

# Experimentelle Bestimmung des Abstrahlgrades und des inneren Verlustfaktors orthotroper Platten

Sandra Haut<sup>1</sup>, Simon Mecking<sup>1</sup>, Ulrich Schanda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Labor für Schallmesstechnik, Hochschule Rosenheim, 83024 Rosenheim,  
E-Mail: Simon.Mecking@fh-rosenheim.de

## Einleitung

Gemäß der DIN EN 12354:2000 kann die Luft- und Trittschallübertragung aus den Bauteileigenschaften ermittelt werden. Um das Verfahren auch für den Holzbau anwenden zu können, fehlen darin für Bauteile aus Holz Angaben zum *inneren Verlustfaktor* als auch zum *Abstrahlgrad*. Im Gegensatz zum Massivbau werden im Holzbau oftmals Materialien mit stark orthotropen Materialeigenschaften eingesetzt. Diese weisen ein richtungsabhängiges Kraft-Verformungs-Verhalten auf, welches großen Einfluss auf die Schallabstrahlung dieser Bauteile hat. Die in den Normen angegebenen Näherungen für den Abstrahlgrad sind für stark orthotrope Bauteile aus z.B. Brettsperholz ungeeignet.

Im Rahmen des DFG-AiF-Clusterforschungsvorhabens „Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten“, welches als ein Ziel die Anwendung der Statistischen-Energie-Analyse (SEA) für die Schallschutzprognose hat, wurden deshalb zwei typische Holzbau-Plattenmaterialien untersucht. Eine experimentelle Bestimmung des Abstrahlgrades und des internen Verlustfaktors ist unter Zuhilfenahme von Annahmen aus der SEA mit dem Hallraum-Verfahren möglich. Zum Vergleich des mit dem Hallraum-Verfahren ermittelten Abstrahlgrades wurde dieser für eine der Platten auch in einem Zweiraum-Verfahren ermittelt.

In diesem Beitrag werden beide Verfahren sowie die Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt.

## Verwendete Plattenmaterialien - Prüfkörper

Es wird eine schwach orthotrope mitteldichte Faserplatte (MDF) sowie eine stark orthotrope 3-Schicht-Platte untersucht. Relevante Kenngrößen sind in Tabelle 1 gelistet.

**Tabelle 1:** Eigenschaften der verwendeten Platten

	MDF	3-Schicht
Format in m, (Dicke t = 16 mm)	$l_x = 2,49$	$l_y = 1,24$
E-Modul (Hersteller) in GPa	$E = 2,5$	$E_1 = 11,4$ $E_2 = 0,9$
E-Modul (dynamisch) in GPa	$E_1 = 2,69$ $E_2 = 2,02$	$E_1 = 13,6$ $E_2 = 0,94$
Grenzfrequenzen in Hz	$f_{c,1} = 2003$ $f_{c,2} = 2312$	$f_{c,1} = 743$ $f_{c,2} = 2828$
Rohdichte $\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	704,5	489,9

Die Grenzfrequenzen werden mit der Poissonzahl  $\mu = 0,3$  aus der Biegewellengeschwindigkeit für Platten errechnet. Die dynamischen Elastizitätsmoduln (E-Modul) wurden anhand der Frequenz der ersten Eigenschwingung eines beidseitig gelenkigen Stabes experimentell bestimmt.

## Grundlagen

Der Gesamtverlustfaktor  $\eta_{\text{tot}}$  in Glg. (1) setzt sich additiv aus dem inneren Verlustfaktor  $\eta_{\text{int}}$ , dem Kopplungsverlustfaktor  $\eta_{\text{coup}}$  aus der Ableitung von Körperschallenergie in andere Bauteile und aus dem Strahlungsverlustfaktor  $\eta_{\text{rad}}$  zusammen.

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{int}} + \eta_{\text{coup}} + \eta_{\text{rad}} \quad (1)$$

Der Abstrahlgrad  $\sigma$  in Glg. (2) ist definiert als das Verhältnis aus der tatsächlich abgestrahlten Schalleistung  $P_{\text{rad}}$  zur abgestrahlten Schalleistung einer gleichphasig, mit dem mittleren Quadrat der effektiven Schnelle  $v$  schwingenden, ebenen Platte mit gleicher Fläche  $S$ . Der dekadische Logarithmus des Abstrahlgrades wird als Abstrahlmaß bezeichnet.  $Z_0$  entspricht der Schallkennimpedanz der Luft.

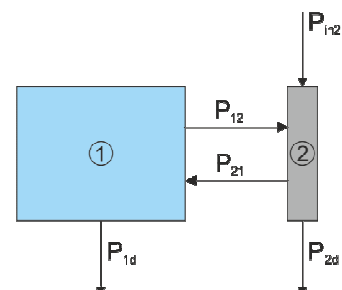
$$\sigma = \frac{P_{\text{rad}}}{Z_0 \cdot v^2 \cdot S} \quad (2)$$

## Experimentelle Untersuchungen

### Hallraum-Verfahren

Der SEA-Ansatz zum Hallraum-Verfahren verwendet den Hallraum und die Platte als zwei Subsysteme, zwischen denen ein Energieaustausch stattfinden kann. Die Platte wird so im Hallraum abgehängt, dass keine Kopplung zu anderen Bauteilen besteht und der Kopplungsverlustfaktor in Glg. (1) vernachlässigt werden kann. Im Hallraum sind die dissipativen Energieverluste des Raumes infolge Schallabsorption minimiert.

#### 1. Körperschallanregung der Platte (direkte Methode)



**Abbildung 1:** SEA-Modell zum Hallraum-Verfahren. 1: Subsystem Hallraum, 2: Subsystem Platte,  $P_d$ : Leistungsabfuhr durch Dissipation,  $P_{in}$ : durch Körperschall zugeführte Leistung,  $P_{ij}$ : Leistungsaustausch zwischen den Subsystemen.

Abbildung 1 zeigt das SEA-Modell bei Körperschallanregung der Platte. Unter Zuhilfenahme der Beziehung für die

Verlustfaktoren aus Glg. (3) [1] setzt sich der innere Verlustfaktor der Platte wie folgt zusammen:

$$\eta_{ij} = \frac{E_j}{E_i} \cdot \eta_{\text{tot},j} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{int},2} = \eta_{\text{tot},2} - \eta_{21} = \eta_{\text{tot},2} - \frac{E_1}{E_2} \cdot \eta_{\text{tot},1} \quad (4)$$

Hierbei ist die Gesamtenergie des Raumes (Volumen  $V_1$ ) mit dem effektiven Schalldruck  $p_1$  bestimmt durch

$$E_1 = \frac{1}{c_0} \frac{p_1^2}{Z_0} \cdot V_1 \quad (5)$$

Die Gesamtenergie der Platte (flächenbezogene Masse  $m'$ , Fläche  $S$ ) mit der effektiven Schallschnelle  $v_2$  wird durch

$$E_2 = m'_2 \cdot v_2^2 \cdot S_2 \quad (6)$$

berechnet. Die Gesamtverlustfaktoren von Raum und Platte werden aus der jeweiligen Nachhallzeit  $T_i$  unter der Annahme diffuser Schallfelder mit Hilfe Glg. (7) bestimmt, für den Schalldruck und die Schallschnelle werden zeitlich und räumlich (bzw. flächig) gemittelte Werte eingesetzt.

$$\eta_{\text{tot},i} = \frac{2,2}{f} \cdot \frac{1}{T_i} \quad (7)$$

Der innere Verlustfaktor der Platte lässt sich damit ausschließlich aus Messgrößen bestimmen; folgende Messgleichung ergibt sich damit für die direkte Methode

$$\eta_{\text{int},2} = \frac{2,2}{f} \cdot \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{Z_0 \cdot c_0} \cdot \frac{V_1}{m'_2 \cdot S_2} \cdot \frac{p_1^2}{v_2^2} \cdot \frac{1}{T_1} \right) \quad (8)$$

## 2. Luftschallanregung des Raumes (indirekte Methode)

Diese Methode ist als reziprok zur direkten Methode anzusehen, da anstelle der Platte nun der Raum angeregt wird. Unter Zuhilfenahme der Glg. (3) sowie der aus der SEA stammenden Konsistenzbeziehung in Glg. (9) wird dann der Strahlungsverlustfaktor nach Glg. (10) errechnet. Die Verwendung von Glg. (9) setzt die schwache Kopplung der beteiligten Subsysteme sowie statistisch voneinander unabhängige, die Leistung eintragenden Quellen voraus und erfordert Annahmen bei der Bestimmung der modalen Dichten  $n$  eines dreidimensionalen Raumes und einer orthotropen Platte (Annahmen für E-Moduln und Poissonzahl).

$$n_1 \eta_{12} = n_2 \eta_{21} \quad (9)$$

$$\eta_{21} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot \eta_{\text{tot},2} \quad (10)$$

Bei Glg. (11) und (12) aus [2] sind  $S_0$  die Oberfläche und  $L_0$  die Summe aller Kantenlängen des Raumes.

$$n_1 = \frac{4\pi \cdot f^2 \cdot V_1}{c_0^3} + \frac{\pi \cdot f \cdot S_0}{2c_0^2} + \frac{L_0}{8c_0} \quad (11)$$

$$n_2 = \frac{\pi}{c_0^2} \cdot S_2 \cdot \sqrt{f_{c,1} \cdot f_{c,2}} \quad (12)$$

Unter Zuhilfenahme von Glg. (9) bis Glg. (12) ergibt sich folgende Messgleichung für die indirekte Methode (Index id):

$$\eta_{\text{int},2,\text{id}} = \frac{2,2}{f} \cdot \frac{1}{T_{2,\text{id}}} \cdot \left( 1 - \frac{n_1}{n_2} \cdot Z_0 c_0 \cdot \frac{m'_2 \cdot S_2}{V_1} \cdot \frac{v_{2,\text{id}}^2}{p_{1,\text{id}}^2} \right) \quad (13)$$

## 3. Messaufbau für das Hallraum-Verfahren

Die Platten wurden mit zwei dünnen Schnüren so an einer Vorrichtung angebracht, dass ein freies Schwingen möglich war. An der Vorrichtung war ebenfalls ein abnehmbares Baffle (Spanplatte, 0,42 m Breite, 16 mm Dicke) befestigt und in Plattenebene ausgerichtet, um einen akustischen Kurzschluss zu verhindern. Zwischen Platte und Baffle war ein Luftspalt von etwa 5 mm gegeben.

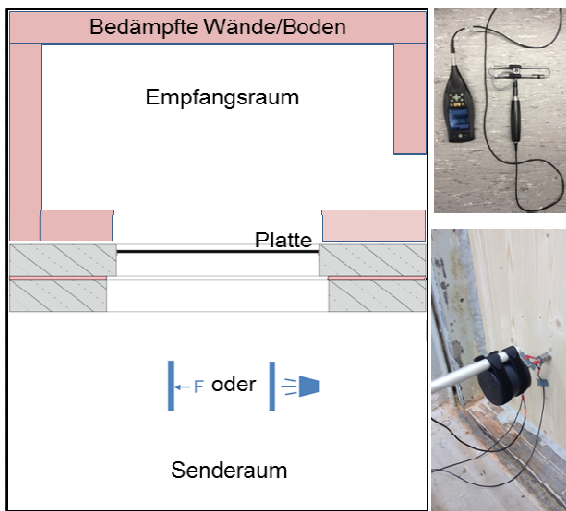


**Abbildung 2:** Messaufbau beim Hallraum-Verfahren, die Platte schwingt frei und ist von einem Baffle umgeben. Anregung hier mit einem elektrodynamischen Shaker (direkte Methode), im Hintergrund Dodekaeder zur Anregung des Raumes (indirekte Methode). Vorne im Bild das verwendete Schalldruck-Mikrofon auf dem Drehgalgen.

## Zweiraum-Verfahren

Für das Zweiraum-Verfahren wurde in der Nische zwischen den beiden Räumen eines Türenprüfstandes die 3-Schicht-Platte umlaufend elastisch gelagert (Abbildung 3).

Für diese Platte wurde der Abstrahlgrad nach Glg. (14) bei Körper- und Luftschallanregung ermittelt. Hierzu wurde im Empfangsraum mittels Beschleunigungsaufnehmer die mittlere Schnelle auf der Platte bestimmt sowie die Schallintensität  $I$  gemessen.



**Abbildung 3:** Messaufbau beim Zweiraum-Verfahren. Die Platte ist zwischen zwei Räumen, umlaufend elastisch gelagert, montiert. Im Empfänger- und Senderaum wird die mittlere Beschleunigung auf der Platte und die Schallintensität gemessen. Im Senderaum erfolgt die Körper- oder Luftschallanregung.

$$\sigma = \frac{I}{Z_0 \cdot v_2^2} \tag{14}$$

Auch aufgrund der Kopplung zu anderen Bauteilen kann der interne Verlustfaktor hier nicht bestimmt werden. Das Verfahren eignet sich aber als Referenz für den Abstrahlgrad im Vergleich mit Näherungen für gelenkig gelagerte Platten.

### Ergebnisse

Im Bereich der Grenzfrequenzen ergab sich für die MDF-Platte bei der Messung der Körperschallnachhallzeit ein teils sehr kurzer Abfall der Abklingkurven. Um  $\eta_{int}$  zu bestimmen, wurde darum  $T_{10}$  verwendet. Dies erfordert eine vorsichtige Beurteilung der Verlustfaktoren im Bereich der Grenzfrequenzen. Um den Einfluss starker Streuungen der Messwerte in besagtem Bereich weiter zu reduzieren, wurde zur Mittelwertbildung aus den einzelnen Messpositionen anstelle des arithmetischen Mittelwertes der Median genutzt.

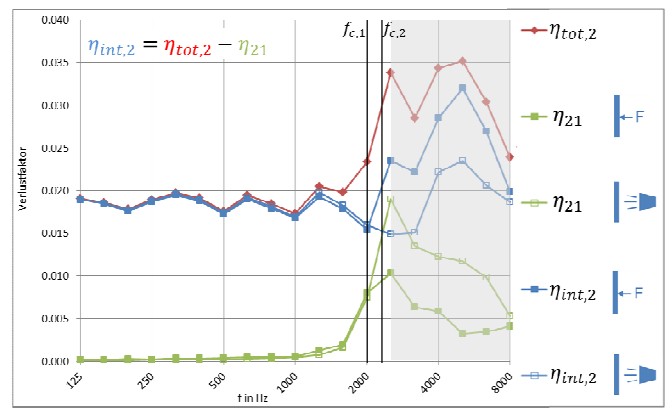
Im Hallraum war für beide Platten ein Signal zu Rausch Abstand größer 10 dB erst ab 125 Hz gegeben. Beim Zweiraum-Verfahren sind die Ergebnisse unter 125 Hz aufgrund der verwendeten Spacerlänge der Schallintensitäts-sonde unsicher. Dies wird bei den folgenden Darstellungen berücksichtigt. Im grau markierten Bereich in Abb. 4 und 5 vernachlässigt das Modell mit zwei Subsystemen die nicht resonante Übertragung.

### Interner Verlustfaktor im Hallraum-Verfahren

#### 1. MDF-Platte

Abbildung 4 zeigt die Verlustfaktoren der MDF-Platte. Der interne Verlustfaktor verläuft bis zur niedrigeren Koinzidenzgrenzfrequenz  $f_{c,1}$  nahezu konstant. Es bestehen nur geringe Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus Körper- und Luftschallanregung.

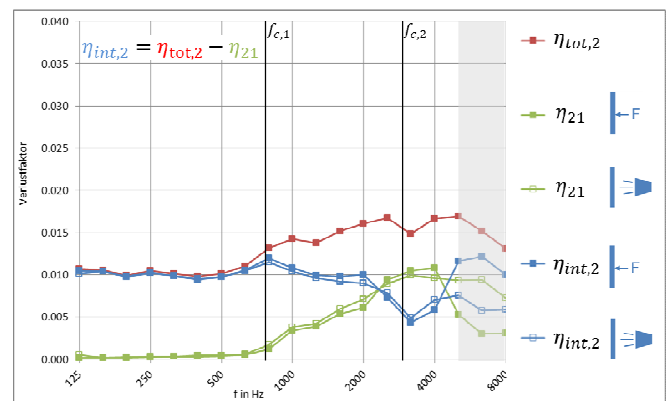
Im Bereich [125 Hz / 1600 Hz] beträgt  $\eta_{int,2} = 0,018 \pm 0,001$ ; dies deckt sich sehr gut mit früheren Untersuchungen [3].



**Abbildung 4:** Hallraum-Verfahren. Verlustfaktoren der MDF-Platte bei Körper- (direktes Verfahren, ←F) und Luftschallanregung (indirektes Verfahren, Lautsprecher)

#### 2. 3-Schicht-Platte

Die Verlustfaktoren der 3-Schicht-Platte zeigt Abbildung 5. Der interne Verlustfaktor verläuft bis zum Bereich der höheren Grenzfrequenz  $f_{c,2}$  nahezu konstant. Auch hier sind nur geringe Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus Körper- und Luftschallanregung festzustellen.



**Abbildung 5:** Hallraum-Verfahren. Verlustfaktoren der 3-Schicht-Platte bei Körper- (direktes Verfahren, ←F) und Luftschallanregung (indirektes Verfahren, Lautsprecher)

Im Bereich [160 Hz / 2500 Hz] beträgt  $\eta_{int,2} = 0,010 \pm 0,001$ . Auch dies deckt sich gut mit früheren Ergebnissen [3].

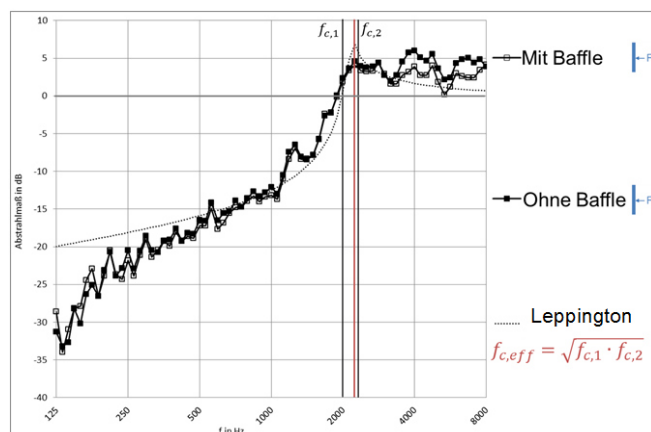
Im Gegensatz zur nahezu isotropen MDF-Platte, kann bei der stark orthotropen 3-Schicht-Platte eine Auswertung des inneren Verlustfaktors auch noch oberhalb der niedrigeren Grenzfrequenzen erfolgen. Analog zur MDF-Platte können die, bei beiden Anregungsarten ermittelten, Strahlungsverlustfaktoren  $\eta_{21}$  bis zur höheren Grenzfrequenz bestimmt werden.

### Abstrahlgrad im Vergleich mit Näherungen

#### 1. MDF-Platte im Hallraum-Verfahren

Als Näherung für eine isotrope, gelenkig gelagerte Platte in einer unendlich großen Wand wird, basierend auf Leppington, die Näherung in [2] verwendet. Hierzu wird für die nahezu isotrope MDF-Platte die effektive Grenzfrequenz  $f_{c,eff}$  verwendet. Abbildung 6 zeigt die die im Hallraum-Verfahren bestimmten Abstrahlmaße. Die Ergebnisse mit und ohne Baffle zeigen keinerlei Unterschiede im tiefen Frequenzbereich. Die Unterschiede zur Näherungslösung

liegen vor allem im tiefen Frequenzbereich und sind begründet in den unterschiedlichen Randbedingungen (frei vs. gelenkig gelagert).

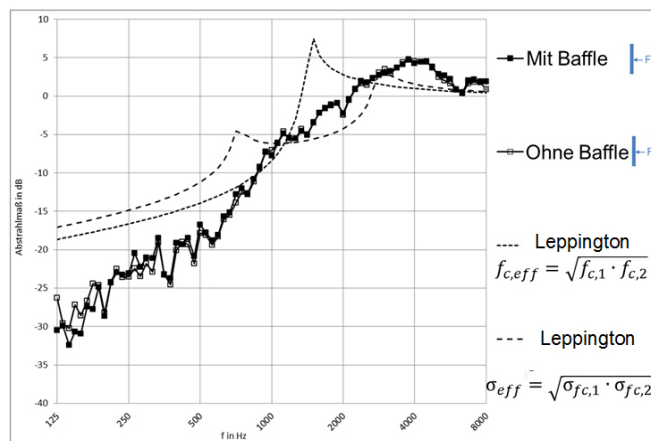


**Abbildung 6:** Hallraum-Verfahren. Abstrahlmaß der MDF-Platte bei Körperschallanregung im Vergleich mit einer Näherung (Leppington) für isotrope, gelenkig gelagerte Platten, hier mit  $f_{c,eff}$ .

## 2. 3-Schicht-Platte im Hallraum-Verfahren

Die Näherung mit  $f_{c,eff}$  ist, wie Abbildung 7 zeigt, bei stark orthotropen Platten unbefriedigend.

Verwendet man jedoch die Leppingtonschen Näherungen separat für beide Plattenrichtungen und bildet das geometrische Mittel für beide Abstrahlgrade erhält man einen effektiven Abstrahlgrad  $\sigma_{eff}$ . Dieser stellt oberhalb von  $f_{c,1}$  eine gute Näherung dar.

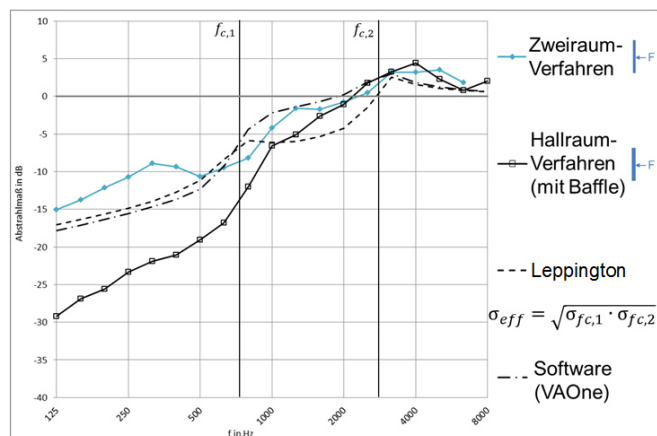


**Abbildung 7:** Hallraum-Verfahren. Abstrahlmaß der 3-Schicht-Platte bei Körperschallanregung im Vergleich mit Näherungen (Leppington) für isotrope, gelenkig gelagerte Platten unter Verwendung von  $f_{c,eff}$  bzw.  $\sigma_{eff}$ , angewandt auf die orthotrope Platte.

## 3. 3-Schicht-Platte im Zweiraum-Verfahren

Ein Vergleich der Ergebnisse des Hallraum- und des Zweiraum-Verfahrens (Abbildung 8) verdeutlicht den Einfluß der Randbedingungen auf das Abstrahlmaß.

Aufgrund der gelenkigen Lagerung der Platte im Zweiraum-Verfahren, stimmen die Messergebnisse hinreichend mit der Näherung anhand des effektiven Abstrahlgrades überein.



**Abbildung 8:** Abstrahlmaß der 3-Schicht-Platte aus dem Hallraum- und dem Zweiraum-Verfahren bei Körperschallanregung im Vergleich mit Näherungen.

Ergänzt ist eine mittels der kommerziellen SEA-Software VAOne berechnete Lösung, die im Bereich der Grenzfrequenzen die Messkurve besser wiedergibt. Ein Beispiel für ein anderes Berechnungsverfahren findet sich in [4].

## Zusammenfassung

Mittels des sogenannten Hallraum-Verfahrens konnten die inneren Verlustfaktoren von orthotropen Plattenmaterialien sowohl bei direkter als auch bei indirekter Anregung in einem großen Frequenzbereich bestimmt werden. Die inneren Verlustfaktoren können bis zur höheren Grenzfrequenz als konstant betrachtet werden.

Die Näherung an den Abstrahlgrad orthotroper Platten anhand eines effektiven Abstrahlgrades, der auf einer geometrische Mittelung klassischer Näherungen basiert, zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen und ist auch für den Praktiker ein handhabbarer Ansatz.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Firma Müller-BBM für die zur Verfügung gestellten Messräume und die Unterstützung bei der Schallintensitätsmessung.

## Literatur

- [1] Lyon R. H. und DeJong R. G.: Theory and Application of Statistical Energy Analyses, Butterworth-Heinemann, Newton, MA, USA, 1995
- [2] Hopkins, C.: Sound Insulation, Elsevier / Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2007
- [3] Nusser B. Meistring P. und Schanda U.: Innere Verlustfaktoren ausgewählter Leichtbaustoffe und ihre Ermittlung. Hochschule Rosenheim, Konferenzbeitrag zur DAGA in Stuttgart 2007
- [4] Anderson J. S. und Bratos-Anderson M.: Radiation Efficiency of Rectangular Orthotropic Plates. Acta Acustica united with Acustica 91 (2005), 61-76