

# Neue Messmethode für Gehschall

Rudolf Bütikofer

*Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Akustik,  
CH-8600 Dübendorf, Schweiz, Email: Rudolf.Buetikofer@empa.ch*

## Einleitung

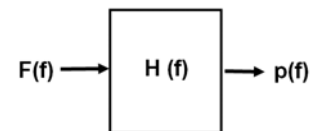
Verschiedene Bodenkonstruktionen wie Teppiche, Parkett, Lamine oder Keramik tönen beim Begehen mit harten Schuhen unterschiedlich laut. Es ist naheliegend, dieses akustische Verhalten mit dem ISO-Normhammerwerk zu untersuchen. Insbesondere bei Laminaten hat es sich aber gezeigt, dass das Normhammerwerk einige Bodenaufbauten als „laut“ erscheinen lässt, die in der subjektiven Beurteilung „eher leise“ eingestuft werden und umgekehrt. Weiter hat das Hammerwerk die schwerwiegenden Nachteile, dass die Antriebsmechanik sehr laut ist, dass die Hämmer selber Schall abstrahlen, dass das grosse Gehäuse den direkten Schall vom Aufschlagort teilweise abschirmt und dass der Hammerschlag zu stark ist. Der Hauptgrund, der gegen das Norm-Hammerwerk spricht, ist aber die wesentlich andere Impedanz (Masse und Steifigkeit) des Hammers im Vergleich zu einem Schuh. Dadurch ergeben sich andere Anregungsverhältnisse, welche zu den oben erwähnten Klassierungsunterschieden führen. Die Empa hat deshalb vor vier Jahren im Auftrag der EPLF (European Producers of Laminate Floorings) [1] begonnen, ein modifiziertes Messverfahren zu entwickeln, das in Übereinstimmung mit der subjektiven Beurteilung ist. Von den EPLF-Vorgänger-Normen mit Hammerwerk [2] wurden die Messung im Freifeld (d.h. im reflexionsarmen Raum) und die Beurteilung mit der Lautheit [3] übernommen. Es zeigte sich, dass das Hauptelement der neuen Messmethode ein Hammer ist, der die selbe Impedanz wie ein Referenzschuh hat („künstlicher Schuh“). Weil der Bau eines „Mini-Hammerwerks“ aufwändig ist, welches mit diesem neuen Hammer bestückt wäre, aber all die oben erwähnten Mängel vermeiden würde, wird alternativ eine Lösung mit einem Impulshammer mit integrierter Kraftmessdose verwendet. Solche Hämmer werden von verschiedenen Firmen für rund 1000 Euro angeboten.

## Hintergrund

Beim Gehen mit harten Absätzen entstehen verschiedene Geräusche: (i) der Boden wird durch den Aufprall des Absatzes angeregt und strahlt Schall ab; (ii) der Schuh erfährt die selbe Anregung und strahlt auch Schall ab; (iii) die Sohle klatscht auf den Boden; (iv) es gibt diverse Nebengeräusche von Kleidern, Knarren des Leders, Schaben der Sohle etc. Hier geht es nicht darum, all diese Effekte zu reproduzieren, sondern die Fragestellung ist eingeschränkt auf das Verhalten der Bodenkonstruktion beim Aufprall der Kante des harten Absatzes. Dies ist ein Kraftstoss von ein bis zwei Millisekunden Dauer, der anregungsseitig nur vom Absatz und seiner Auftreffgeschwindigkeit abhängt. Wegen der extrem kurzen Dauer ist diese Anregung entkoppelt von der tieffrequenten Dynamik des Fusses und Beins, wie auch vom

Gewicht der gehenden Person, welche den Boden erst belastet, wenn der Schlag bereits abgeklungen ist [4].

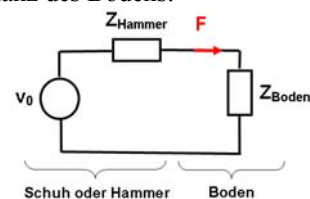
Somit vereinfacht sich die Frage des Gehschalls auf die Frage: Wie gross ist der von einer bestimmten Bodenkonstruktion abgestrahlte Schalldruckpegel  $p$ , wenn diese mit einer bestimmten Kraft  $F$  angeregt wird? Das System „Bodenkonstruktion, angeregt an einer bestimmten Stelle und Schallabstrahlung zum Mikrofonstandort“ kann als lineares System betrachtet werden. Solange die Anregungskraft den Eingang nicht übersteuert, hängt auch das resultierende Schalldruckspektrum  $L_p(f)$  bei einer gegebenen Bodenkonstruktion nur vom anregenden Kraftspektrum  $L_F(f)$  ab.



Die Schwierigkeit ist nun hier, dass nicht die Übertragung  $H(f)$ , sondern das resultierende Luftschallspektrum entscheidend ist. Die analoge Frage in der Bauakustik wäre nicht, wie gut die Luftschalldämmung einer Wohnungstrennwand ist, sondern wie gut die Stereoanlage des Nachbarn gehört wird. Beim Gehschall konzentriert sich damit die Frage auf das anregende Kraftspektrum. Entscheidend ist damit auch der Frequenzumfang des Kraftspektrums: überträgt z.B. der Boden die hohen Frequenzen besonders gut, so unterscheidet sich der resultierende Luftschall je nachdem, ob das anregende Spektrum hohe Frequenzen enthält (im Falle eines harten Absatzes) oder aber ob diese fehlen (im Falle einer weichen Gummisohle). Die Art der Anregung verändert also in entscheidender Weise das Ergebnis und blendet unter Umständen hochfrequente Boden-Eigenschaften aus.

## Impedanzen

Die unabhängige Grösse ist die Auftreffgeschwindigkeit  $v_0$  des Schuhs bzw. des Hammers auf den Boden. Das resultierende Kraftspektrum  $F(f)$  ergibt sich aus dem Zusammenwirken der Quellenimpedanz (Hammer bzw. Schuh) und der Eingangsimpedanz des Bodens:



Da der Absatz eines Schuhs eindeutig leichter und weicher ist als der 500 Gramm schwere Stössel beim Hammerwerk wird klar, weshalb sich Unterschiede zwischen Begehung und Hammerwerkanregung ergeben. Wenn es das Ziel ist, realitätsnahe Messergebnisse mit einer einfachen Messtechnik zu erhalten, so kommen wir nicht darum herum, einen

Referenzschuh als Bezugsanregung festzulegen. Auf Grund langjähriger Erfahrungen des Instituts für Holztechnologie (IHD) in Dresden und vieler Messungen mit diversen Schuhen wurde dazu der seit Jahren hergestellte Tanzschuh „Diamant“ [5] mit einer Prüfsohle SBR1 von 4 mm Dicke [6] festgelegt.

## Der künstliche Schuh

Aus Vergleichsmessungen mit dem Schuh „Diamant“ ergab sich eine dynamisch aktive Masse von knapp 200 Gramm und einer Steifigkeit der Schlagspitze von 1.3 MN/m. Dies kann mit einem Impulshammer und einer 10 mm langen Spitze aus hartem PE [7] mit 5 mm Durchmesser realisiert werden:



## Messung

Die Messung erfolgt in einem reflexionsarmen Raum in 1 m Abstand unter 45 Grad von der Schlagstelle. Um eine örtliche Mittelung über den Boden zu erhalten, wird der Boden nacheinander auf einem Kreissegment mit Radius 0.71 m beklopft. Der Raumeinfluss wird nach ISO 3744 (Schallleistungsmessung) für einen Abstand von 1 m berücksichtigt. Bei Laminaten genügt eine Betonplatte als Unterlage. Ist die Betondecke an der Abstrahlung mitbeteiligt (Teppich, Parkett, Fliesen), so wird der Beitrag der Decke in einem darunterliegenden Trittschallprüfstand erfasst und dieser Anteil auf die Bezugsdecke nach ISO 717-2 umgerechnet.

Die Messung erfolgt mit einem zweikanaligen Terzbandanalysator. Gleichzeitig werden das Kraftsignal ab 50 Hz und der Luftschall ab 100 Hz bis 5000 Hz als  $L_{eq}$  über eine beliebige Zeit und über eine beliebige Anzahl Schläge gemessen. Mit dem Kraftsignal erfolgt anschliessend eine Skalierung des Luftschall-Pegel-Spektrums auf denjenigen Wert, der durch einen einzelnen Schritt erzeugt worden wäre, wenn dieser als  $L_{eq}$  über 100 ms dargestellt wird. (Die Darstellung als 100 ms  $L_{eq}$  wurde von der gängigen Praxis bei Gehschallmessungen im IHD übernommen). Diese Skalierung berechnet sich mit Hilfe des Impulssatzes:

$$I = m\Delta v = \int F(t)dt \quad \Delta v = v_1 + v_2 = v_1(1 + \alpha) \quad \alpha = \frac{v_2}{v_1}$$

Die Geschwindigkeit  $v_1$  ist die Aufprallgeschwindigkeit und  $v_2$  die Rückprallgeschwindigkeit des Hammers bei einem Schlag. Der Rückprallfaktor  $\alpha$  kann aus einer einfachen Zusatzmessung bestimmt werden, indem der Impulshammer lose gehalten wird und dieser Mehrfachschläge auf den Boden macht: Wenn  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$  die Zeiten des ersten, zweiten und dritten Aufpralls bezeichnen, so ist

$$\alpha = \frac{T_3 - T_2}{T_2 - T_1}$$

Die Masse  $m$  ist die dynamisch aktive Masse des Impulshammers (200 Gramm). Das Integral der Kraft ergibt sich im

Frequenzbereich als Division durch  $\omega$ . Der Pegel  $L_i$  in der nächsten Formel ist  $20 \lg(2\pi f_i)$ . Nun kann mit der Impuls-Gleichung die für die Messung äquivalente Auftreffgeschwindigkeit  $v_1$  und somit die Pegelanpassung  $\Delta L$  bestimmt werden:

$$v_1 = \frac{\sum_i 10^{\frac{L_{F,i} - L_i}{20}}}{m(1 + \alpha)} \quad \Delta L = 20 \lg(v_{ref}/v_1)$$

$v_1$  ist hier eine reine Rechengrösse, denn sie enthält zusätzlich die Messdauer und die Anzahl Schläge, die somit auch in  $\Delta L$  enthalten sind damit nun das Luftschallspektrum auf einen einzigen Schlag normieren. Auch  $v_{ref}$  ist eine reine Rechengrösse (Betrag: 0.63), die aus realen Begehungen als 100 ms  $L_{eq}$  hergeleitet wurde. Bei der Berechnung wird das Luftschallspektrum zuerst mit dem Grundgeräusch korrigiert und dann die spektrale Raumkorrektur  $K$  (ISO 3744) und die globale Skalierung  $\Delta L$  addiert. Daraus werden der A-Pegel und die Lautheit berechnet.

Liefert die Prüfstanddecke einen Beitrag, so muss die Messung in einem Trittschallprüfstand erfolgen (oben Freifeld, unten Diffusfeld). Zuerst wird der Freifeldpegel von der Decke abgeschätzt, indem beim Beklopfen im darunterliegenden Diffusfeld der mittlere Raumpegel erfasst und entsprechend mit dem Kraftsignal normiert ( $L_2$ ) und dann auf den Freifeldpegel umgerechnet wird:

$$L_{FF,Decke} = L_2 + 10 \lg(A/S) - 6 \quad \text{mit } S = \text{Fläche der Decke}$$

Die Umrechnungskorrektur  $D_i$  auf die Bezugsdecke ergibt sich aus dem Unterschied des Normtrittschallpegels der Prüfdecke ( $L_{n,0}$ ) zur Bezugsdecke nach ISO 717-2 ( $L_{n,0,r}$ ). Mit dem im obern Raum gemessenen und skalierten  $L_1$  ergibt sich das Gesamt-Spektrum  $L_r$ :

$$L_r = 10 \cdot \lg \left( 10^{0.1 \cdot L_1} - 10^{0.1 \cdot L_{FF,Decke}} + 10^{0.1 \cdot (L_{FF,Decke} + D)} \right)$$

Die Übereinstimmung der Messung an Laminaten mit der subjektiven Beurteilung durch 300 Personen war gut. In [8] und im Messnormen-Entwurf „EPLF 021029-5 plus“ ist die Methode ausführlich beschrieben, und die ganze Berechnung ist in einem Excel-Blatt benutzerfreundlich verpackt.

## Literatur

- [1] EPLF, <http://www.eplf.com>
- [2] EPLF Norm 021029, Laminate floor coverings - Determination of drum sound generated by means of a tapping machine (Version 3, 2004); (Version 2, 2003); (Version 1, 2003)
- [3] ISO 532 B (1975), Acoustics - Method for calculating loudness levels
- [4] R. Bütikofer, Gehschall: Das Hammerwerk kann den Schuh nicht nachbilden, DAGA 2008, Dresden.
- [5] Diamant: Article number 060-047-070 <http://www.diamant.net>
- [6] PFI, Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens, Germany <http://www.pfi-ps.de>
- [7] Firma Simona AG, Teichweg 16, D - 55606 Kirn: PE-HWU-B Schweissdrähte, schwarz, RD 5.0
- [8] R. Bütikofer, New acoustic Test Procedure for Hard Floor Covering Systems with Soft Underlay, Acta Acustica united with Acustica, Vol 96 (2010), in press