H_{12} - e^{-\underline{\Gamma}s}}{e^{\underline{\Gamma}s} - H_{12}} e^{2\underline{\Gamma}L} \quad (3)$$

wobei folgende Formelzeichen verwendet werden :

$\underline{\Gamma}$	komplexe Ausbreitungskonstante
$k_0$	Wellenzahl
$\alpha_L$	längenspezifische Dämpfung
$U$	Umfang des Rohres
$S$	Querschnittsfläche des Rohres
$\omega$	Kreisfrequenz
$c_0$	Schallgeschwindigkeit in Luft (343m/s bei 20°)
$\eta_e$	effektiver Viskositätskoeffizient nach [6]
$\rho_0$	Dichte der Luft bei 20°C (1,21 kg/m³)

Um den Einfluß der Restabsorption zu eliminieren, kann die Auswertgleichung (1) nun modifiziert werden :

$$\alpha_L = \frac{U}{S} \frac{\sqrt{\eta_e \omega}}{c_0 \sqrt{8\rho_0}} \quad (4).$$

### Meßergebnisse

Bild 2 zeigt den Vergleich der Absorptionsgradmessungen an einer 10 cm dicken Schaumprobe ( $r = 9,1 \text{ kPas/m}^2$ ). Bei ansonsten gleichen Meßbedingungen wurde im ersten Fall die Lautsprecherspannung und im zweiten Fall die Spannung eines Mikrofons an der Position M0 als Referenzsignal verwendet. Es wird deutlich, daß durch Verwendung eines Referenzsignals direkt aus dem Kanal in der Nähe der Mikrofonpositionen M1 bzw. M2 das Meßergebnis weniger verrauscht ist. In Bild 3 wird die besonders kritische Messung der Restabsorption im eingangs beschriebenen Meßkanal mit und ohne Kompensation gegenübergestellt. Hauptsächlich bei hohen Frequenzen wird der Effekt der Kompensation sichtbar. Sogar in einem Rohr mit kleinem Verhältnis von Umfang  $U$  zu Querschnittsfläche  $S$  ist es somit möglich, die hohen Qualitätsanforderungen nach [5] in einem größeren Frequenzbereich zu erfüllen.

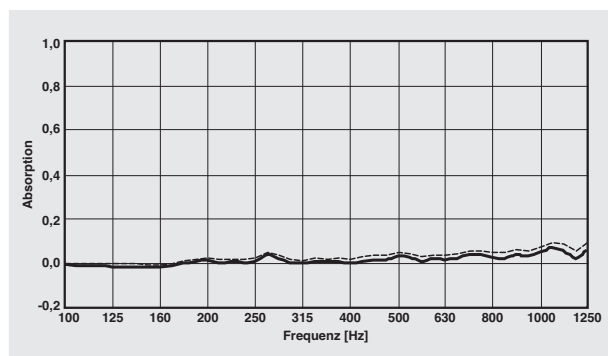


Bild 3: Gemessene Restabsorption eines Meßkanals mit (fett) und ohne (dünn) Kompensation

### Literatur

- [1] Chung, J.Y.; Blaser, D.A.: Transfer function method of measuring induct acoustic properties. J.A.S.A. 68 (1980), H. 3, S. 907-913.
- [2] Chu, W.T.: Transfer function technique for impedance and absorption measurements in an impedance tube using a single microphone. J.A.S.A. 80 (1986), H. 2, S. 555-560.
- [3] Frommhold, W.; Hunecke, J. : Verbesserung der Impedanzmessung im Rohr. IBP Mitteilungen 19 (1992), Nr. 227.
- [4] Krüger, J.: Realisierung eines akustischen Meßkanals für aktive Schalldämpfer. Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik B-TA 1 (1995).
- [5] ISO Committee Draft: Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transferfunction method. ISO CD 10534-2.
- [6] Kinsler, E.L.; Frey, A.R., Coppens, A.B., Sanders, J.V.: Fundamentals of Acoustics. John Wiley & Sons, Inc., New York 1982, S. 206-210.

Die Untersuchungen wurden mit Unterstützung der Volkswagen-Stiftung durchgeführt.