

# Abhängigkeit des Absorptions- und des Transmissionsgrades von Schäumen vom Einbauwinkel im Impedanzrohr

Jana Tietz<sup>1</sup>, Martin Radestock<sup>2</sup>, Michael Sinapius<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institut für Adaptronik und Funktionsintegration, TU Braunschweig*

<sup>2</sup> *Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, DLR Braunschweig*

## Einleitung

Leichtbau sowie akustischer Komfort sind im Bereich der Mobilität wesentliche Entwicklungsfaktoren. Um beide Ziele zu vereinen, können Schäume oder faserige Kunststoffe eingesetzt werden. Diese sind leicht und haben aufgrund ihrer Poren ein hohes Schallabsorptionsvermögen im Vergleich zu anderen Materialien. Zur Auslegung und zum Vergleich dieser Dämmmaterialien ist das Impedanzrohr nützlich, da mit diesem das Schallabsorptions- und Schalltransmissionsverhalten relativ einfach und kostengünstig ermittelt werden kann. Grebel et al. stellten bei Messungen am Impedanzrohr fest, dass der gemessene Absorptionsgrad von Schäumen vom Einbauwinkel abhängt. Dies stellt eine Herausforderung für die Auslegung sowie den Vergleich verschiedener Materialien dar [1].

Aus diesem Grund soll in diesem Artikel die Abhängigkeit des Absorptions- und Transmissionsgrades vom Einbauwinkel im Frequenzbereich zwischen 230 und 2000 Hz untersucht werden. Aus den Ergebnissen wird eine Vorgehensweise zur Analyse von Dämmmaterialien im Impedanzrohr zum Erzeugen reproduzierbarer Ergebnisse abgeleitet.

## Ziel und Vorgehen

Sowohl in den für Schallabsorptionsgradmessungen als auch Schalltransmissionsgradmessungen im Impedanzrohr allgemein verwendeten Normen (DIN EN ISO 10534-2 [2], ASTM E2611-17 [3]) sind nur unzureichende Anweisungen zu Fertigung und Montage der zu vermessenden Proben aufgeführt [1][4]. In der vorliegenden Untersuchung wird der von Grebel et al. für Absorptionsgrade aufgezeigte Aspekt der Abhängigkeit vom Drehwinkel beim Einbau der Probe in das Impedanzrohr aufgegriffen. Als zusätzlicher Aspekt soll dieser Effekt bei der Schalltransmission untersucht werden. Es ist nicht Ziel der vorliegenden Arbeit, die Richtungsabhängigkeit bei der Vermessung poröser Materialien zu ergründen, sondern dieses Problem für praktische Anwendungen zu lösen. Das Ziel ist also die Richtungsabhängigkeit der Absorptions- und Transmissionsgrade von Dämmmaterialien zu bestimmen und daraus eine Messprozedur und Analyse zu entwickeln, welche

trotzdem reproduzierbare Messergebnisse liefern. Insbesondere soll die Vorgehensweise Ergebnisse liefern, die unabhängig von dem eingesetzten Winkel der Probe sind, um die Vergleichbarkeit von Dämmmaterialien zu gewährleisten.

Als Forschungshypothese dient daher die Annahme, dass sich eine experimentelle Vorgehensweise festlegen lässt, mit welcher Absorptions- und Transmissionsgrad von Dämmmaterialien trotz Richtungsabhängigkeit reproduzierbar ermittelt werden können. Um diese Hypothese zu überprüfen, werden Absorptions- und Transmissionsgrad im Impedanzrohr vermessen. Dabei werden folgende Schritte durchgeführt:

1. Messung der Absorptionsgrade verschiedener Schalldämmmaterialien unter Varianz des Einbauwinkels um die Längsachse des Impedanzrohres
2. Messung der Transmissionsgrade der verschiedenen Dämmmaterialien unter Varianz des Einbauwinkels
3. Bewertung der Ergebnisse und Vergleich mit den Herstellerangaben
4. Feststellung der Richtungsabhängigkeit von Absorptions- und Transmissionsgrad sowie Abgleich mit bestehenden Untersuchungen [1]
5. Ableiten einer effizienten, experimentellen Vorgehensweise, die richtungsunabhängige Absorptions- und Transmissionsgrade ergibt

## Messmethodik: Absorptions- und Transmissionsgrad

Die verwendeten Messmethoden zur Ermittlung von Absorptions- und Transmissionsgrad inklusive der theoretischen Grundlagen werden nachfolgend kurz erläutert. Weitere Details sind den angegebenen Normen zu entnehmen. In Abbildung 1 ist das dafür verwendete Impedanzrohr, welches für Absorptions- und Transmissionsgradmessungen angepasst werden kann, dargestellt.

### Absorptionsgradmessung

Der Absorptionsgrad wird nach DIN EN ISO 10534-2 im Impedanzrohr bestimmt [2]. Dazu wird der in Abbildung 2 dargestellte Aufbau verwendet.



Abbildung 1: Impedanzrohr zur Messung von Absorptions- und Transmissionsgrad

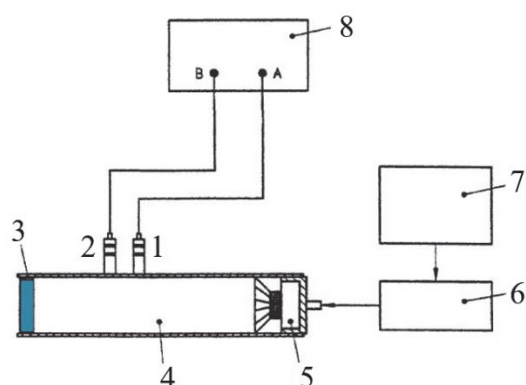


Abbildung 2: Messaufbau zur Absorptionsgradmessung im Impedanzrohr nach DIN EN ISO 10534-2 [2]

An einem Ende des Impedanzrohres (4) befindet sich die Schallquelle (5), die über den Signalgenerator (7) und den Verstärker (6) angesteuert wird. Von der Schallquelle werden ebene Wellen im Rohr erzeugt. Das andere Ende des Rohres wird mit einer schallharten Wand abgeschlossen. Direkt vor dieser befindet sich der zylindrische Probekörper (3). Die beiden in der Wand mit definierter Position platzierten Mikrofone (1,2) messen den Schalldruck der einfallenden und der reflektierten Schallwellen. Das Frequenzanalytatorsystem (8) kann aus den beiden Signalen, unter der Annahme eines eindimensionalen Wellenfeldes, die Schallwellen trennen und Übertragungsfunktionen der einfallenden Schallwellen  $H_I$ , der reflektierten Schallwellen  $H_R$  und des gesamten Schallfeldes  $H_{12}$  bestimmen. Daraus wird nach Formel 1 der Absorptionsgrad  $\alpha$  bestimmt [2].

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - \left| \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \right|^2 \quad (1)$$

### Transmissionsgradmessung

Zur Bestimmung des Transmissionsgrades wird die Two-Load-Methode nach ASTM E2611-17 verwendet [3]. Der Aufbau ist in Abbildung 3 dargestellt.

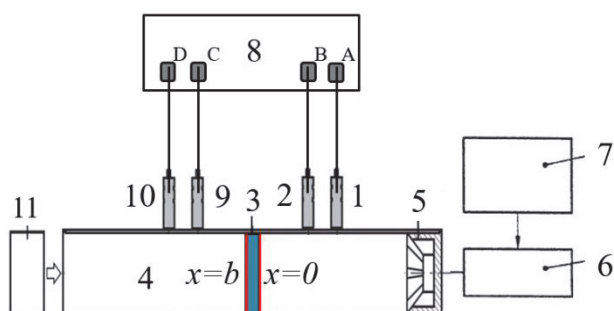


Abbildung 3: Messaufbau zur Transmissionsgradmessung im Impedanzrohr nach ASTM E2611-17 [3]

Das System zur Schallerzeugung ist dasselbe wie bei der Absorptionsgradmessung. Das Impedanzrohr (4) selbst wird jedoch erweitert, um ein Rohrstück inklusive zweier Mikrofone (9,10). Es werden die Schalldrücke an vier definierten Positionen, zwei vor (1,2), zwei hinter (9,10) der Probe (3) bestimmt. Aus diesen Signalen können die Schallschnellen und Schalldrücke in den Bezugsebenen an der Vorder- und Hinterseite ( $x=0$ ,  $x=b$ ) der Probe ermittelt werden. Daraus lässt sich ein Gleichungssystem wie in Formel (2a) mit der Transfermatrix aufstellen. Die 4 Komponenten der Transfermatrix lassen sich bestimmen, indem zwei Messungen mit unterschiedlichen Abschlussimpedanzen  $A$  (11) durchgeführt werden und so vier Gleichungen zur Verfügung stehen. Die Elemente dieser Transfermatrix werden dann für die Bestimmung des Transmissionsgrades eingesetzt, siehe Gleichung (2b) [3].

$$\begin{bmatrix} p_A \\ u_A \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_A \\ u_A \end{bmatrix}_{x=b} \quad (2a)$$

$$\tau = \frac{2e^{jk_0b}}{T_{11} + (T_{12}/\rho c) + \rho c T_{12} + T_{22}} \quad (2b)$$

### Proben und Durchführung

Für die Bestimmung von Absorptions- und Transmissionsgrad wurden fünf unterschiedliche Schalldämmmaterialien untersucht, um zu überprüfen, ob bei verschiedenen Materialien, Dichten und Porositäten die akustische Richtungsabhängigkeit unterschiedlich stark ausgeprägt ist. So sollen für verschiedene Arten von Dämmmaterialien eine vom Einbauwinkel unabhängige Messprozedur empfohlen werden können. Die Materialien sind inklusive der wichtigsten Eigenschaften in Tabelle 1 aufgeführt.

Die zylindrischen Proben wurden aus Dämmmatten der aufgeführten Materialien hergestellt. Dazu wurde ein zum Impedanzrohr zugehöriges rundes Messer in eine Tischbohrmaschine eingespannt und die Proben ausgeschnitten. Wie bereits erwähnt, gibt es in den Normen keine Vorgaben zur Fertigung der Probekörper.

Für jedes der fünf Materialien werden vier Proben getestet. Je Probe werden 36 Absorptions- und 36 Transmissionsgradmessungen mit einem um  $\Delta\beta = 10^\circ$  verschiedenen Einbauwinkel durchgeführt. Der Arbeitsfrequenzbereich des verwendeten Impedanzrohres liegt zwischen 230 und 2000 Hz. Aufgrund des Umfangs der Messungen werden im Folgenden nur die Ergebnisse der Absorptionsgradmessungen vom Polyethylenschaumstoff und der Transmissionsgradmessungen vom Polyurethanschaumstoff dargestellt. Die weiteren Ergebnisse werden in der Studienarbeit „Richtungsabhängigkeit des Absorptions- und des

Tabelle 1: Eigenschaften der untersuchten Dämmmaterialien

Material	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Dicke [mm]	Struktur
Melaminschaum (Basotect <sup>®</sup> )	9	30	offenzelliger Schaum
Polyethylen (PE)	25,2	57	geschlossenzelliger Schaum
Polyurethan (PU)	25-30	70	offenzelliger Schaum
Polyesterwolle	20	42	offenzellig, faserig
Polyesterwolle	40	40	offenzellig, faserig

Transmissionsgrades von Schäumen im Impedanzrohr“ beschrieben und diskutiert.

## Ergebnisse

Zur Bewertung der Richtungsabhängigkeit wurde ein Schwellenwert von 0,05 für die Spannweite der Messwerte (Differenz zwischen höchstem und niedrigstem gemessenen Absorptionsgrad bei einer Frequenz) aller Einbauwinkel gewählt. Zusätzlich wurde der direkte Zusammenhang zwischen Absorptions- bzw. Transmissionsgrad und Einbauwinkel betrachtet. Richtungsabhängigkeit bedeutet hier, dass sich die Absorptions- bzw. Transmissionsgradkurve mit jeder Drehung der Probe um  $10^\circ$  etwas verschiebt und nach einer Rotation der Probe um  $360^\circ$  wieder auf den Werten bei  $0^\circ$  liegt.

Genau dieses Verhalten ergibt sich für den Absorptionsgrad des Polyethylenschaumes. Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, liegt ein starker Einfluss des Einbauwinkels im gesamten Frequenzbereich vor. Zwischen 1000 und 1500 Hz liegt die Spannweite deutlich über 0,05. Dies gilt auch für den Bereich oberhalb 1900 Hz. Im gesamten Frequenzbereich liegt eine Richtungsabhängigkeit vor, wie sie im vorherigen Abschnitt beschrieben wurde. Dieses Verhalten zeigte sich in ähnlichem Ausmaß auch bei den anderen Proben dieses Materials. Bei den anderen Dämmmaterialien hatte der Einbauwinkel teilweise einen Einfluss und führte zu Streuungen der Absorptionsgrade, jedoch trat nur beim Polyurethanschaumstoff eine Richtungsabhängigkeit auf.

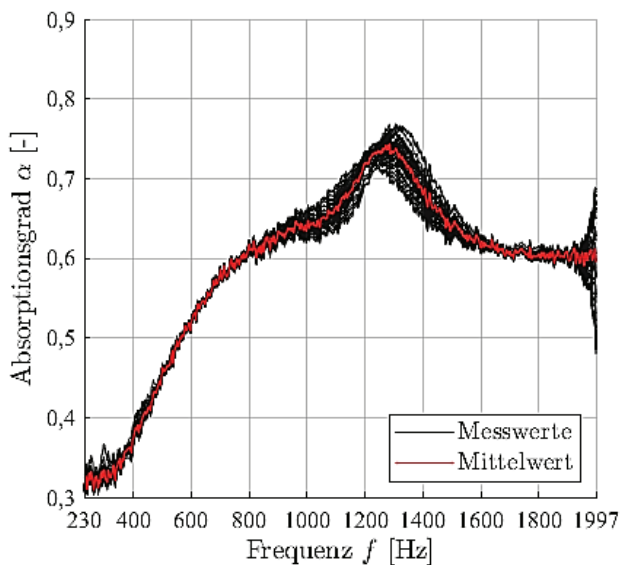


Abbildung 4: Absorptionsgrad einer Polyethylen-Probe bei 36 verschiedenen Einbauwinkeln

Der Einfluss des Einbauwinkels auf den Transmissionsgrad des Polyurethanschaumstoffs ist in Abbildung 5 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Streuung im Bereich zwischen 500 und 1700 Hz sehr gering ist. Die Unterschiede zwischen Kurven verschiedener Einbauwinkel betragen maximal 0,01. Bei Frequenzen unter 400 Hz und über 1700 Hz streuen die Messwerte stark. Mit sinkender bzw. zunehmender Frequenz verstärkt sich dies weiter. Der Schwellenwert wird in diesen Frequenzbereichen weit überschritten. Es kann eine

Richtungsabhängigkeit vom Einbauwinkel oberhalb 1700 Hz festgestellt werden. Diese liegt im unteren Frequenzbereich nicht vor. Bei den anderen untersuchten Dämmmaterialien kommt es auch zu Spannweite oberhalb des Schwellenwertes, jedoch liegen keine Richtungsabhängigkeiten vor.

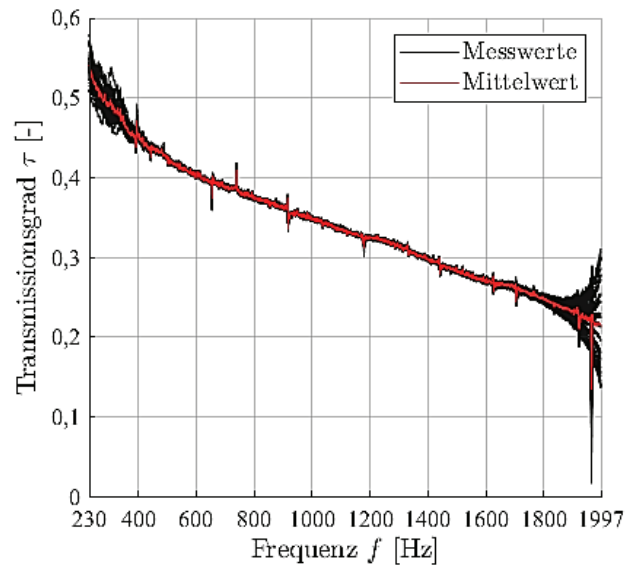


Abbildung 5: Transmissionsgrad einer Polyurethan-Probe bei 36 verschiedenen Einbauwinkeln

## Fehlerquellen

Um die Ergebnisse einordnen zu können, wird an dieser Stelle auf einige Fehlerquellen hingewiesen, die zusätzlich zum Einbauwinkel Einfluss auf die Ergebnisse haben können. Zunächst können Dichte und Dicke der Proben variieren, da die Hersteller der Dämmmaterialien für diese Angaben nur eine gewisse Genauigkeit gewährleisten bzw. Toleranzen angeben, z.B.  $\pm 1,5 \text{ kg/m}^3$  für die Dichte des Melaminschaums oder  $-0/+8 \text{ mm}$  für die Dicke des PE-Schaumstoffs. Außerdem ist in den verwendeten Normen keine Angabe zur Herstellmethode für die Proben gemacht. Die verwendete Methode mit einem runden Messer führt je nach Material zu Abweichungen der zylindrischen Geometrie, beispielsweise durch Quetschung des Materials beim Schneidprozess. Dadurch kommt es dazu, dass die Mantelfläche einer Probe nicht exakt auf der Innenfläche des Rohres liegt. Des Weiteren ist kein genauer Montagevorgang in den Normen festgelegt. Durch das manuelle Einsetzen der Proben in das Impedanzrohr können die Proben unter Umständen nicht immer exakt gleich im Rohr positioniert sein. Zusätzlich können Rohrresonanzen, die sich je nach Probendicke auch noch verändern, zu Verfälschungen bei bestimmten Frequenzen führen.

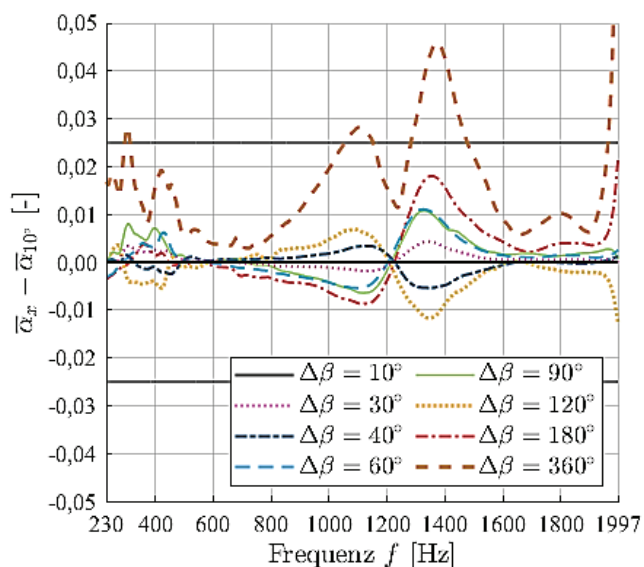
## Vorgehensweise für vom Einbauwinkel unabhängige akustische Größen

Die Prozedur zur reproduzierbaren Messung der Schallabsorptions- und Schalltransmissionsgrade basiert auf der Mittelung einer bestimmten Anzahl an Messungen mit unterschiedlichem Einbauwinkel. Die durchgeführten Messungen wurden genutzt, um Mittelwerte verschieden vieler Messungen  $\bar{\alpha}_x$  zu bilden und zu vergleichen. Diese

**Tabelle 2:** Erforderliche Anzahl an Messungen bei unterschiedlichen Einbauwinkeln für vom Einbauwinkel unabhängige Absorptions- und Transmissionsgrade

Material	Absorptionsgradmessungen	Transmissionsgradmessungen
Melaminschaum (Basotect®)	2 ( $\Delta\beta = 180^\circ$ )	9 ( $\Delta\beta = 40^\circ$ )
Polyethylenschaumstoff (PE)	2 ( $\Delta\beta = 180^\circ$ )	1 ( $\Delta\beta = 360^\circ$ )
Polyurethanschaumstoff (PU)	3 ( $\Delta\beta = 120^\circ$ )	6 ( $\Delta\beta = 60^\circ$ )
Polyesterwolle 20 kg/m <sup>3</sup>	2 ( $\Delta\beta = 180^\circ$ )	2 ( $\Delta\beta = 180^\circ$ )
Polyesterwolle 40 kg/m <sup>3</sup>	3 ( $\Delta\beta = 120^\circ$ )	6 ( $\Delta\beta = 60^\circ$ )

Mittelwerte sind abzüglich des Mittelwertes über alle 36 Messungen  $\bar{\alpha}_{10^\circ}$  beispielhaft für die Absorptionsgradmessung von PU in Abbildung 6 dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Abweichung ab einer Mittelung über 2 Messungen mit einer Einbauwinkeldifferenz von  $\Delta\beta = 180^\circ$  unter dem Schwellenwert liegt. Es ergibt sich, unter Einhaltung des Schwellenwertes von 0,05 für die Spannweite, dass die Absorptionsgradmessungen je nach Material mit zwei bzw. drei Einbauwinkeln durchgeführt werden müssen. Dies gilt ebenfalls für die Transmissionsgradmessungen der leichteren Polyesterwolle und des Polyethylenschaumstoffes. Da die Transmissionsgradmessungen von Basotect®, Polyurethanschaum und der schwereren Polyesterwolle stärkere Schwankungen aufweisen, müssen für diese Materialien mindestens 6 Messungen mit um  $60^\circ$  verschiedenen Einbauwinkeln durchgeführt und gemittelt werden. Dies ist noch einmal in Tabelle 2 für alle Dämmmaterialien aufgeführt. So können reproduzierbare Ergebnisse erhalten werden, die weniger als 0,05 voneinander abweichen. In Abhängigkeit von der zu ermittelnden Größe, aber vor allem vom Material sind also 2 bis 9 Messungen zur Mittelung notwendig, um reproduzierbare Ergebnisse zu ermitteln.



**Abbildung 6:** Abweichung der Mittelung des Absorptionsgrades über Messungen mit  $\Delta\beta = x$  von der Mittelung über 36 Messungen ( $\Delta\beta = 10^\circ$ ) der PE-Probe aus Abbildung 4

Diese Vorgehensweise ist allerdings nur sinnvoll, um verschiedene Materialien miteinander zu vergleichen. Die Absolutwerte für Absorptions- und Transmissionsgrad

werden nicht verbessert. Die bisherigen Auswertungen gehen davon aus, dass die Proben Richtungsabhängigkeiten aufweisen. Letztendlich besteht ebenfalls die Möglichkeit, dass durch die Probe das Wellenfeld im Rohr beeinflusst wird und deshalb kein eindimensionales Wellenfeld mehr vorliegt.

Ein ebenes eindimensionales Wellenfeld ist aber eine Grundannahme der der Messung und Berechnung zugrundeliegenden Theorie. Außerdem liegen in der Praxis in der Regel dreidimensionale Schallfelder vor, sodass ein eindimensionaler Absorptions- oder Transmissionsgrad nicht unbedingt eine sinnvolle Größe zum Auslegen von Dämmungen ist. Demzufolge ist in Frage zu stellen, ob die Verwendung des Impedanzrohres zur Messung absoluter Absorptions- und Transmissionsgrade überhaupt noch sinnvoll ist, da es heutzutage ganz andere Möglichkeiten gibt, wie beispielsweise die Bestimmung mittels Hallräumen.

## Fazit

Es wurde festgestellt, dass Absorptions- und Transmissionsgrade von porösen Materialien abhängig vom Einbauwinkel der Probe im Impedanzrohr sind. Die Messmethodik liefert teilweise relative Abweichungen von über 10%. Gründe dafür können Abweichungen von Geometrie und Montagevorgängen sein, da diese in den entsprechenden Normen unzureichend genau beschrieben werden. Vor allem ist die Annahme, dass das Schallwellenfeld im Impedanzrohr eindimensional ist, unzulänglich. Um Absorptions- und Transmissionsvermögen zu vergleichen ist eine Mittelung über mehrere Messungen verschiedener Einbauwinkel sinnvoll. Zur Bestimmung absoluter Absorptions- und Transmissionsgrade ist die Genauigkeit von Impedanzrohren jedoch in Frage zu stellen.

## Literatur

- [1] Grebel, A., Bös, J., Melz, T.: Messunsicherheit im Kundtschen Rohr. DAGA (2015), 209-212
- [2] DIN EN ISO 10534-2, Akustik – Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren – Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion. EN ISO 10534-2, 2001
- [3] ASTM: ASTM E2611-17 Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method. ASTM International, 2017
- [4] Horoshenkov, K.V., et al.: Reproducibility experiments on measuring acoustical properties of rigid-frame porous media (round-robin tests). The Journal of the Acoustical Society of America, 122(1): 345-353, 2007