

# Neuer Ansatz zur Bestimmung des abgestrahlten Körperschalls in Räumen – Wie gross ist das Verbesserungspotential

Adrian Egger<sup>1</sup>, Peter Billeter<sup>2</sup> und Roger Müller<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Basler & Hofmann AG, Esslingen, CH

<sup>2</sup>IUB Engineering AG, Bern, CH

<sup>3</sup>SBB Infrastruktur, Bern, CH

## 1. Einleitung

Für die in Vorbereitung befindliche Verordnung zum Schutz vor Erschütterungen VSE [1] hat das BAFU (ehemals BUWAL) eine Vollzugshilfe EMBE [2] in Auftrag gegeben, mit der die Beurteilungsgrössen für Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall hergeleitet bzw. berechnet werden können. Die EMBE beinhaltet eine neue Methode, mit der sich die Körperschallbelastung in einem Raum mittels Hochrechnung der Erschütterungswerte bestimmen lässt.

Bereits heute gibt es verschiedene Methoden, die den abgestrahlten Körperschall aus den Erschütterungen der Begrenzungsflächen ableiten. Je nach Methode dominieren theoretische und empirische Ansätze. In Deutschland wird meist die Funktion nach Grütz [3] verwendet, wie sie auch im Leitfaden der Deutschen Bahn AG für den Planer verwendet wird. In Österreich stützt man sich auf die ONR 199005 [4], welche jedoch auf der „slow“ Bewertung basiert. In der Schweiz gibt es keine Vorschrift und die Planer wenden unterschiedliche Methoden an. Im VIBRA-2 zum Beispiel wird eine Übertragungsfunktion verwendet, die durch die Studien für die EMBE festgelegt wurde.

Ziel der EMBE ist es, eine einheitliche Methodik festzulegen, die gegenüber den bisherigen Methoden genauer ist und weniger Streuung aufweist. Die Frage ist jedoch: Kann eine Verbesserung gegenüber den bekannten Methoden überhaupt erreicht werden bei der grossen Variabilität der Gebäudestrukturen? Lässt sich der Körperschallpegel im Raum genügend genau durch die Messung der Erschütterungen auf dem Fussboden ableiten?

## 2. Konzept

Es soll eine neue Hochrechnungsformel entwickelt werden, mit der anhand von gemessenen Erschütterungen an den Raumbegrenzungsflächen der abgestrahlte Körperschall im Raum ermittelt werden kann. Die Formel soll möglichst transparent und einfach anwendbar und für

unterschiedliche Raumgrößen bzw. -typen verschiedener Gebäudetypen (Bauarten) repräsentativ sein. Die typischen Raumgrößen bzw. -typen und die Bauarten sollen in wenige Klassen unterteilt werden, wobei für jede Klasse eine charakteristische Übertragungsfunktion  $H^*(f)$  für die Übertragung von der gemessenen Schwinggeschwindigkeit auf der Raumbegrenzung auf den Schalldruckpegel im Raum zu bestimmen ist. Die Übertragungsfunktionen werden gestützt auf theoretische Überlegungen und anhand von in situ Messdaten validiert.

Die Hochrechnungsformel wird von der Form her auf physikalische Grundlagen abgestützt und enthält zudem empirisch ermittelte Koeffizienten. Sie besteht aus einem analytischen, theoretisch fundierten Ansatz, der dort empirische Koeffizienten enthält, wo physikalische Eigenschaften pauschal erfasst werden müssen oder sich nicht mehr weiter analytisch beschreiben lassen. Die Formel und die Koeffizienten haben dimensionshomogen zu sein.

### **3. EMBE-Entwurf 2006**

Die vorgeschlagene Methode zur Bestimmung des Körperschallpegels in einem geschlossenen Raum, der durch die vibrierenden Raumbegrenzungsflächen abgestrahlt wird, kann folgendermassen zusammengefasst werden (vergleiche [5] und graphische Darstellung in Abb. 1). Das Verfahren hat gewisse Ähnlichkeit mit der Methode von Grütz und Said [3], wobei aber mehr Gewicht auf die Theorie der Abstrahlung gelegt wird.

1. Messung der vertikalen Schwinggeschwindigkeit  $v_e(t)$  in mm/s einer relevanten Erschütterungsquelle (z.B. vorbeifahrender Zug) in der Regel in der Mitte des Fussbodens. Die Ermittlung des abgestrahlten Körperschall  $M$  verlangt Messungen im erweiterten Frequenzbereich bis 315 Hz nach DIN 45669-1.
2. Zur Bestimmung des abgestrahlten Körperschalls  $M$  muss das Signal  $v_e(t)$  in den Frequenzraum transformiert und dort weiter bearbeitet werden. Das Signal  $v_e(t)$  einer Einzelmission während der Messdauer  $T_j$  ist mit der Fourier-Transformation in den Frequenzraum zu überführen. Dabei ist das energieäquivalente Leistungsspektrum  $S_j(f)$  zu berechnen und daraus anschliessend das Terzband-Leistungsspektrum  $S_j(f_{TB})$  für die Terzbänder von 20 Hz bis 315 Hz zu bilden (Summation der Stützstellen des Schmalbandspektrums innerhalb des jeweiligen Terzbandes). Die Größen selbst sind nachfolgend definiert. Das energieäquivalente Leistungsspektrum  $S(f)$  der Grösse  $v_e(t)$  wird über die Fourier-Transformierten  $V(f)$  der Grösse  $v_e(t)$  ermittelt und ist wie folgt definiert:

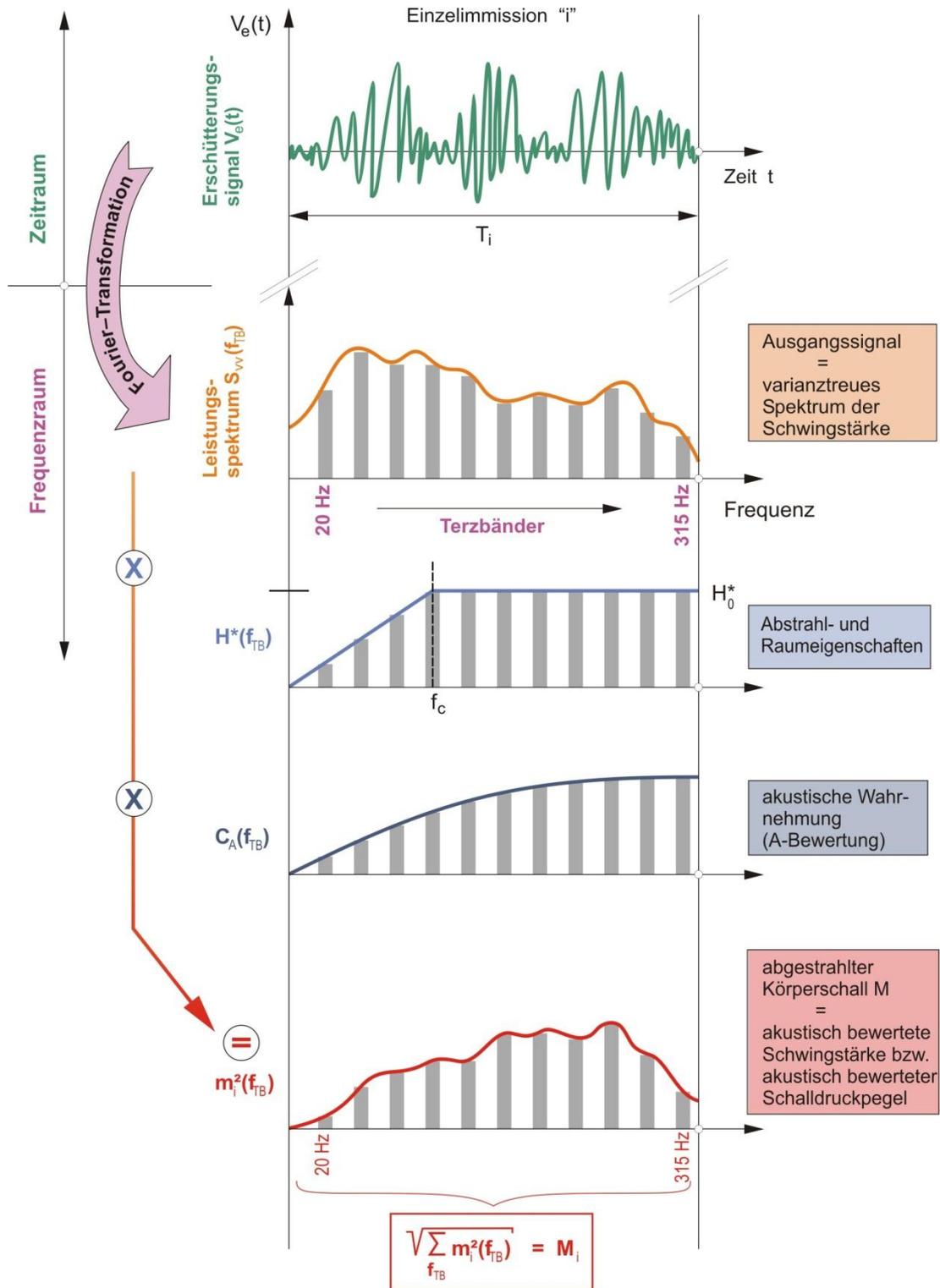


Abb. 1: Berechnung des abgestrahlten Körperschalls  $M$  aus dem Erschütterungssignal  $v_e(t)$ .

$$V(f) = F\{v_e(t)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^{+T} v_e(t) \cdot e^{-i(2\pi f)t} dt \quad (1)$$

daraus ergibt sich das (einseitige) Leistungsspektrum  $S(f)$  der Grösse  $v_e(t)$  zu:

$$S(f) = \frac{1}{T} \cdot V(f) \cdot V^*(f) \quad (2a)$$

(Multiplikation der konjugiert komplexen Grössen  $V$  und  $V^*$ )

- Die Fourier-Transformation wird digital mittels der sogenannten FFT (Fast Fourier Transformation) ermittelt und hat diskrete Stützstellen im Abstand  $\Delta f = f_s/N_{FFT}$  ( $f_s$  = Samplefrequenz,  $N_{FFT}$  = FFT-Breite). Die Bildung des Terzband-Leistungsspektrum  $S(f_{TB})$  erfolgt aus dem Schmalbandspektrum durch die Summation der Stützstellen im jeweiligen Terzband:

$$S(f_{TB}) = \int_{\Delta f_{TB}} S(f) df = \sum_{\Delta f_{TB}} S(f_{TB}) \quad (2b)$$

- Bewertung des Spektrums  $S_i(f_{TB})$  mit der A-Bewertungsfunktion, d.h. Multiplikation von  $S_i(f_{TB})$  mit einem Faktor  $C_A(f_{TB}) = p_0 \times 10^{(\Delta L_A/20)}$  mit  $p_0$  = Referenzschalldruck  $2 \times 10^{-5}$  Pa und  $\Delta L_A$  = Höhe des A-Bewertungsfilters.
- Der abgestrahlte Körperschall  $m_i$  ist anschliessend durch die Summation der Terzbandwerte  $\mu_i(f_{TB})$  zu berechnen. Dazu ist das A-bewertete Spektrum  $C_A(f_{TB}) \times S_i(f_{TB})$  mit der sogenannten Abstrahl-Transferfunktion  $H^*(f_{TB})$  zu multiplizieren. Es ist folglich:

$$\mu_i^2(f_{TB}) = S_i(f_{TB}) \cdot H^*(f_{TB}) \cdot C_A(f_{TB}) \text{ und} \quad (3a)$$

$$m_i = \sqrt{\sum_{f_{TB}} \mu_i^2(f_{TB})} = \sqrt{\sum_{f_{TB}} S_i(f_{TB}) \cdot H^*(f_{TB}) \cdot C_A(f_{TB})} \quad (3b)$$

- Der berechnete abgestrahlte Körperschall  $M_r$  ist ein frequenzbewerteter Schalldruckpegel mit der Einheit Dezibel-A. Er wird als Pegelwert aus den frequenzbewerteten Schwingstärken  $m_i$  der Einzelmissionen  $i$  bestimmt. Der Beurteilungswert  $M_r$  für den abgestrahlten Körperschall  $M$  ist getrennt für die Beurteilungszeiten Tag und die Nacht wie folgt zu berechnen:

$$M_r = 20 \cdot \log \frac{10^{-3} \cdot (\rho \cdot c) \sqrt{\frac{1}{T_r} \sum_i T_i \cdot [m_i^2]}}{p_0} \quad (4a)$$

mit

$p_0$	$= 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$	der Referenzschalldruck;
$\rho$	$= 1.204 \text{ kg/m}^3$	die Luftdichte bei 20°C
$c$	$= 343.3 \text{ m/s}$	die Schallgeschwindigkeit in Luft bei 20°C
$m_j$	in [mm/s]	

Der Beurteilungswert  $M_r$  für den Tag wird über aller Einzelimmissionen  $m_j$  der Messdauer  $T_j$  während der Zeitspanne  $T_r$  gebildet ( $T_r = 16$  Stunden am Tag). Der Beurteilungswert  $M_r$  für die Nacht ist für die Stunde mit der stärksten Körperschallimmission  $m_j$  zu bilden ( $T_r = 1$  Stunde in der Nacht).

Bei Strassen- und Schienenverkehrsanlagen wird in der Nacht zusätzlich der Maximalwert  $M_{\max}$  für den abgestrahlten Körperschall  $M$  ermittelt. Der Maximalwert  $M_{\max}$  entspricht dem Pegel des 90 % Quantils aller einzelnen Durchfahrten  $m_j$  während der Nacht.

$$M_{\max} = 20 \cdot \log \frac{10^{-3} \cdot (\rho \cdot c) \cdot [m_j]_{90\%}}{p_0} \quad (4b)$$

### **Bewertung der Abstrahl- und Raumeigenschaften $H^*(f)$**

Die Abstrahleigenschaften der vibrierenden Raumhülle und die akustischen Eigenschaften des Immissionsraums werden mit einem frequenzabhängigen Faktor  $H^*(f)$  erfasst. Der Faktor beschreibt summarisch die Abstrahleigenschaften der Raumhülle sowie die akustischen Eigenschaften des Immissionsraums. Er wird für typische Bauarten und Materialien der Raumhüllen sowie für verschiedene Raumgrößen frequenzabhängig in den Terzbändern bestimmt.

Der Faktor  $H^*(f)$  wird durch die materialabhängige Grenzfrequenz  $f_c$  der Schallabstrahlung von der Raumhülle und durch die Raumgröße bestimmt und ist für einzelne Objektkategorien definiert. Der typische Verlauf von  $H^*(f)$  und die Werte der die Funktion bestimmenden Kenngrößen sind für einen einfachen Gebrauch stark vereinfacht und nachfolgend in Abb. 2 graphisch dargestellt sowie in Abb. 3 für die Objektkategorien und Terzbänder angegeben.

Die anfänglich 9 Kategorien wurden inzwischen auf 4 reduziert. Ein Ziel der Validierung der EMBE-Methode wird sein, diese Kategorien und/oder die Werte der Funktionen zu überprüfen und allenfalls anzupassen, um eine möglichst gute Übereinstimmung mit dem gemessenen Körperschallpegel zu erhalten.

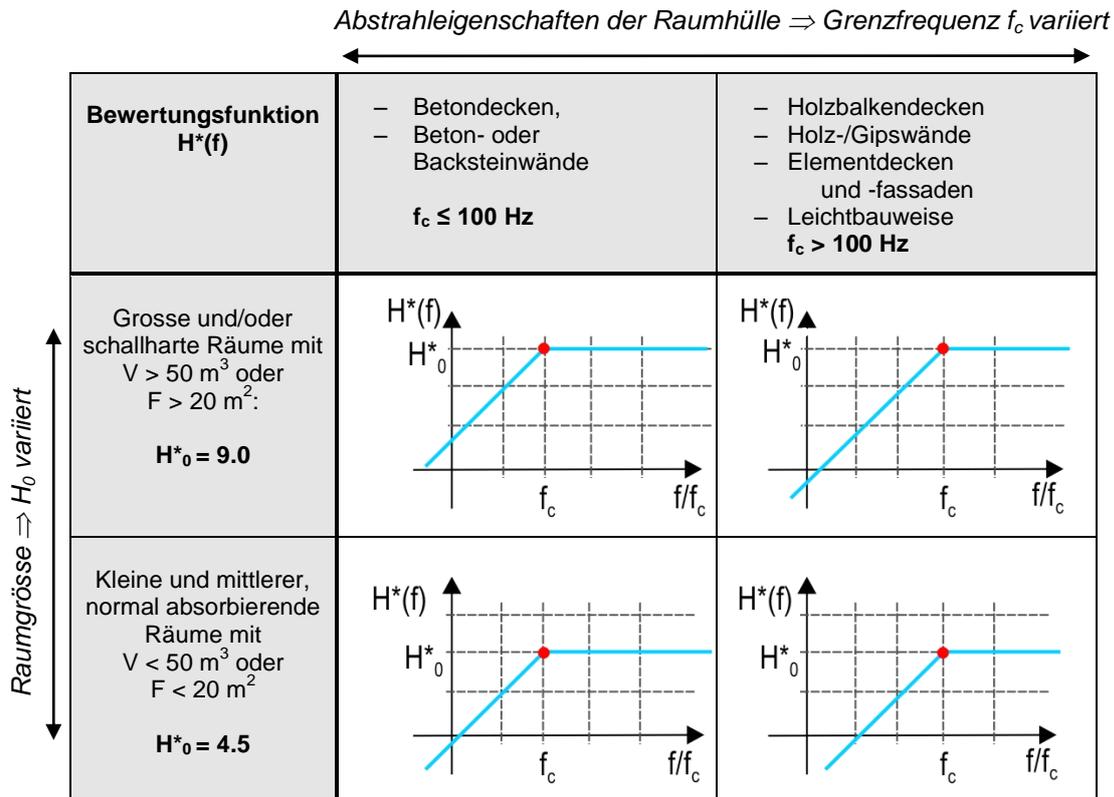


Abb. 2: Schematische Darstellung der Bewertungsfunktion  $H^*(f)$  und der Objektkategorien.

$H^*(f_{TB})$	Grenzfrequenz <100 Hz Beton / Mauerwerk		Grenzfrequenz >100 Hz Holz / Gips / Leichtbau	
	kleine Räume <20m <sup>2</sup> , <50m <sup>3</sup>	grosse R. >20m <sup>2</sup> , >50m <sup>3</sup>	kleine Räume <20m <sup>2</sup> , <50m <sup>3</sup>	grosse R. >20m <sup>2</sup> , >50m <sup>3</sup>
20	1.13	2.25	0.72	1.44
25	1.41	2.81	0.90	1.80
31.5	1.77	3.54	1.13	2.27
40	2.25	4.50	1.44	2.88
50	2.81	5.63	1.80	3.60
63	3.54	7.09	2.27	4.54
80	4.50	9.00	2.88	5.76
100	4.50	9.00	3.60	7.20
125	4.50	9.00	4.50	9.00
160	4.50	9.00	4.50	9.00
200	4.50	9.00	4.50	9.00
250	4.50	9.00	4.50	9.00
315	4.50	9.00	4.50	9.00

Abb 3: Terzbandwerte von 20 Hz bis 315 Hz der Bewertungsfunktion  $H^*(f_{TB})$  für die verschiedenen Objektkategorien

#### **4. Erste Validierung**

Bereits ab 2007 hat die SBB Studien in Auftrag gegeben, um die EMBE-Methodik zu überprüfen. Zur Überprüfung diente die Datensammlung der Messungen in der Schweiz (VIBRA-3). In der Datenbank befanden sich damals Messdaten von 76 Zimmern in 55 Gebäuden über Tunnelstrecken und 82 Zimmern in 76 Gebäuden an offenen Strecken, welche eine Terzband-Auswertung von Körperschall und Erschütterungen aufwiesen.

Die Messdaten an oberflächlichen Strecken sind für eine Validierung aufgrund von Direktschall- und Sekundärschallphänomenen nicht sehr geeignet. Auch bei Tunnelstrecken kann es je nach Standort und Bauzustand der Gebäude zu Verfälschungen der Messdaten aufgrund einer Grundgeräuschproblematik oder durch Sekundärgeräusche kommen.

Schliesslich wurde eine Synthese dieser Studien gemacht und es resultierte zwischen Körperschallmessung und Körperschallprognose mit der EMBE-Methodik für 56 Messpunkte möglichst ohne Direktschall eine geringe mittlere Überschätzung mit der Prognose von 0.74 dB, jedoch wurde eine hohe Standardabweichung von 4.1 dB ermittelt.

#### **5. Weitere Validierungsuntersuchungen**

##### **5.1 Datengrundlage**

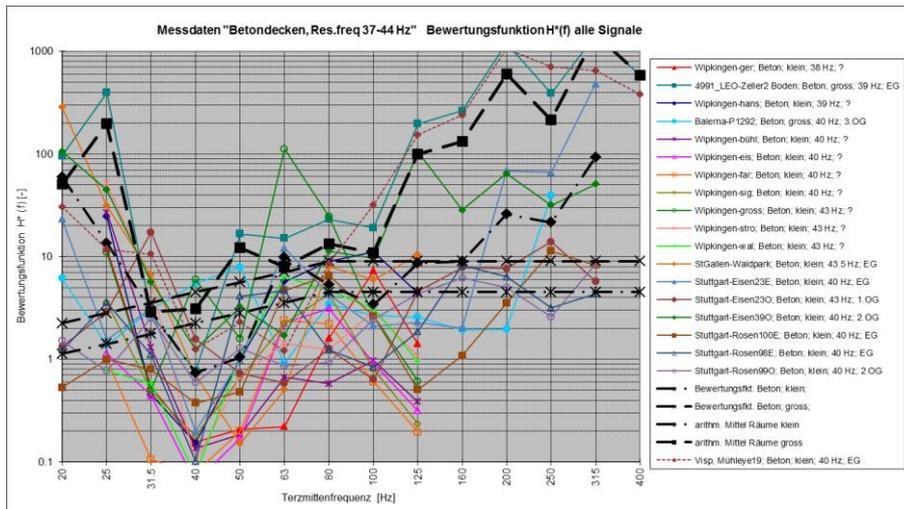
In den letzten Jahren wurde versucht, anhand ausgewählter Daten aus der VIBRA-3 Datenbank durch unterschiedliche Analysen Gesetzmässigkeiten oder gemeinsame Muster in den Spektralwerten zu finden, um die vorgeschlagenen Bewertungsfunktionen  $H^*(f_{TB})$  für die verschiedenen Objektkategorien bestätigen oder optimieren zu können. Dazu wurden in einer ersten Phase die Erschütterungs- und Körperschallspektren von 53 gemessenen Räumen an Tunnelstrecken in der Schweiz analysiert. In einer zweiten Phase kamen nochmals Messdaten von 16 Räumen über einer Tunnelstrecke in Deutschland und von 11 ausgewählten Räumen an offenen Strecken in der Schweiz hinzu.

Für das Forschungs- und Entwicklungsprojekt Arbeitsgemeinschaft lärm- und erschütterungsarmer Oberbau (AG LEO) fanden 2001 detaillierte Erschütterungs- und Körperschallmessungen an mehreren Messpunkten in zwei Räumen in Zürich-Selnau statt. Mit diesen Daten konnten weitere Analysen ausgeführt werden.

##### **5.2 Durchgeführte Analysen**

Zusammengefasst wurden an diesem Datenfundus folgende Analysen durchgeführt:

1. Alle Spektren und Angaben zum Gebäude wurden in ein Datenblatt für bis zu 10 Ereignisse (Zugvorbeifahrten) eingegeben. Im Datenblatt kann anhand von Diagrammdarstellungen eine optische Qualitätsbeurteilung der Messdaten vorgenommen werden.
2. Gruppeneinteilung nach Deckenresonanzfrequenzen für die Darstellung der Bewertungsfunktionen  $H^*(f_{TB})$ .



**Abb. 4:** Beispiel für Bewertungsfunktion  $H^*(f_{TB})$  für Daten mit Deckenresonanzfrequenz 37-44 Hz

Es ist ein klares Minimum von  $H^*(f_{TB})$  beim 40-Hz-Terzband der Deckenresonanzfrequenz auszumachen. Wird der Körperschallpegel bei der Berechnung deshalb in diesem Terzband überbewertet?

3. Berechnung des Sekundärschalls nach mehreren Methoden: EMBE neu, EMBE alt (VIBRA-2), Grütz (Einzahlwert und frequenzabhängig) und ONR 199005.

Frequenz [Hz]	gemessen [dBA]	EMBE [dBA]	EMBE alt	KS Grütz [dBA]	ONR 199005
100	32.66	36.51	28.70	<b>Einwert:</b> <b>34.90</b>	<b>nur Boden:</b> <b>45.22</b>
125	33.99	36.55	28.83		
160	34.78	36.57	28.89	<b>Freq.:</b> <b>32.12</b>	
200	35.55	36.60	28.98		
250	36.37	36.72	29.32		
315	37.21	36.73	29.36		

**Abb. 5:** Beispiel für Gegenüberstellung Messwert zu Berechnungswerte des Körperschalls in dBA eines Raumes

Die Umrechnung der Erschütterungswerte ergibt je nach Methodik andere Körperschallpegel. Die Berechnungsmethodik der ONR 199005 ist für die österreichische Beurteilung auf der Basis von „slow“-Werten entwickelt worden und kann nicht einfach auf die Messdaten unserer Datenbasis angewandt werden.

4. Obere Begrenzung der Schallberechnung bei unterschiedlichen Frequenzbändern zwischen 100 und 315 Hz.

Abb. 5 zeigt beispielhaft, wie die Begrenzung bei der Summierung der Terzbandwerte die Schallpegel beeinflussen kann. Die zunehmenden Schallpegelwerte bei der Messung legen nahe, dass hier höherfrequente Schallanteile, die nicht von der Zugvorbeifahrt herrühren, den Körperschallpegel ansteigen lassen.

5. Bestimmung der Abweichungen zum gemessenen Schallwert

Frequenz [Hz]	EMBE [dBA]	KS EMBE alt [dBA]	KS Grütz [dBA]
100	3.86	-3.95	Einzahlwert: -2.31
125	2.56	-5.16	
160	1.80	-5.89	Freq.: -5.09
200	1.05	-6.57	
250	0.35	-7.05	
315	-0.47	-7.84	

**Abb. 6:** Beispiel für Darstellung der Abweichungen der Berechnungswerte vom Messwert des Körperschalls in dB für die Methoden EMBE neu, EMBE alt (VIBRA-2) und Grütz (Einzahlwert und frequenzabhängig)

Durch die Farbhinterlegung können die Abweichungen optisch gut überprüft werden. Grün bedeutet nahe Messwert und rötlich zunehmend grössere Abweichung. Aus den einzelnen Abweichungswerten konnten verschiedene mittlere Abweichungen und Standardabweichungen z.B. für Messwerte vom Erdgeschoss oder Obergeschoss, für grosse oder kleine Räume usw. ermittelt werden.

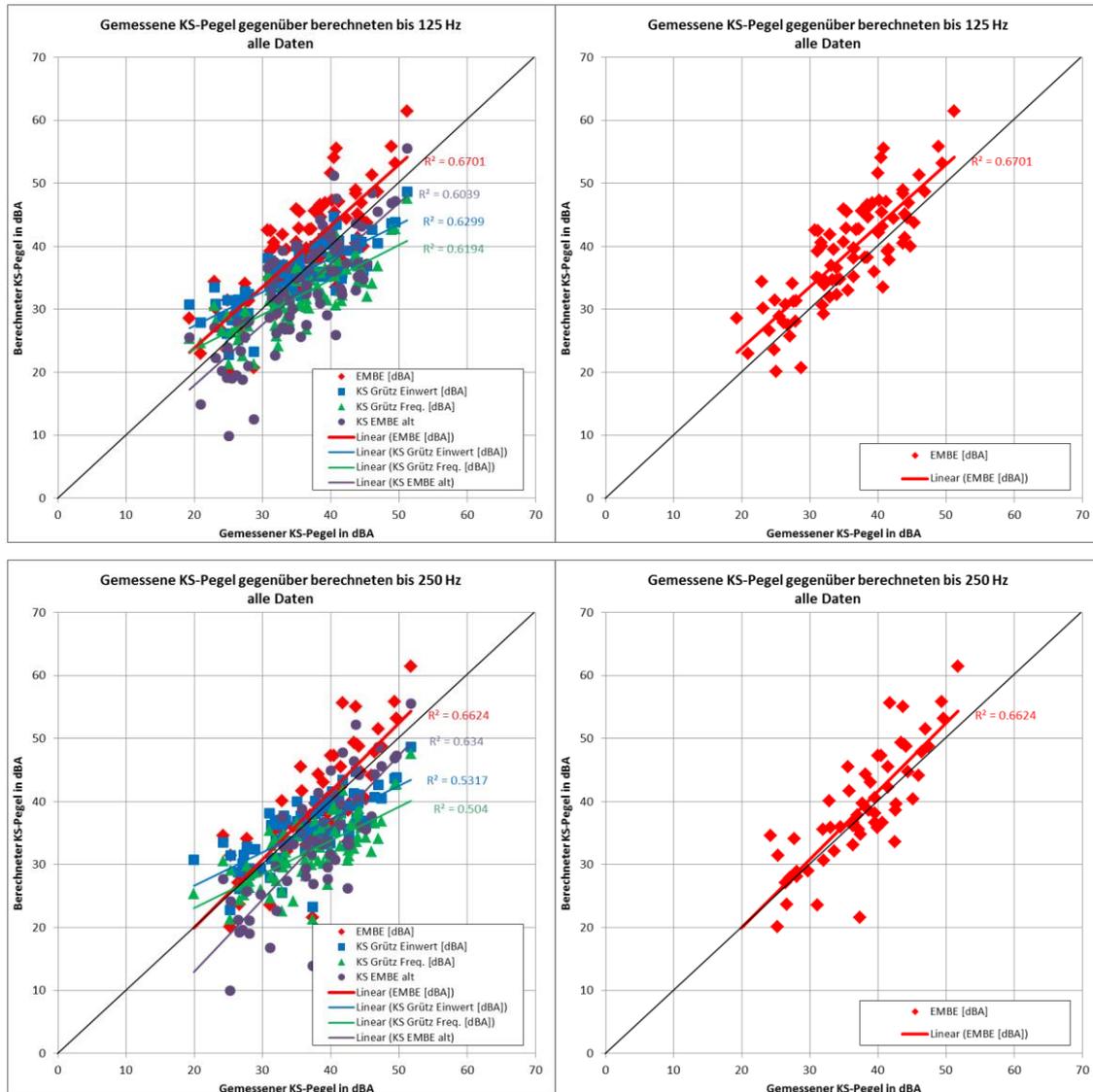
Hz	EMBE [dBA]	KS EMBE alt [dBA]	KS Grütz [dBA]
	<b>Mittelwert der Abweichung</b>		
100	3.20	-3.40	Einzahlwert: -1.79
125	3.39	-2.61	
160	2.28	-3.71	
200	1.84	-4.10	Freq.: -5.28
250	1.43	-4.45	
315	0.67	-4.29	

Hz	EMBE [dBA]	KS EMBE alt [dBA]	KS Grütz [dBA]
	<b>Standardabweichung der Abweichung</b>		
100	4.65	5.23	Einzahlwert: 4.77
125	4.81	5.53	
160	4.84	5.60	
200	5.02	5.76	Freq.: 4.88
250	5.31	6.01	
315	4.90	6.14	

**Abb. 7:** Beispiel für Darstellung von Mittelwerten der Abweichung der Berechnungswerte vom Messwert des Körperschalls in dB für die Methoden EMBE neu, EMBE alt (VIBRA-2) und Grütz (Einzahlwert und frequenzabhängig)

Die mittlere Abweichung der Berechnungswerte vom Messwert aller Daten beträgt für die Methodik der EMBE über alle angewendeten Daten zwischen 0.7 und 3.4 dB je nach Frequenzbegrenzung. Der nach EMBE berechnete Schallpegel liegt gegenüber den anderen untersuchten Berechnungsmethoden höher und im Mittel auch über dem gemessenen Körperschallpegel. Die Standardabweichung der Abweichungen ist hingegen für alle Methoden etwa gleich hoch und beträgt etwa 5 dB .

Die graphische Darstellung der Abweichungen in Abb. 8 verdeutlicht diese Aussagen. Die Streuung für alle untersuchten Berechnungsmethoden ist ähnlich gross, die mittlere Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten ist jedoch für die EMBE-Methodik über den belegten Pegelbereich am kleinsten (Trendgeraden). In den oberen Graphiken sind die Pegelwerte bis zum 125-Hz-Terzband aufsummiert, in den unteren bis 250 Hz. In den Graphiken auf der rechten Seitenhälfte ist nur der Vergleich für die EMBE-Methode dargestellt.

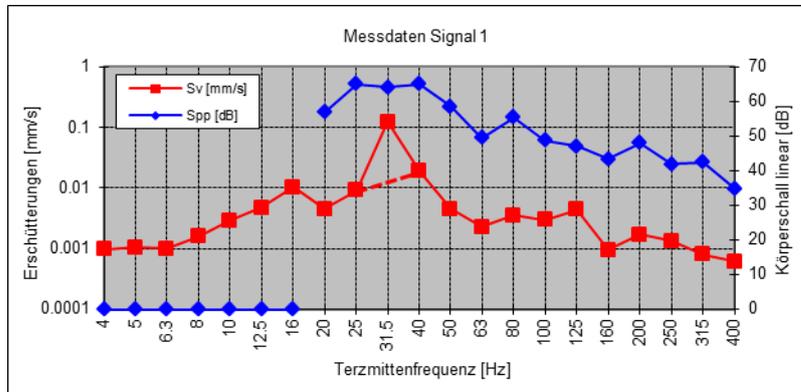


**Abb. 8:** Gegenüberstellung berechnete zu gemessene Körperschallpegel für verschiedene Berechnungsmethoden anhand der gleichen Messwerte

6. Elimination von Amplitudenspitzen der Erschütterungen bei der Deckeneigenfrequenz.

Die Kohärenz zwischen linearem Schallspektrum und dem Erschütterungsspektrum ist in manchen Fällen deutlich besser, wenn die Amplitudenspitze bei den Erschütterungen

bei der Deckeneigenfrequenz einfach gekappt wird, da das Spektrum des Körperschalls den ganzen Raum wiedergibt und die Erschütterungen des Fussbodens nur die Eigenschaften des Bodens.



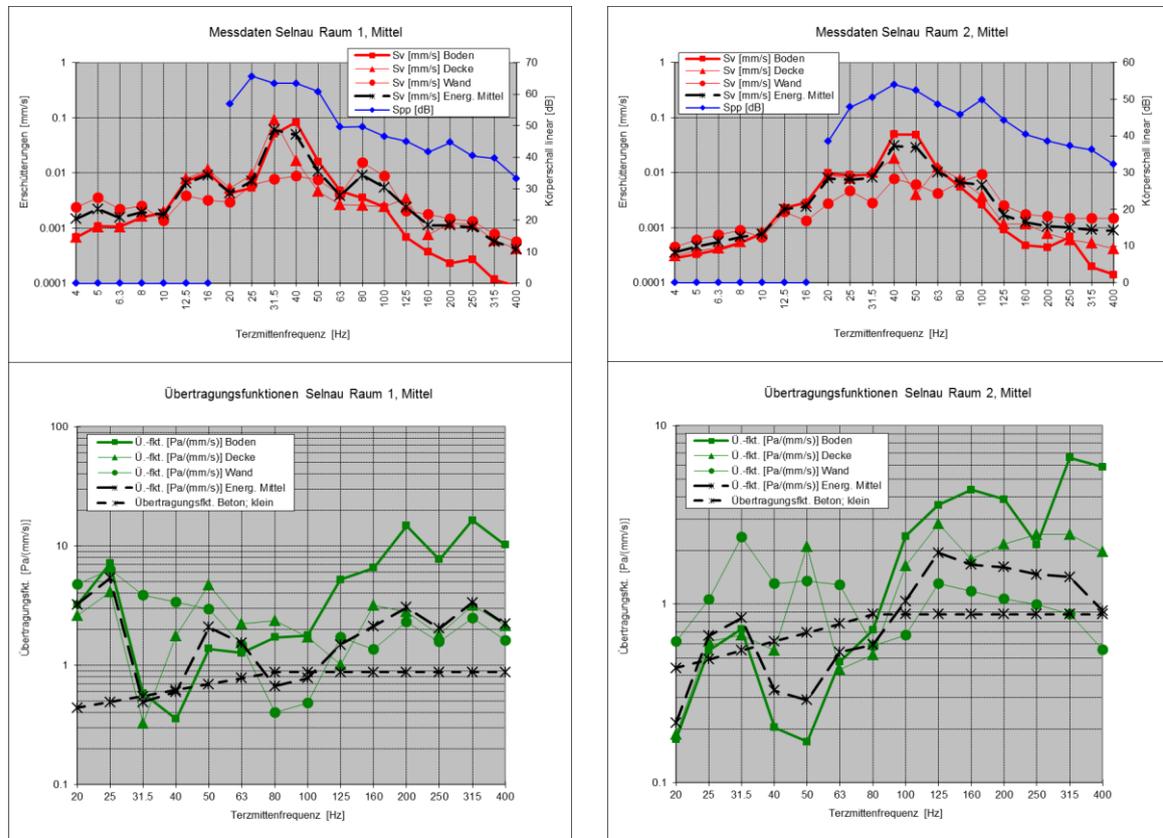
**Abb. 9:** Beispiel für die Elimination der Amplitudenspitzen der Erschütterungen bei der Deckeneigenfrequenz (gestrichelte Linie bei 31.5 Hz)

Die Durchführung der analogen Berechnungen des Körperschallpegels mit der Elimination der Amplitudenspitze (Abb. 9) hat aber gezeigt, dass der Einfluss auf den A-bewerteten Körperschallpegel infolge der hohen Reduktion der A-Bewertung bei den gängigen Eigenfrequenzen zwischen 10 und 50 Hz in Wohnräumen in der Regel vernachlässigbar ist und somit auf eine Korrektur der Erschütterungen am Fussboden verzichtet werden kann.

7. Analyse mit energetischer Mittelung der Erschütterungen aufgrund der Spezialmessung in Zürich-Selnau mit Boden-, Decke- und Wandmessung

Für das Forschungs- und Entwicklungsprojekt der AG LEO wurden 2001 in Zürich-Selnau in zwei Zimmern Zugfahrten mit 4 Mikrofonen mehrere normengerechte Anordnungen an verschiedenen Raumstellen gemessen. Die Streuung der ermittelten Körperschallpegel zwischen den verschiedenen Mikrofonen lag im Mittel nur zwischen 1-2 dB. Für weitere Analysen des Zusammenhangs zwischen Erschütterungen und dem abgestrahlten Körperschall wurde für den gemessenen Körperschall das Referenzmikrofon für die unterschiedlichen Anordnungen und die drei Erschütterungsmessungen auf dem Fussboden, Zimmerdecke und einer Wandmitte verwendet. In Abb. 10 kann man erkennen, dass die Übertragungsfunktion, die über das energetische Mittel der Erschütterungsspektren abgeleitet wurde, etwas näher an die Grundfunktion für Betondecken herankommt. Folgende Fragen stellen sich hier: Ist es überhaupt möglich, aus dem Erschütterungsspektrum des Fussbodens über eine Übertragungsfunktion genügend ge-

nau das Schallfeld im Raum abzubilden? Ist der Anteil des Fussbodens am Gesamtschall überhaupt massgebend?



**Abb. 10:** Messdaten Erschütterungen und Körperschall der Messung Zürich-Selnau der AG LEO in zwei Zimmern sowie die daraus abgeleiteten Übertragungsfunktionen in Pa/(mm/s) nach der Methodik der EMBE für die Einzelpositionen und die energetische Mittelung der Erschütterungswerte.

Die Differenz zwischen gemessenem und berechnetem Körperschallpegel reduziert sich für den Messraum 2 Selnau bei Verwendung des energetischen Mittels. Beim Messraum 1 erhöht sich die Differenz eher noch. Aufgrund dieser zwei Messungen lässt sich also noch kein klarer Trend ableiten. Weitere detaillierte Messungen an geometrisch einfach gebauten Räumen sind notwendig.

## 7. Neueste Messungen

Die Analysen durchgeführter Messungen aus der VIBRA-3 Datenbank haben zwar gezeigt, dass die Berechnung der Körperschallpegel über die EMBE-Methode im Mittel recht genau ist und gegenüber den anderen untersuchten Methoden eine Verbesserung darstellt. Die Streuung der Einzelresultate ist hingegen noch zu hoch, um von einem wirklichen Fortschritt

gegenüber anderen Methoden zu sprechen. Auf was ist die grosse Streuung zurückzuführen? Sind dies Unzulänglichkeiten der Berechnungsmethode oder die grosse Variabilität an Räumen für die gleiche Berechnungskategorie oder liegt es an der Qualität der Messdaten, die nicht speziell für die Validierung der EMBE-Methode vorgesehen waren?

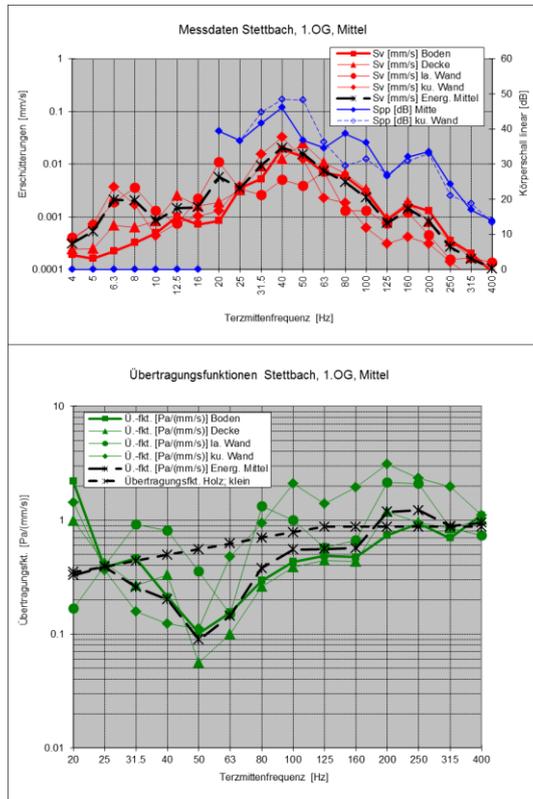
Wahrscheinlich spielen mehrere Faktoren mit. Es wurde deshalb beschlossen, spezielle Messungen in der Art der Messung Zürich-Selnau der AG LEO an ausgewählten Orten mit geometrisch sehr einfach aufgebauten Räumen durchzuführen. Durch die Messung an mehreren Punkten im Raum und an den Begrenzungsflächen sind detaillierte Auswertungen möglich, die für verschiedene Gebäudetypen hoffentlich auch zu deutlichen Resultaten und aufschlussreichen Tendenzen führen. Diese Spezialmessungen sollen klare Aussagen ermöglichen, ob die Methode der EMBE bei Standard-Verhältnissen zu ausreichend genauen Resultaten führt, was für Gründe eine genauere Berechnung verunmöglichen oder wie die Berechnungsmethodik verbessert werden kann.

Im Mai dieses Jahres konnte die erste dieser Messungen durchgeführt werden. In einem älteren Haus in Stettbach bei Dübendorf über der S-Bahnlinie wurden zwei Räume gemessen.



**Abb. 11:** Messräume OG und EG in Stettbach

4 Erschütterungssensoren und 6 Mikrofone wurden pro Raum verteilt. Die Vorbeifahrten der S-Bahnzüge im nahegelegenen Tunnel wurden deutlich wahrgenommen. Erste Auswertungen des Raumes im OG zeigen ausgehend von den Erschütterungen von Boden und Decke eine relativ grosse Abweichung des berechneten vom gemessenen Körperschallpegel, hingegen eine sehr kleine Abweichung bei Verwendung der Wanderschütterungen.



**Abb. 12:** Messdaten Erschütterungen und Körperschall der Messung Stettbach vom OG sowie die daraus abgeleiteten Übertragungsfunktionen in Pa/(mm/s) nach der Methodik der EMBE für die Einzelpositionen und die energetische Mittelung der Erschütterungswerte.

Die energetische Mittelung ergibt gegenüber der Fussbodenmessung keine deutliche Verbesserung der Übertragungsfunktion (weit gestrichelte Kurve in Abb. 12 unten). Diese liegt für den Fussboden allein für Frequenzen ab 100 Hz auch schon recht nahe der Modellfunktion der EMBE (eng gestrichelte Kurve in Abb. 12 unten) für kleine Räume mit Holzbalkendecken (massgebender Bereich für A-bewerteten Schallpegel).

Weitere Auswertungen sind momentan noch vorzunehmen. Im Speziellen sind für beide Räume noch Kohärenzuntersuchungen an den Schmalbanddaten der Erschütterungs- und Schallmessungen geplant, um den massgebenden Beitrag zum Körperschallpegel im Raum besser erfassen zu können.

## 9. Schlussfolgerungen

Der neue Ansatz zur Bestimmung des abgestrahlten Körperschalls in Räumen stützt sich einerseits auf physikalische Grundlagen und andererseits auf empirische Koeffizienten. Diese Mischung sollte gegenüber heute gängiger Methoden zu einer besseren Prognose des abgestrahlten Körperschalls aus den gemessenen Erschütterungen der Raumbegrenzungsflächen führen. Die Validierung bestehenden Messdaten zeigt zwar, dass die Berechnungen im Mittel über den erfassten Pegelbereich von ca. 20-50 dBA nur geringe Abweichungen ergeben, die Streuung der Ergebnisse jedoch derjenigen anderer Verfahren ähneln. Die Unsicherheit über die Qualität teils über 10 Jahre alter Messdaten und die grosse geometrische Variabilität gemessener Räume lassen noch keine klaren Aussagen zu, ob die vorgenommene Gebäudeklassierung mit den angenommenen Übertragungsfunktionen optimal gewählt wurde oder ob noch Anpassungen zur Reduktion der grossen Streuung gemacht werden müssen.

Dazu werden weitere detaillierte Erschütterungs- und Körperschallmessungen an verschiedenen Räumen in Gebäuden durchgeführt, die aufgrund ihrer einfachen Geometrie nahe an Idealfälle kommen. Damit sollte es möglich sein, die Koeffizienten der Berechnungsmethodik zu überprüfen und allenfalls Anpassungen vorzunehmen.

Im Weiteren sind auch numerische Simulationen des Schallfeldes in Räumen vorgesehen, um die Grenzen der Genauigkeit der Körperschallberechnung besser abschätzen zu können.

Das Ziel, eine zuverlässige Berechnungsmethodik für den abgestrahlten Körperschall festzulegen, ist noch nicht erreicht, Anzeichen für eine Verbesserung gegenüber heutiger Methoden sind jedoch deutlich sichtbar.

## 10. Literatur

- [1] Verordnung zum Schutz vor Erschütterungen (VSE). Entwurf Stand 2. Juni 2006
- [2] Bundesamt für Umwelt BAFU: Empfehlungen für Mess- und Berechnungsverfahren für Erschütterungen (EMBE). Entwurf Stand 2. Juni 2006
- [3] Said, A.; Grütz, H.-P.; Garburg, R.: „Ermittlung des sekundären Luftschalls aus dem Schienenverkehr“. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 53 (2006) Nr. 1 – Januar, S. 12-18
- [4] ONR 199005: Berechnung des sekundären Luftschallpegels aus Schwingungsmessungen. Ausgabe 2008-12-01
- [5] Billeter, P.; Egger, A., Müller, R.: “Development and assessment of a new approach to determine structure-borne sound in rooms”. Internoise 2013, Innsbruck