

# Bestimmung des abgestrahlten Körperschalls in Räumen aus gemessenen Erschütterungen (EMBE-Verfahren): Validierung des neuen Ansatzes

Adrian Egger<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Trombik Ingenieure AG, Zürich

Für die in Vorbereitung befindliche Verordnung zum Schutz vor Erschütterungen (VSE) hat das Bundesamt für Umwelt BAFU eine Vollzugshilfe «Empfehlungen für Mess- und Berechnungsverfahren für Erschütterungen (EMBE)» 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 auf der Geschossdecke bestimmen lässt. Die Hochrechnungsformel wird von der Form her auf physikalische Grundlagen abgestützt, ist frequenz- und raumabhängig (Raumgrösse und Absorptionsgrad werden mitberücksichtigt) und enthält zudem empirisch ermittelte Koeffizienten.

Gemessen wird die vertikale Schwinggeschwindigkeit  $v_e(t)$  für jedes relevante Ereignis (z.B. vorbeifahrender Zug) an der massgebenden Position auf dem Fußboden. Das Signal  $v_e(t)$  einer Einzelimmission während der Messdauer  $T_j$  ist in den Frequenzraum zu überführen, d.h. es ist ein Terzband-Leistungsspektrum  $S(f_{TB})$  zu bilden. Dieses Spektrum  $S(f_{TB})$  wird mit dem frequenzabhängigen 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 die akustische Wahrnehmung des Schalls durch den Menschen bewertet) und der Übertragungsfunktion  $H^*(f_{TB})$  der Abstrahl- und Raumeigenschaften multipliziert. Das führt zum gewichteten Spektrum des abgestrahlten Körperschalls eines Einzelereignisses. Der abgestrahlte Körperschall  $m_j$  ist anschliessend durch die Summation der Terzbandwerte zu berechnen und letztlich in Dezibel umzuwandeln  $M_j = 20 \times \log(10^{-3} \times (\rho \times c) \times m_j) / p_0$  (mit  $\rho = 1.204$  kg/m<sup>3</sup> Luftdichte bei 20°C und  $c = 343.3$  m/s Schallgeschwindigkeit in Luft bei 20°C).

Der wichtigste Parameter dieser Umrechnungsmethodik ist die Übertragungsfunktion  $H^*(f_{TB})$  der Abstrahl- und Raumeigenschaften. Es wird mit einem einfachen Ansatz einer abnehmenden Übertragung unterhalb der Grenzfrequenz und einer konstanten Übertragung bei und oberhalb der Grenzfrequenz gerechnet.

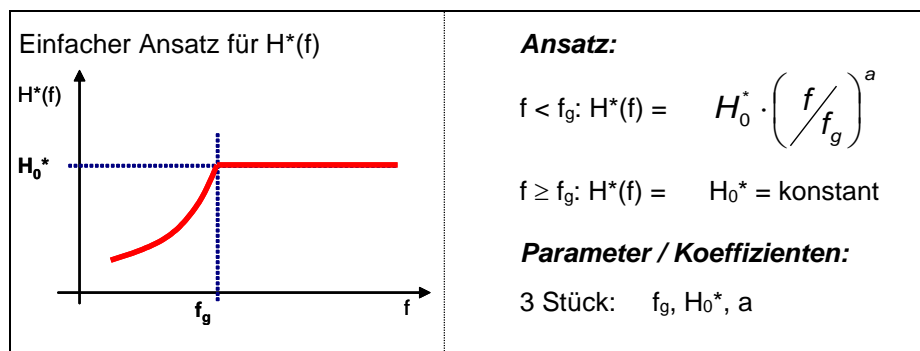


Abb. 1: Ansatz und Zielfunktionen für die Übertragungsfunktion  $H^*(f)$ .

Ist z.B. für Prognoseberechnungen bei einer neu geplanten Bahnstrecke über die zu prognostizierenden Räume nur wenig bekannt oder ist eine grosse Anzahl von Gebäuden zu beurteilen, dann sind Klassen für die Koeffizienten  $f_g, H_0^*, a$  zu bilden, in denen die typische Raumhüllen und Raumgrößen mit den entsprechenden Abstrahl- bzw. Halleigenschaften zusammengefasst werden. Je besser die Eigenschaften des Raumes bekannt sind, desto präziser können die Koeffizienten bestimmt werden. Für die Validierung der Hochrechnungsformel bzw. deren empirischen Koeffizienten wurden in den letzten Jahren Erschütterungs- und Schallmessungen von rund 90 Räumen ausgewertet. Diese erste Validierung hatte aufgezeigt, dass im Mittel zwar eine sehr geringe Abweichung

von den gemessenen Schallpegeln erzielt werden konnte, die Streuung der Abweichungen jedoch weiterhin eine Standardabweichung von rund 4 dB aufwies und damit nur wenig besser als bei anderen Hochrechnungsmethoden war.

Die Grösse  $H_0^*$  schreibt sich als  $H_0^* = 4 \times S / A^*$  mit  $S$  der Fläche der abstrahlenden Raumberandung (d.h. hier der Boden- bzw. Grundrissfläche) und  $A^*$  der sogenannten Absorptionsfläche als Produkt der gesamten Raumfläche  $A$  und einem mittleren Absorptionskoeffizienten  $\alpha^*$ . Mit der Nachhallzeit  $T_H$  lässt sich das akustische Verhalten eines Raums charakterisieren. Nach der Formel von Sabine besteht zwischen der Nachhallzeit, dem Raumvolumen und der Absorptionsfläche folgende Beziehung:  $T_H = 0.163 \times V / A^* = 0.163 \times V / (\alpha^* \times A)$ . Damit lässt sich die Übertragungsfunktion  $H_0$  auch als  $H_0^* = 24.5 \times S \times T_H / V$  schreiben.

Werden nun statt standardisierter Raumgrössen und Nachhallzeiten die gemessenen Ausdehnungen und Nachhallzeiten für  $H_0^*$  sowie die Koinzidenzfrequenzen  $f_0$  und die Exponenten  $a$  entsprechend einem 'Best fit' der gemessenen Übertragungsfunktionen (jedoch innerhalb des physikalisch sinnvollen Bereichs) bestimmt, dann reduziert sich für die Validierung der Berechnungsmethodik die Streuung der Abweichungen signifikant.

Bei jüngsten Messungen von Erschütterungen und Körperschall in Gebäuden wurde auch immer gleich der Nachhallmesstechnisch bestimmt: Weitere 27 Räume von Häusern über Bahntunneln und rund 35 Räume an offener Streckenführung konnten so mit der verfeinerten Berechnungsmethodik zur Validierung verwendet werden. Im Folgenden werden die berechneten Pegel denjenigen der Körperschallmessungen der Räume über Bahntunneln dargestellt, links mit den kategorisierten Standardfunktionen und rechts auf der Basis der gemessenen Nachhallzeiten und Übertragungsfunktionen.

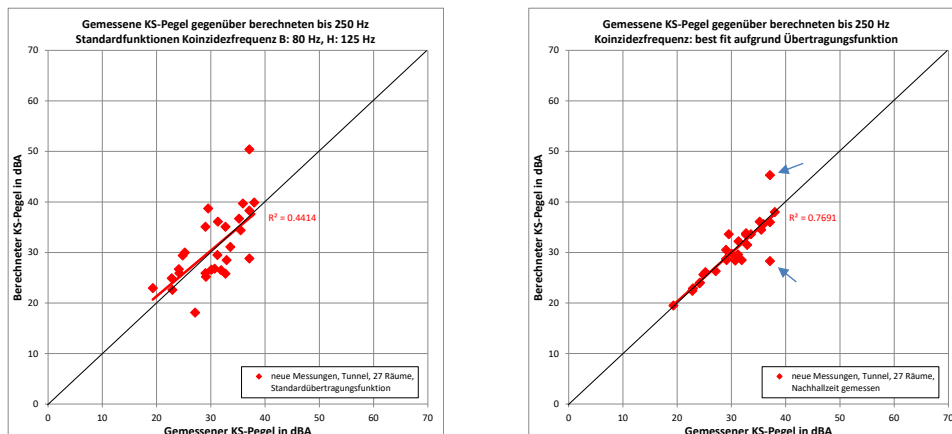


Abb. 2: Gegenüberstellung berechneter und gemessener Pegel des abgestrahlten Körperschalls.

Mit bekannten Raumeigenschaften ist die Übereinstimmung bei dieser Auswahl sehr gut. Die gleichen Grafiken bei Räumen an offenen Bahnstrecken zeigen keine starke Verbesserung bei der Streuung trotz der bekannten Raumeigenschaften. Ein Grund dafür ist sicher der Störeinfluss des Direktschalls. Andererseits gibt es auch einige Räume, bei denen die vorliegende Berechnungsmethodik versagt, so wie beim Beispiel mit den grössten Abweichungen in der Grafik oben rechts (Pfeile): ausgebauter Wohnraum mit einer Hälfte als Beton- und der anderen Hälfte als Holzbalkendecke mit entsprechend zwei Erschütterungsmesspunkten (und somit auch zwei Prognosen) und nur einem zentralen Schallmesspunkt.

Dieser Beitrag zeigt, dass mit der verfeinerten Berechnungsmethodik eine gute Vorhersage des abgestrahlten Körperschalls über Erschütterungsmessungen am Boden erreicht wird.

**LITERATUR**

Egger, A. & Billeter, P. (2018), Analysen zur EMBE-Methodik der Körperschallberechnung - Validierung über Bestandsmessungen, unveröffentlichter Bericht des BAFU.  
 Egger, A. & Billeter, P. (2016), Sekundärschallvorhersagen aus Erschütterungen - Stand der Dinge in der Schweiz, Dynamik Tagung Wien 2016.