

Berechnung der Gehgeräusche-Immissionen und Trittschalldämmung von Geschossdecken aus Holz im Frequenzbereich von 16 Hz bis 200 Hz

(Forschungsarbeit vom Institut für Lärmschutz Kühn + Blickle, 6314 Unterägeri)

1. Einleitung

In den letzten Jahren konnte eine starke Zunahme von Geschossdecken aus Holz festgestellt werden, sei es bei der Renovation bzw. beim Umbau von alten Wohnhäusern oder bei der Erstellung von Ein- und Mehrfamilienhäusern. Beim Umbau werden dann häufig die alten Holzbalkendecken derart aufgerüstet, dass die schalltechnischen Anforderungen gemäss der Norm SIA 181 erfüllt werden, während bei Neubauten eher Geschossdecken aus Vollholz bzw. Brettstapeln oder Hohlkastensysteme eingesetzt werden. Sie können in der Werkstatt bequem hergestellt werden und sind am Bau in kürzester Zeit einsatzbereit. Zudem weisen Vollholz- und Hohlkastendecken hervorragende statische Eigenschaften auf, bei denen die herkömmlichen Holzbalkendecken nicht mehr mithalten können.

Mit dem vermehrten Einsatz von Holzdeckensystemen haben nun parallel dazu die Klagen über störende Gehgeräusche-Immissionen zugenommen. Dabei handelt es sich um dröhnende Gehgeräusche im tieffrequenten Bereich, welche beim Begehen der Decke in den darunter liegenden Raum abgestrahlt werden. Eine messtechnische Überprüfung der Geschossdecken gemäss den Richtlinien der gängigen ISO-Normen ergibt dann meistens eine Trittschalldämmung, welche die Anforderungen für einen Mindest- und erhöhten Schallschutz gut erfüllt.

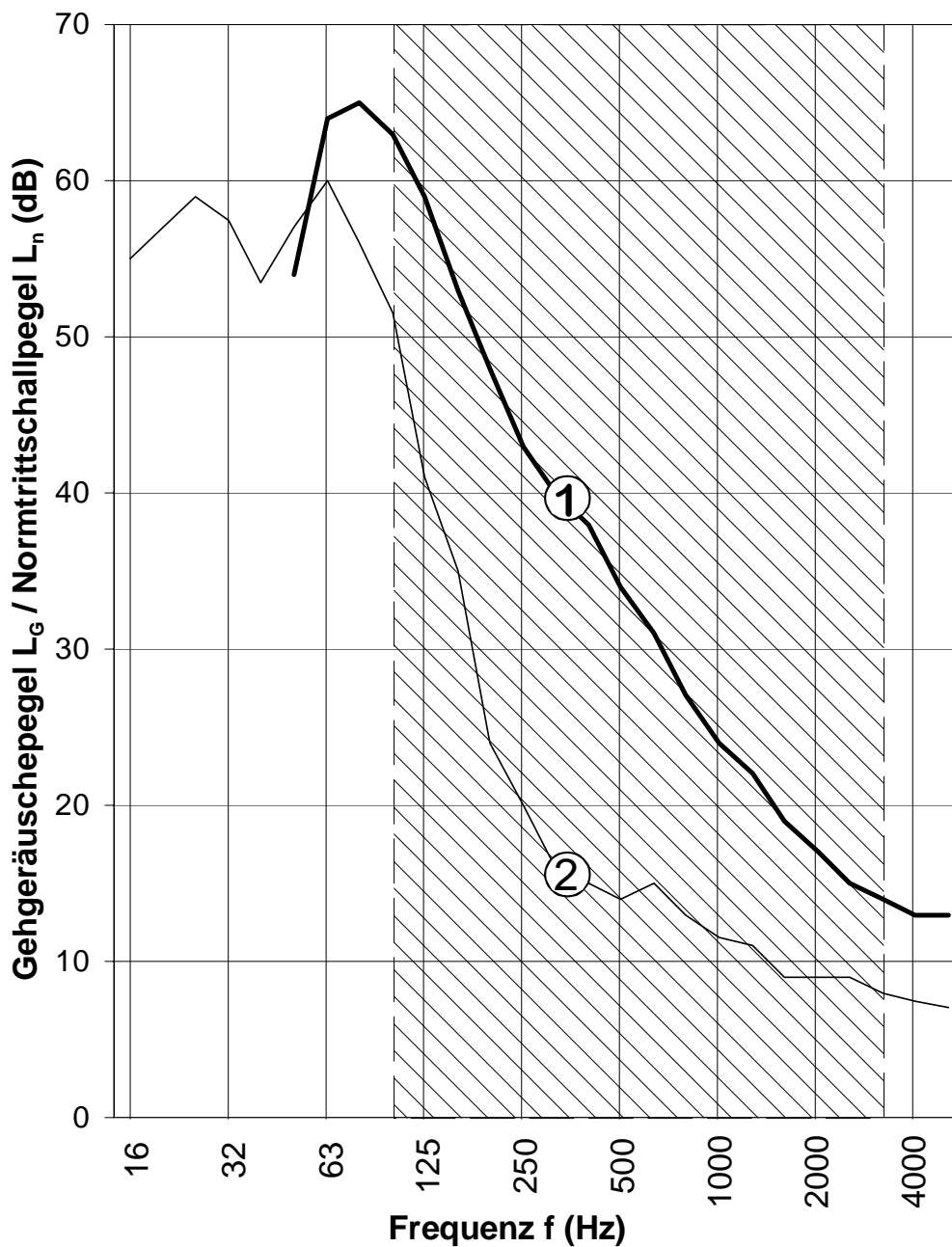


Diagramm 1: Gehgeräusche-Immissionen und Trittschalldämmung bzw. Normtrittschallpegel einer mehrschaligen Geschossdeckenkonstruktion aus Holz

Kurve 1: Normtrittschallpegel L_n nach EN ISO 140 (Messbereich $f = 50 \text{ Hz} - 5000 \text{ Hz}$)

Kurve 2: Gehgeräusche L_G im Empfangsraum beim normalen Begehen der Decke ohne Schuhe

Die Kurve 1 im Diagramm 1 stellt den gemessenen Normtrittschallpegel der untersuchten Geschossdecke dar. Ihr Dämmwert errechnet sich zu $L_{n,w} = 46$ dB und erfüllt somit die nach der SIA-Norm 181 geforderte Trittschalldämmung für einen erhöhten Schallschutz gut. Bei der Berechnung der Einzahlangabe $L_{n,w}$ wird jedoch nur der im Diagramm 1 dargestellte schraffierte Bereich von 100 Hz bis 3150 Hz berücksichtigt, obwohl bei den Holzdecken die Hauptanteile des Normtrittschallpegels und Gehgeräuschepegels darunter liegen. Dies führt daher ganz generell zu einer massiven Unterbewertung von Leichtbaukonstruktionen. Im Zuge der Einführung der Europanormen (EN) hat sich in jüngster Zeit eine weitere Grösse zur Beschreibung der Trittschalldämmung etabliert. Die Rede ist vom sogenannten Spektrumanpassungswert C_I , welcher besonders den tieffrequenten Bereich der Trittschalldämmung berücksichtigt, nämlich 100 Hz bis 2500 Hz ($C_{I100-2500}$) und 50 Hz bis 2500 Hz ($C_{I50-2500}$). Je kleiner nun diese C_I -Werte ausfallen, desto besser ist die Trittschalldämmung der Holzdecke im tieffrequenten Bereich. Im vorliegenden Beispiel (siehe dazu das Diagramm 1) liegt der Spektrumanpassungswert $C_{I100-2500}$ bei 4 dB.

Zusammenfassend ergibt sich, dass bei der Beurteilung von Geschossdecken ansich nur der Frequenzbereich von bestenfalls 50 Hz bis 5000 Hz in Betracht gezogen wird. Beim Analysieren des Gehgeräusches beim Begehen einer Geschossdecke stellt man jedoch sehr starke Luftschallpegelkomponenten auch im Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 50 Hz fest (siehe dazu die Kurve 2 im Diagramm 1). Der Grund dafür liegt bei der andersartigen Kraftanregung durch den menschlichen Fuss im Vergleich zum Normhammerwerk, welches aus 5 frei fallenden Stahlhämmern besteht. Beim Fuss handelt es sich um eine weich aufsetzende Kraftquelle, während die Schläge beim Hammerwerk doch eher als hart einzustufen sind. Bei einem Vergleich der beiden Kurven 1 und 2 wird ersichtlich, dass die beiden Schallquellen Hammerwerk und Fuss ganz unterschiedliche Frequenzspektren liefern. Die harten Schläge des Hammerwerks verursachen durchwegs Luftschallpegel, welche im üblichen Messbereich mehr als 20 dB über den Luftschallpegeln des Gehgeräusches liegen. Beim Gehgeräusch ist es eher so, dass seine Hauptkomponenten zwischen 16 Hz und 100 Hz liegen, was für das Dröhnen charakteristisch ist. Leider wird gerade dieser Frequenzbereich mit dem heute gängigen Mess- und Bewertungsverfahren nur sehr ungenügend berücksichtigt. Auch existieren praktisch keinerlei Anforderungen, welche für diesen Frequenzbereich zulässige Grenzwerte festlegen.

2. Berechnungsmodell

Die im obigen Diagramm 1 dargestellten Messkurven weisen die für Geschossdecken aus Holz typischen Frequenzgänge auf: sehr hohe Luftschallpegel im Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 160 Hz; stark abnehmende Luftschallpegel mit zunehmender Frequenz oberhalb ca. 125 Hz. In anderen Worten ausgedrückt heisst das, dass für die Beurteilung von Holzdecken in erster Linie der tieffrequente Bereich massgebend ist. Wie rechnerische Untersuchungen zeigen, reicht es für die Bestimmung der wichtigen trittschalltechnischen Grössen $L_{n,w}$ und C_I völlig aus den tieffrequenten Frequenzbereich bis $f = 200$ Hz zu berücksichtigen, während die Luftschallpegel bei den höheren

Frequenzen unberücksichtigt bleiben dürfen. Der bei dieser eingeschränkten Betrachtungsweise auftretende Fehler liegt bei gebrauchsfertigen Geschossdecken (Decken mit Trockenboden, Zementunterlagsboden etc.) bei maximal 1 dB.

Aufgrund der Möglichkeit den Frequenzbereich auf 200 Hz einzuschränken, wurde ein vereinfachtes Berechnungsmodell entwickelt, welches erlaubt, sowohl die Gehgeräuschepegel L_G als auch die Normtrittschallpegel L_n von Geschossdecken aus Holz mit ausreichender Genauigkeit terzweise zu bestimmen:

$$L_G(f) = L_{no} + 20 \log \left[\frac{Z_{Bo}}{Z_B + Z_M} \right] - 9 \log \left[\frac{\left(1 - \left(\frac{f}{f_{od}}\right)^2\right)^2 + d_d}{1 + d_d} \right] - 5 \log \left[\frac{\left(1 - \left(\frac{f}{f_{ob}}\right)^2\right)^2 + d_b}{1 + d_b} \right] + \Delta L_G(f) \quad [dB]$$

Dabei bedeuten:

L_{no} : Normtrittschallpegel einer fiktiven Bezugsdecke, bestehend aus 22 - 25 mm dicken Holzspan- oder MDF-Platten, kraftschlüssig mit Holzbalken verbunden (siehe Zeichnung hinten):

Frequenz f	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	(Hz)
------------	----	----	----	------	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	------

L_{no}	75,0	76,0	76,0	76,5	77,0	77,0	77,5	78,0	79,0	82,5	83,0	83,0	(dB)
----------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

(Bemerkung: Die obigen L_{no} -Werte sind empirische Werte)

Z_{Bo} : Eingangsimpedanz Holzbalken der Bezugsdecke:

$$Z_{Bo} = 2,67 \cdot \rho_o \cdot H_o \cdot B_o \cdot \sqrt{c_o \cdot H_o \cdot f} (1+i)$$

(ρ_o : Dichte Holz; H_o : Balkenhöhe = 0,20 m; B_o : Balkenbreite = 0,12 m; c_o : Dehnwellengeschwindigkeit Holz = 2500 m/s; i : imaginäre Einheit)

Z_B : Eingangsimpedanz der Holzbalken der Geschossdecke

$$Z_B = 2,67 \cdot \rho \cdot H \cdot B \cdot \sqrt{c \cdot H \cdot f} (1+i)$$

Z_M : Eingangsimpedanz der Geschossdecke:

$$Z_M = 2,67 \cdot e \cdot \sqrt{c \cdot H \cdot f} \cdot (m_{b1} + m_{b2}) i$$

(e: Achsabstand der Holzbalken; m_{b1} : flächenbezogene Masse der Gehschicht (Trockenboden, Unterlagsboden etc); m_{b2} : flächenbezogene Masse der Holzspan- oder MDF-Platten auf den Holzbalken, inkl. einer darauf verlegten Beschwerung (Betonplatten, Schüttung))

f_{od} : Masse-Feder-Masse Resonanz der Deckenverkleidung unterhalb der Holzbalken:

$$f_{od} = 161 \cdot \sqrt{s_d \cdot \left(\frac{1}{m_{d1}} + \frac{1}{m_{d2}} \right)} \quad [Hz]$$

(s_d : dynamische Steifigkeit des Luftpolsters inkl. darin verlegtes Dämmmaterial; m_{d1} : flächenbezogene Masse der abgehängten Decke; m_{d2} : entspricht im Normalfall der Grösse m_{b2} ,
Ausnahme: Holzbalken mit Zwischenboden und darauf verlegter Schüttung)

d_d : Verlustfaktor des Luftpolsters inkl. darin verlegtes Dämmmaterial ($d_d = 0,3 - 0,5$)

f_{ob} : Masse-Feder-Masse Resonanz des aufgelegten Trockenbodens, Zementunterlagsbodens etc., inkl. Einfluss einer darunter verlegten Beschwerung (Betonplatten, Schüttung):

$$f_{ob} = 161 \cdot \sqrt{s_b \cdot \left(\frac{1}{m_{b1}} + \frac{1}{m_{b2}} \right)} \quad [Hz]$$

(s_b : dynamische Steifigkeit der Dämmschicht unter dem Trockenboden, Zementunterlagsboden etc.)

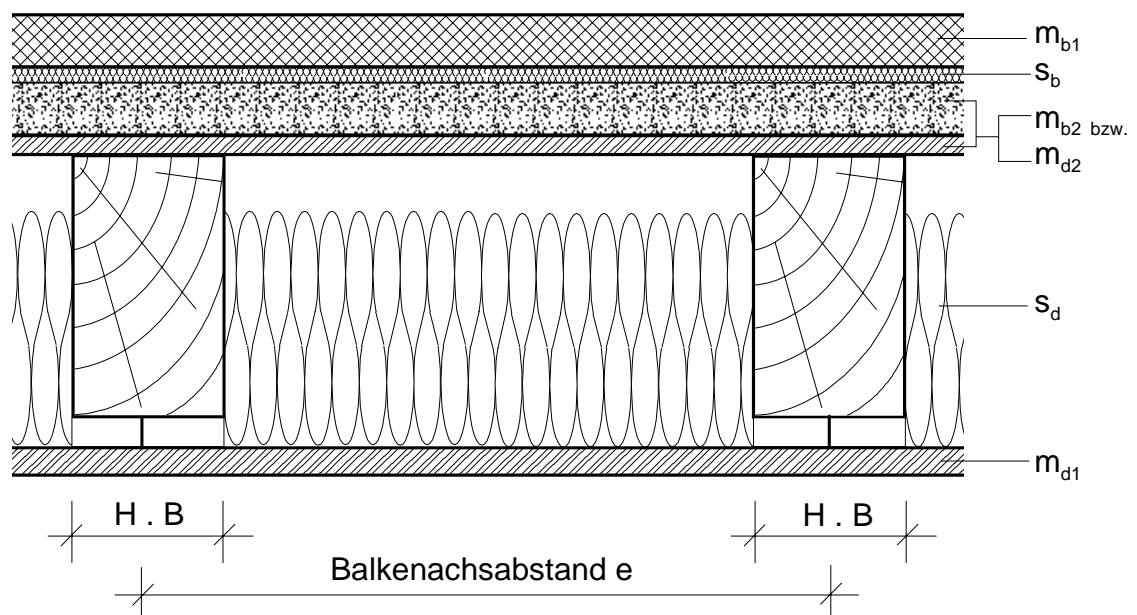
d_b : Verlustfakten der Dämmschicht unter dem Trockenboden, Zementunterlagsboden ($d_b = 0,1 - 0,4$)

$\Delta L_G(f)$: Korrektur bei der Berechnung des Gehgeräuschepegels im Empfangsraum (anstelle des Normtrittschallpegels L_n):

f	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	(Hz)
---	----	----	----	------	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	------

ΔL_G	0	0	0	0	0	-3,0	-7,5	-12,0	-16,5	-21,0	-25,5	-30,0	(dB)
--------------	---	---	---	---	---	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	------

Bemerkung: Bei der Berechnung des Normtrittschallpegels L_n fallen die Korrekturwerte $L_G(f)$ weg.



Schnitt durch Geschossdecke mit eingetragenen Grössen

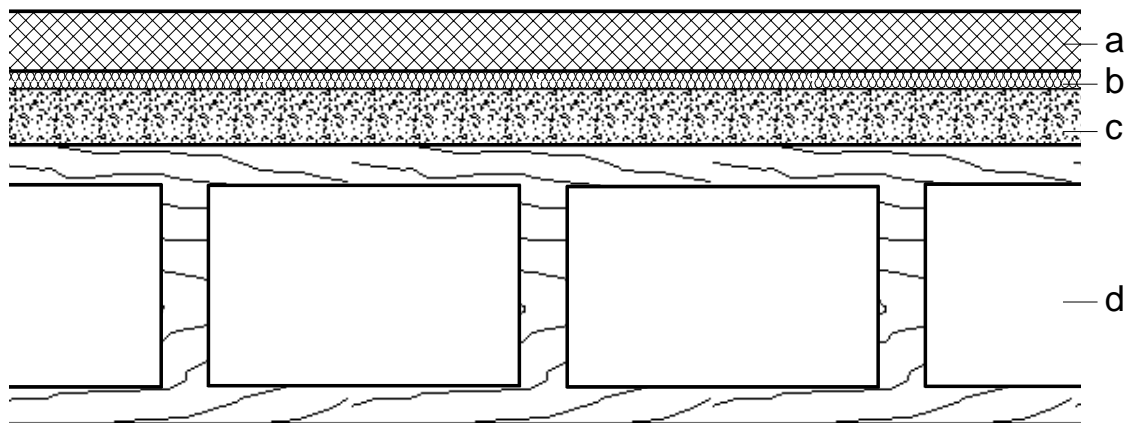
Bei der Entwicklung des Berechnungsmodells wurden die nachfolgenden Annahmen getroffen:

- die oben verlegten Holzspan- oder MDF-Platten sind kraftschlüssig mit den Holzbalken verbunden (geklebt oder geschraubt im Achsabstand von max. 300 mm);
- die abgehängte Deckenverkleidung ist über Federschienensysteme oder Federbügel elastisch an den Holzbalken befestigt;
- der Hohlraum oberhalb der Deckenverkleidung ist zu mind. 2/3 seiner Höhe mit Dämmstoff gefüllt (Steinwolle oder Glaswolle oder ausgeflockt);
- die Trittschallübertragung findet zur Hauptsache über die Geschossdecke statt (Nebenwegübertragung ist untergeordnet).

3. Berechnungsbeispiele

Zur Veranschaulichung des im vorigen Abschnitts vorgestellten Berechnungsmodells werden im Folgenden einige Beispiele von gängigen Geschossdeckenkonstruktionen durchgerechnet und mit Messwerten verglichen:

Beispiel 1: Geschossdecke aus Hohlkastenelementen



Schnitt

- a) 65 mm dicker Zementunterlagsboden: $m_{b1} = 150 \text{ kg/m}^2$
- b) 2 x 15 mm dicke Mineralfaserplatten: $s_b = 9,5 \text{ MN/m}^3$
- c) 40 mm dicke Sandschüttung: $m = 60 \text{ kg/m}^2$
- d) 180 mm dickes Hohlkastenelement aus Holz: $m = 45 \text{ kg/m}^2$;
daraus errechnet sich $m_{b2} = 105 \text{ kg/m}^2$

Für die Berechnung der Gehgeräuschepegel L_G und der Normtrittschallpegel L_n sind im vorliegenden Fall für die übrigen Grössen zu setzen:

$$\rho = \rho_o (490 \text{ kg/m}^3); e = 0,65 \text{ m}$$

$$H = H_o (0,20 \text{ m}); m_{d1} = 0,01 \text{ kg/m}^2$$

$$B = B_o (0,12 \text{ m}); m_{d2} = m_{b2} = 105 \text{ kg/m}^2$$

$$c = c_o (2500 \text{ m/s}); s_d = 10^5 \text{ MN/m}^3$$

Bemerkung zu m_{d1} und s_d : Da keine Deckenverkleidung vorhanden ist, sind diese beiden Grössen so zu wählen, dass die daraus resultierende Eigenfrequenz f_{od} weit oberhalb dem betrachteten Frequenzbereich liegt.

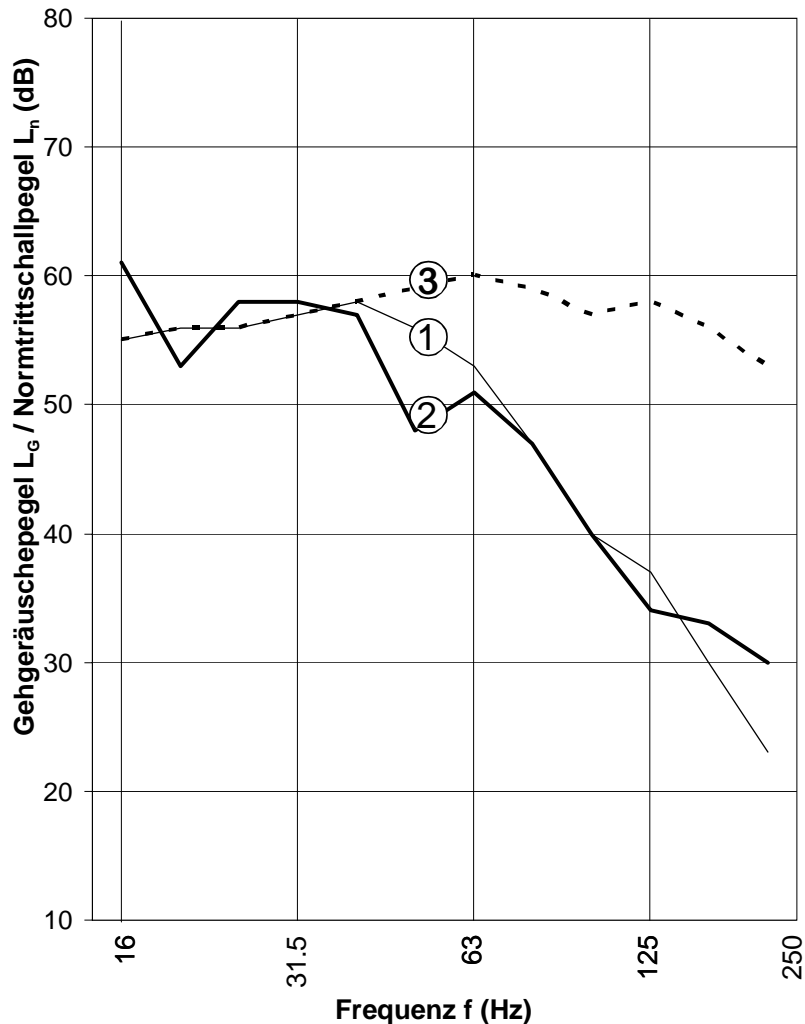
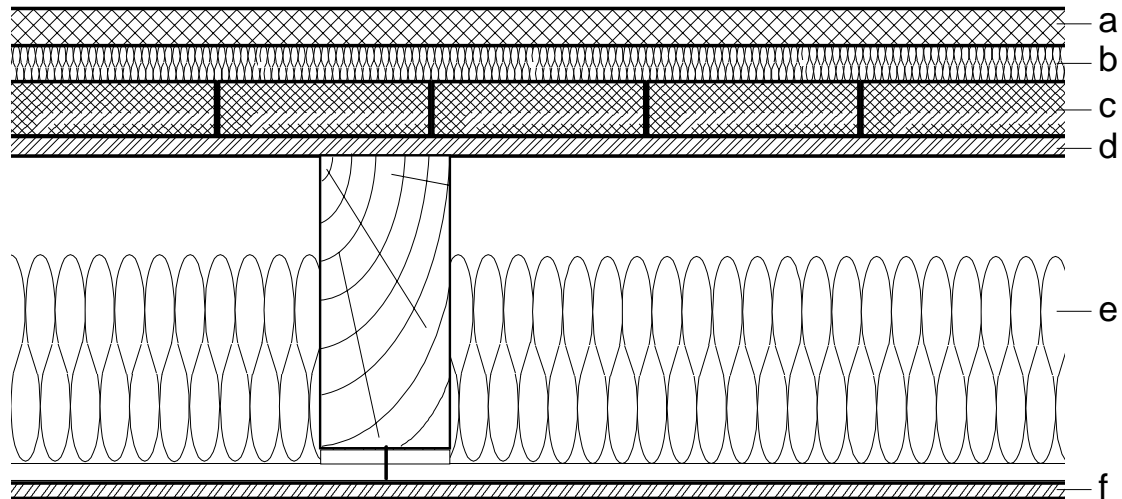


Diagramm 2: Darstellung des Gehgeräuschepegels L_G und des Normtrittschallpegels L_n

- Kurve 1: Gehgeräuschepegel bei normalem Gehen ohne Schuhe (gerechnet); bewerteter Gehgeräuschepegel $L_{Gr} = 32 \text{ dB(A)}$ (nach DIN 45680)
- Kurve 2: Gehgeräuschepegel bei normalem Gehen ohne Schuhe (gemessen); bewerteter Gehgeräuschepegel $L_{Gr} = 33 \text{ dB(A)}$ (nach DIN 45680)
- Kurve 3: Normtrittschallpegel bei Anregung mit Hammerwerk (gerechnet); bewerteter Normtrittschallpegel $L_{n,w} = 48 \text{ dB}$; Spektrumanpassungswerte $C_{1100-2500} = -1 \text{ dB}$, $C_{150-2500} = 3 \text{ dB}$

Beispiel 2: konventionelle Holzbalkendecke



Schnitt

- a) Estrichziegel auf Dämmschicht verlegt: $m_{b1} = 38 \text{ kg/m}^2$
- b) Dämmschicht aus 32/30 mm dicken Weichfaserplatten Pavapor: $s_b = 30 \text{ MN/m}^3$
- c) Lehmsteine lose verlegt: $m = 97 \text{ kg/m}^2$
- d) 22 mm dicke Holzspanplatten: $m = 15 \text{ kg/m}^2$; daraus errechnet sich $m_{b2} = 112 \text{ kg/m}^2$
- e) Holzbalken mit einem Querschnitt $H \cdot B = 22 \text{ cm} \cdot 10 \text{ cm}$;
Hohlraum zum Teil mit Dämmmaterial gefüllt: $s_d = 0,8 \text{ MN/m}^3$
- f) Deckenverkleidung aus Gipsfaserplatten über Lattenrost mittels Federbügel abgehängt:
 $m_{d1} = 15 \text{ kg/m}^2$ (**Bemerkung:** $m_{d2} = m_{b2}$)

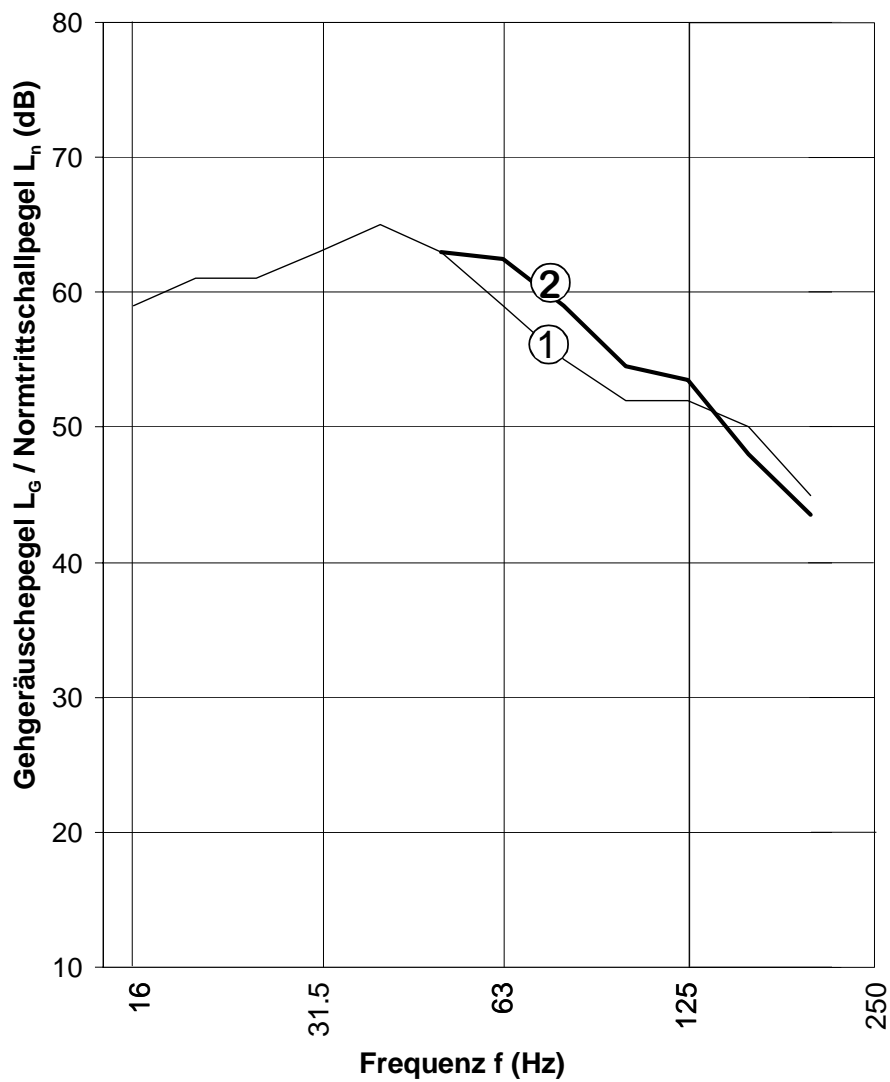


Diagramm 3: Darstellung des Normtrittschallpegels L_n

Kurve 1: Normtrittschallpegel bei Anregung mit Hammerwerk (gerechnet); bewerteter Normtrittschallpegel $L_{n,w} = 42$ dB; $C_{1100-2500} = -1$ dB, $C_{150-2500} = 8$ dB

Kurve 2: Normtrittschallpegel bei Anregung mit Hammerwerk (gemessen); bewerteter Normtrittschallpegel $L_{n,w} = 40$ dB; $C_{1100-2500} = 2$ dB

Beispiel 3: konventionelle Holzbalkendecke

(Aufbau von oben nach unten)

- 50 mm dicker anhydritgebundener Unterlagsboden: $m_{b1} = 118 \text{ kg/m}^2$
- 30 mm dicke Glaswolleplatten: $s_b = 8,7 \text{ MN/m}^3$
- 25 mm dicke Holzspanplatten mit Holzbalken verschraubt: $m_{b2} = 15,5 \text{ kg/m}^2$
- Holzbalken mit einem Querschnitt $H \cdot B = 0,12 \text{ m} \cdot 0,20 \text{ m}$, Achsabstand $e = 0,60 \text{ m}$; Hohlräume dazwischen mit 50 mm dicken Glaswolleplatten versehen: $s_d = 0,65 \text{ MN/m}^3$
- Deckenverkleidung aus 12,5 mm dicken Gipskartonplatten über Metallrost elastisch von Holzbalken abgehängt: $m_{d1} = 11,5 \text{ kg/m}^2$ (**Bemerkung:** $m_{d2} = m_{b2}$)

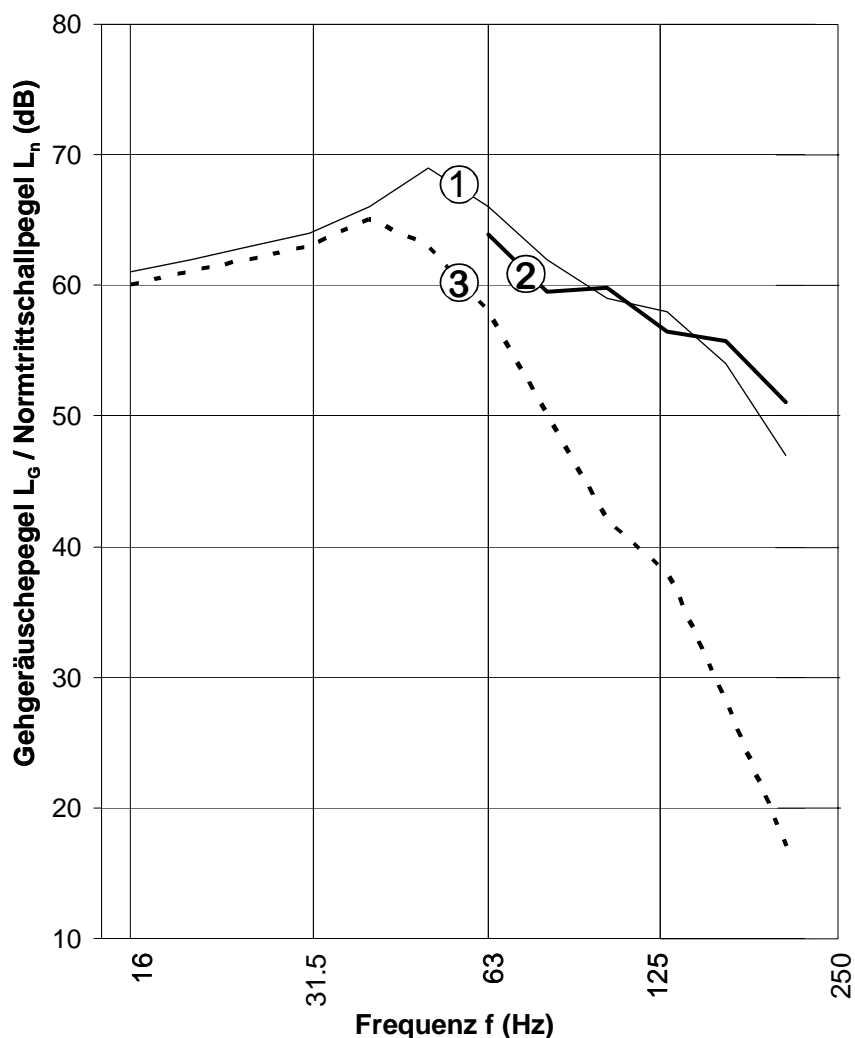
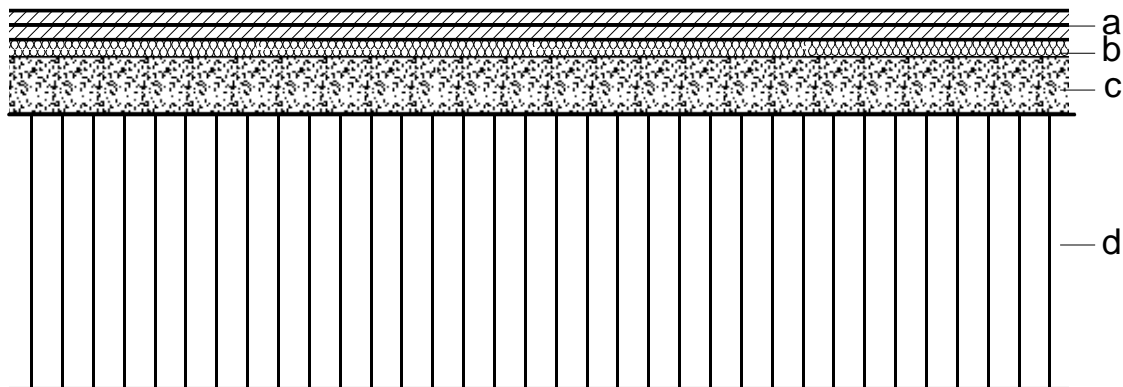


Diagramm 4: Darstellung des Normtrittschallpegels L_n und des Gehgeräuschepegels L_G

- Kurve 1: Normtrittschallpegel bei Anregung mit Hammerwerk (gerechnet); bewerteter Normtrittschallpegel $L_{n,w} = 47$ dB; Spektrumanpassungswerte $C_{1100-2500} = 0$ dB, $C_{150-2500} = 9$ dB
- Kurve 2: Normtrittschallpegel bei Anregung mit Hammerwerk (gemessen); bewerteter Normtrittschallpegel $L_{n,w} = 46$ dB; Spektrumanpassungswert $C_{1100-2500} = 2$ dB
- Kurve 3: Gehgeräuschepegel bei normalem Gehen ohne Schuhe (gerechnet); bewerteter Gehgeräuschepegel $L_{Gr} = 37$ dB(A)(nach DIN 45680)

Beispiel 4: Brettstapeldecke mit variabler Beschwerung



Schnitt

- a) Fussboden aus 2 x 15 mm dicken Gipsfaserplatten: $m_{b1} = 35$ kg/m²
- b) Dämmschicht aus 25 mm dicken Glaswolleplatten: $s_b = 10,5$ MN/m³
- c) Sandschüttung mit variabler Dicke (Dichte: 1500 kg/m³)
- d) 160 mm dicke Brettstapeldecke: $m = 75$ kg/m²

Die trittschalltechnisch interessierenden Grössen errechnen sich zu:

Dicke/Masse der Sandschüttung	m_{b2}	Normtrittschallpegel $L_{n,w}$ nach EN ISO 717	Spektrumanpassungswert		Gehgeräuschepegel* L_{Gr}
			$C_{1100-2500}$ nach EN ISO 717	$C_{150-2500}$	
keine	75 kg/m ²	61 dB	- 1 dB	0 dB	40 dB(A)
25 mm/38 kg/m ²	113 kg/m ²	58 dB	- 1 dB	1 dB	38 dB(A)
50 mm/75 kg/m ²	150 kg/m ²	56 dB	- 1 dB	1 dB	36 dB(A)
80 mm/120 kg/m ²	195 kg/m ²	54 dB	- 1 dB	1 dB	34 dB(A)
100 mm/150 kg/m ²	225 kg/m ²	53 dB	- 1 dB	1 dB	33 dB(A)

(*berechnet gemäss DIN 45680: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuscheinmissionen in der Nachbarschaft)

Unterägeri, im Februar 2004