



*Matthias Schmid
Dipl. Ing. FH/DEA Master
Wissenschaftlicher Mitarbeiter F+E
Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Biel/Bienne, Schweiz*

Bauakustische Prognoseverfahren im Vergleich

Vom Masse- zum Energiegesetz

Ausgangslage

Nach den EG-Bauproduktgerichtlinien stellt der Schallschutz eine von sechs der wesentlichen Anforderungen an Bauwerke dar [1]. Das im Grundlagendokument "Schallschutz" [2] enthaltene Pflichtenheft bestimmt die folgenden akustischen Eigenschaften für die Normenumsetzung:

- Direkte Luftschalldämmung
- Flanken-Schalldämmung
- Direkte Übertragung von Trittschall
- Flankenübertragung von Trittschall
- Trittschallminderung
- Schallabsorption verschiedener Produkte
- Geräuscheverhalten von Armaturen und Geräten der Wasserinstallation
- Geräuscheverhalten von Produkten der Abwasserinstallation
- Schalleistungspegel fest eingebauter Ausrüstungen (auch Körperschall-Emissionspegel).

Neben den schalltechnischen Grössen, die den Schallschutz von Bauwerken beschreiben, ist im Grundlagendokument "Schallschutz" [2] festgelegt, dass die einzelnen Übertragungsarten durch Einzahlangaben zu beschreiben sind. Die zahlenmässige Höhe von schalltechnischen Anforderungen in den einzelnen Schutzbereichen verbleibt in nationaler Verantwortung. Es wird folglich in Europa kein einheitliches Schallschutzniveau geben, sondern es wird lediglich angestrebt, die Mess- und Kennzeichnungsverfahren sowie die Nachweisverfahren auf einheitlicher Grundlage vorzunehmen. Da schalltechnische Anforderungen für die verschiedenen Übertragungsarten an fertige Gebäude gestellt sind, die sich aus einzelnen handelbaren Bauprodukten zusammensetzen, muss zum Nachweis der Erfüllung der Anforderungen eine Verbindung zwischen den Bauteil- und den Gebäudeeigenschaften hergestellt werden. Nach dem Grundlagendokument "Schallschutz" [2] kann dieser Nachweis grundsätzlich auf drei Arten erfolgen:

- **Mess- und Prüfverfahren** zur Ermittlung der schalltechnischen Eigenschaften von Bauteilen, aber auch kompletter Gebäude.
- **Bewertungsverfahren**, mit denen die messtechnisch ermittelten Eigenschaften von Bauteilen und Gebäuden durch einen einzigen Wert (Einzahlwert) charakterisiert werden können.
- **Berechnungsverfahren**, mit deren Hilfe die bauakustische Qualität eines Gebäudes, z.B. im Rahmen der Prognose oder eines Nachweisverfahrens, rechnerisch ermittelt werden kann.

Der Nachweis der "Wesentlichen Anforderung, Schallschutz" [2] ist nach jeder dieser Methoden zulässig, wobei keine Hemmnisse für den Einsatz von Produkten geschaffen werden dürfen, wenn diese den einschlägigen harmonisierten Normen und Zulassungen entsprechen. Im folgenden Beitrag werden diejenigen Berechnungsverfahren erläutert, welche sich in der Praxis als nützlich herausgestellt haben.

Bestimmung der Schalldurchlässigkeit

Die bekannten Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Schalldurchlässigkeit von Bauteilen beruhen grundsätzlich auf zwei unterschiedlichen Ansätzen. Es kann hierzu zwischen dem mathematisch leicht modellierbaren unendlichen Bauteil und dem realistischeren endlichen Bauteil differenziert werden. Die grundlegende Berechnung für ein unendliches Bauteil basiert dabei auf dem Massegesetz und dem Koinzidenzeffekt. Ein Bauteil mit realen Abmessungen unterliegt allerdings weiteren Effekten und Einflüssen.

Es ist festzustellen, dass in Abhängigkeit des Aufwands die Schalldämmung von Bauteilen mathematisch modellierbar ist. Allerdings kann die analytische Berechnung der Schalldämmung eine Messung nicht vollständig ersetzen. Die Modellierung erleichtert jedoch die Interpretation der Messungen.

Das Massegesetz

Anfang des letzten Jahrhunderts wurden bereits erste Bestrebungen unternommen, um die Schalldurchlässigkeit von Bauteilen wissenschaftlich exakt zu bestimmen. So hat R. Berger [6] in seiner Dissertation unterschiedliche Werkstoffe auf ihr Schalldämmvermögen experimentell untersucht. Dabei wurde das Material als homogen betrachtet. Die Gegenüberstellung zur Theorie zeigt auf, dass die Schalldurchlässigkeit in erster Linie eine Funktion des Flächengewichtes ist (Berger'sches Massegesetz).

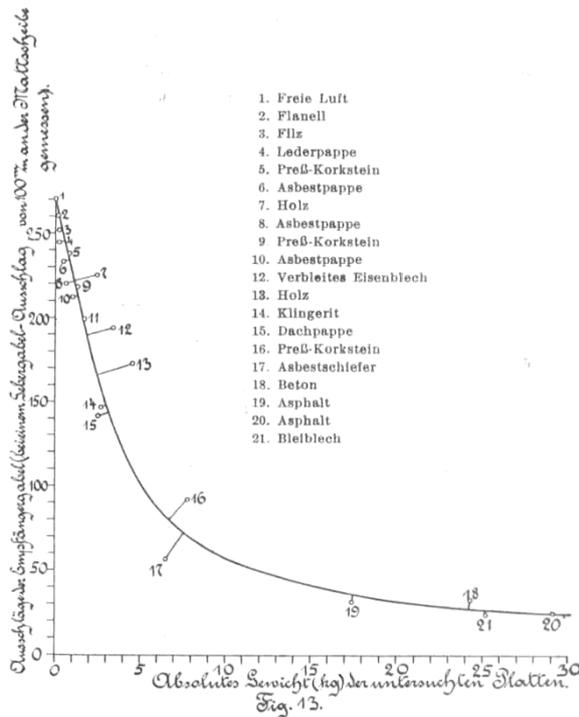


Diagramm 1:
Abhängigkeit der Ausschläge der Empfängergabel zum Flächengewicht m' [6].

Weitere wertvolle Ansätze zur Bestimmung der Schalldämmung liefern die Untersuchungen von K. Gösele [8]. Er vergleicht die Theorie mit praktisch ausgeführten, einschaligen Wänden und Decken und stellt den Zusammenhang des mittleren Schalldämm-Masses und dem Flächengewicht dar. Dabei dienen die theoretischen Arbeiten von Cremer und Heckl [7] als Grundlage der experimentellen Untersuchungen. Somit konnte auch Gösele den Zusammenhang des Flächengewichtes und der Schalldurchlässigkeit bestätigen. Zur Untersuchung wurden auch hier homogene Materialien eingesetzt.

Der grundsätzliche Verlauf der Schalldämmung einer homogenen Platte ist in Diagramm 2 dargestellt. Es sind dabei drei Bereiche A, B und C zu unterscheiden: Der Bereich A entspricht der reinen Massenhemmung; er lässt sich durch eine mit 6 dB je Oktave ansteigende Gerade

annehmen. Mit höher werdender Frequenz folgt ein Übergangsgebiet B. Danach erfolgt wiederum ein geradliniger Anstieg des Dämm-Masses, Bereich C.

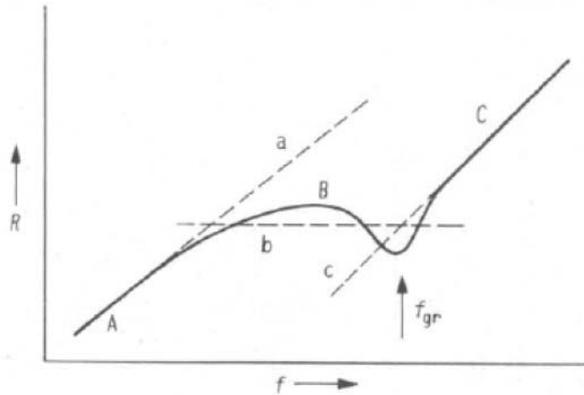


Diagramm 2:
Verlauf der Schalldämmung einer homogenen Platte (schematisch), Annäherung des Verlaufs durch die Geraden a, b und c. f_{gr} beschreibt die Grenzfrequenz [7].

Die Übereinstimmung zwischen gerechneter Kurve und den Messwerten wird in diesen Untersuchungen als befriedigend eingestuft. Die sogenannte ‚Gewichtskurve‘ wird auch in der aktuellen Norm SIA 181 ‚Schallschutz im Hochbau‘ als Basis zur Prognose des Dämm-Masses von Bauteilen herangezogen [3].

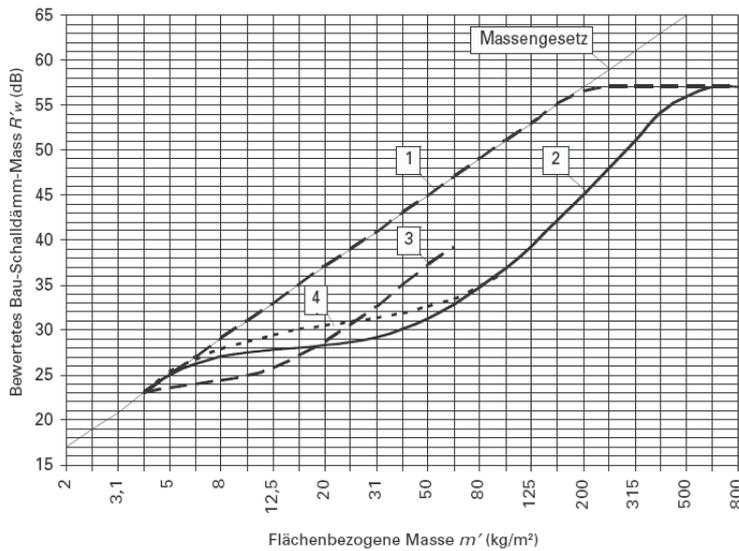


Diagramm 3:
Abhängigkeit des mittleren Schalldämm-Masses R_w vom Flächengewicht m' [3].

Kurve 1: sogenanntes «Massengesetz»; gültig unterhalb der Grenzfrequenz bis $m' \approx 200 \text{ kg/m}^2$, z.B. für dünne Bleche
 $R_w = 20 M + 11$

Kurve 2: «Gösele-Kurve», gültig für Beton, Mauerwerk und Gips bis $m' \approx 500 \text{ kg/m}^2$
 $R_w = -15 + 118 M - 119 M^2 + 50,6 M^3 - 7,06 M^4$

Kurve 3: «Lauber-Kurve», gültig für Holz und Holzwerkstoffe bis $m' \approx 65 \text{ kg/m}^2$
 $R_w = -2,8 + 105 M - 155 M^2 + 98,7 M^3 - 21 M^4$

Kurve 4: «Lauber-Kurve», gültig für Glasscheiben bis $m' \approx 100 \text{ kg/m}^2$
 $R_w = 9,2 + 30 M - 6,2 M^2 - 7,6 M^3 + 3,3 M^4$

$M = \lg(m')$
 m' flächenbezogene Masse in kg/m^2

In vielen Fällen wächst die Schalldämmung eines Bauteils mit der Grösse $20 \lg(f \cdot m')$ bei sonst konstanten Materialeigenschaften einschaliger Bauteile, wobei f die Frequenz (Hz) und m' die Flächenmasse (kg/m^2) bedeuten. Somit nimmt die Schalldämmung mit steigender Frequenz zu, wobei schwere Bauteile den Schall besser dämmen als leichte. Diese allgemeine

Regel – das «Massengesetz der Bauakustik» – kann sich aber in einzelnen Frequenzbändern durch Spuranpassungseffekte bzw. «Dickenresonanzen» massiv verschlechtern.

Zweischalige Bauteile mit weicher Dämmschicht dämmen in der Regel bei gleicher flächenbezogener Masse besser als einschalige. Je nach Frequenz treten jedoch starke Abweichungen von dieser Regel durch Spuranpassungs- und auch Resonanzeffekte auf.

Die Schallübertragung über flankierende Bauteile führt häufig zu einer Reduktion der Dämmung gegenüber den Labordaten aus Prüfständen mit unterdrückter Flankenübertragung. Je besser die Schalldämmung eines Bauteils ist, desto bedeutender werden die Flankenübertragungen. Diese können normalerweise nicht oder nur ungenügend genau aus Bauteilkatalogen entnommen werden

Das Energiegesetz (Statistical Energy Analysis)

In der Praxis besteht oft die Anforderung, die Schalldämmung komplexer Strukturen, wie z.B. eines gesamten Gebäudes, bereits in der Planungsphase zu prognostizieren. Die analytische Lösung dieses Problems scheitert jedoch, weil zum einen der Rechenaufwand nicht zu bewältigen ist und zum anderen konstruktive Details, etwa die notwendigen Materialdaten, nicht bekannt sind. Daher wurden in den letzten Jahren Berechnungsmethoden entwickelt, die auf der Grundlage von nur wenigen Daten die Vorhersage des akustischen Bauteilverhaltens ermöglicht.

Diese Modelle werden als SEA-Berechnungen (Statistische Energie Analyse) bezeichnet. Die Bezeichnung „statistisch“ wurde gewählt, weil die verwendeten Größen auf gemittelten Angaben beruhen, der Begriff „Energie“ wird verwendet, weil die Schallenergie die zentrale Größe der Berechnungen ist. Impulse für die Entwicklung der SEA-Methoden lieferte jedoch nicht die Bauakustik, sondern Schwingungsanalysen an Metallstrukturen in der Luft- und Raumfahrt und im Schiffbau. Erst später wurde die SEA auf die Berechnung der Schalldämmung von Gebäudebauteilen adaptiert.

Grundlage der SEA-Berechnungen ist, dass eine komplexe Struktur in Subsysteme unterteilt wird, wobei üblicherweise jedes Bauteil, wie etwa eine Wand oder eine Decke aber auch der Luftinhalt eines Raumes, ein solches Subsystem bildet. Gemeinsam ist jedem Subsystem, dass die Schallenergie jeweils in den Eigenfrequenzen der Subsysteme gespeichert ist. Unerheblich ist allerdings neben der exakten Geometrie und Lage der Eigenfrequenzen, ob die Schwingungsenergie in Luft- oder Körperschall gespeichert ist. Die Gesamtenergie eines Subsystems ergibt sich dann aus dem Produkt der durchschnittlichen Energie pro Mode und der Anzahl der Moden.

In einem SEA-Modell sind die einzelnen Subsysteme durch Kopplungspfade verbunden. Über diese Kopplungen kann Energie zwischen den Subsystemen ausgetauscht werden, wobei die Kopplungsstärke den Energiefluss bestimmt.

Die Modellierung jedes Subsystems basiert auf nur vier Größen:

1. Masse des Bauteils bzw. Volumen des Raumes
2. Modale Dichte, also Dichte der Eigenfrequenzen
3. Innere Dämpfung des Subsystems
4. Äußere energetische Kopplungspfade (Kopplungs-Verlustfaktoren)

Die Schwierigkeit der Anwendung der SEA liegt in der Bestimmung der Kopplungsstärke zwischen den Subsystemen, welche durch rechnerische Bestimmung ermittelt oder am realen Bauteil gemessen werden kann. Da diese vereinfachten Berechnungsverfahren auf Mittelwerten beruhen und die Modelle stark vereinfacht sind, kann nicht die Genauigkeit von akustischen Präzisionsmessverfahren erwartet werden. Allerdings besteht ein kommerzielles Interesse an der Anwendung dieser Verfahren, so dass die laufende Weiterentwicklung der meist in Software umgesetzten Lösungen genauere Ergebnisse erwarten lässt (z.B. AutoSEA2).

Berechnungsmodelle der bauakustischen Eigenschaften

Die bekannten Prognoseverfahren zur Bestimmung der bauakustischen Eigenschaften beruhen auf den vorher genannten Prinzipien. Sämtliche Bemessungsmodelle haben dabei die Absicht, die Qualität der Schalldämmung für eine bestimmte Bauteilsituation so genau wie möglich zu quantifizieren. Nachfolgend werden die relevanten Modelle exemplarisch für die Situation der Luftschall- und Trittschallübertragung im Innen- bzw. Aussenbereich aufgezeigt.

SIA 181 - Schallschutz im Hochbau

Gemäss aktueller Norm SIA 181 [3] können die Prognosen für den Schallschutz am Bau folgendermassen erbracht werden:

- Durch eigene Mittel (einfache numerische Rechenverfahren; Erfahrung),
- durch Berechnung mit Verfahren gemäss den Normen EN 12354-1 bis 3 unter Berücksichtigung der Schallnebenwegübertragungen (siehe Anhang F SIA 181).

Folgende Erläuterungen sind dazu zu finden:

Ziffer 4.1.1.2

Prognosewerte im Sinne von bewerteten Einzahl-Kennwerten sollen einen angemessenen Projektierungszuschlag K_P in dB bzw. dB(A) aufweisen, damit die Einhaltung der Anforderungen unter Berücksichtigung z.B. abweichender Abmessungen gegenüber Laborprüfkörpern, üblicher Bauimperfektionen und Alterungseffekten auch bei Kontrollmessungen am Bau mit hoher Wahrscheinlichkeit erreichbar ist. Die gewählten Projektierungszuschläge sind zahlenmässig auszuweisen.

Ziffer 4.1.1.3

Planmässige Schallnebenwegübertragungen (Flankenübertragungen) sind in den Prognosewerten zusätzlich zum Projektierungszuschlag zu berücksichtigen. Das geschieht für den Luft- bzw. Trittschallschutz entweder durch Anwendung der Prognoseverfahren nach der Normenreihe EN 12354 oder aber durch Abschätzung nach Erfahrung aus dem Vergleich zwischen Labor-Messergebnissen und Ergebnissen aus Messungen am Bau für gleichartige Bauteile mit vergleichbaren Einbaubedingungen. Zur Prognose der Bauteilkennwerte für die Bausituation sind bei einer Abschätzung jeweils ausreichende Ab- bzw. Zuschläge K_F für Flankenübertragungen am Bau vorzusehen. Spektrum-Anpassungswerte und allfällige Volumenkorrekturen sind zusätzlich zu berücksichtigen.

Prognose für Luftschall

Der Prognosewert zum bewerten Bau-Schalldämm-Mass wird wie folgt bestimmt

$$R'_w = R_w - K_F$$

Gleichung 1

R_w bewertetes Schalldämm-Mass des im Labor mit unterdrückter Flankenübertragung gemessenen Bauteils

K_F der Korrekturwert K_F beinhaltet einerseits die Schalllängsleitung (nach [14] K), doch massgebend die Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{nf,w}$ der angrenzenden Bauteile und der gemeinsamen Kopplungslänge l_f der Bauteile in Bezug zur Laborprüfung.

Daraus kann die bewerte Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ ermittelt werden

$$D_{nT,w} = R'_w + 10 \lg(V/S) - 4,9 \quad \text{Gleichung 2}$$

oder

$$D_{nT,w} \approx R'_w + \Delta L_{LS}$$

Dabei kann ΔL_{LS} für $D_{nT,w}$ auch aus den entsprechenden Tabellen abgeleitet werden:

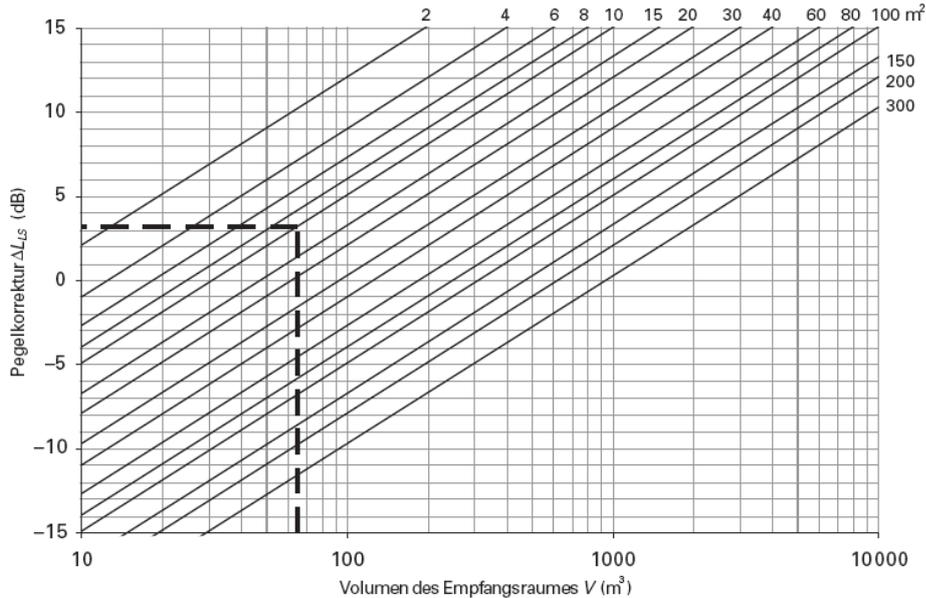


Diagramm 4:
Ermittlung der Pegelkorrektur ΔL_{LS} [3].

Prognosewert für Luftschall externer Quellen

$$D_{e,d} = D_{e,tot} - K_P = D_{nT,w} + C_{tr} - C_V - K_P \quad \text{Gleichung 3}$$

Daraus lässt sich das erforderliche Bauschalldämm-Mass berechnen:

$$(R'_w + C_{tr}) \geq D_e - \Delta L_{LS} + C_V + K_P \quad \text{Gleichung 4}$$

D_e gemäss Tabelle 3 SIA 181-2006

Prognosewert für Luftschall interner Quellen

$$D_{i,d} = D_{i,tot} - K_P = D_{nT,w} + C - C_V - K_P \quad \text{Gleichung 5}$$

Daraus lässt sich das erforderliche Bauschalldämm-Mass berechnen:

$$(R'_w + C) \geq D_i - \Delta L_{LS} + C_V + K_P \quad \text{Gleichung 6}$$

D_i gemäss Tabelle 4 SIA 181-2006

Der so für ein Bauteil berechnete maximal zulässige Bauschalldämm-Mass ($R'_w + C$) kann nun mit den Werten aus Tabellen verglichen werden (z.B. [4] und [15]). Zulässig sind alle Konstruktionen, deren ($R'_w + C$) grösser ist als der berechnete maximal zulässige Wert von ($R'_w + C$).

Vorgehen für die Planung des Luftschalls von innen ¹	Grössen	Angaben
1. Lärmempfindlichkeit des Empfangsraums definieren	<i>gering</i> <i>mittel</i> <i>hoch</i>	SIA 181 - Tabelle 1
2. Lärmbelastung des Senderraums definieren	<i>klein</i> <i>mässig</i> <i>stark</i> <i>sehr stark</i>	SIA 181 - Tabelle 4
3. Bestimmung des Anforderungswertes für Luftschall	D_i	SIA 181 - Tabelle 4
4. Bestimmung des Raumvolumens und der gemeinsamen Trennfläche aus der vorliegenden Raumsituation	V S	Pläne und Grundrisse
5. Bestimmung der notwendigen Korrekturen	ΔL_{LS} C_V K_P	SIA 181 - Figur 10 SIA 181 - Tabelle 2 Projektierungszuschlag
6. Berechnen des korrigierten maximal erforderlichen Bauschalldämm-Mass	$R'_w + C$	Gleichung 6
7. Der korrigierte Bauschalldämm-Mass $R'_w + C$ des Bauteils muss grösser sein als der Wert nach Punkt 6 (Achtung: Berücksichtigung der Flächen)	$R'_w + C$	Herstellerangaben
<p>Man merke sich: Die Belästigung ist umso kleiner, je höher die Schallpegeldifferenz ist (im Gegensatz zum Trittschall).</p>		

¹ Das Vorgehen kann entsprechend auch für den Luftschall von aussen angewendet werden.

Prognose für Trittschall

Der Prognosewert zum bewerten Norm-Trittschallpegel wird wie folgt bestimmt

$$L'_{n,w} = L_{n,w} + K_F \quad \text{Gleichung 7}$$

$L_{n,w}$ bewerteter Norm-Trittschallpegel des im Labor mit unterdrückter Flankenübertragung gemessenen Deckenbauteils

K_F der Korrekturwert K_F beinhaltet die massgebenden Flankenübertragungen D_f und D_{f1} (nach [14] $K1$ und $K2$)

Daraus kann die bewerte Standard-Schallpegeldifferenz $L'_{nT,w}$ ermittelt werden

$$L'_{nT,w} = L'_{n,w} + 10 \lg(V) + 14,9 \quad \text{Gleichung 8}$$

oder

$$L'_{nT,w} \approx L'_{n,w} + \Delta L_{TS}$$

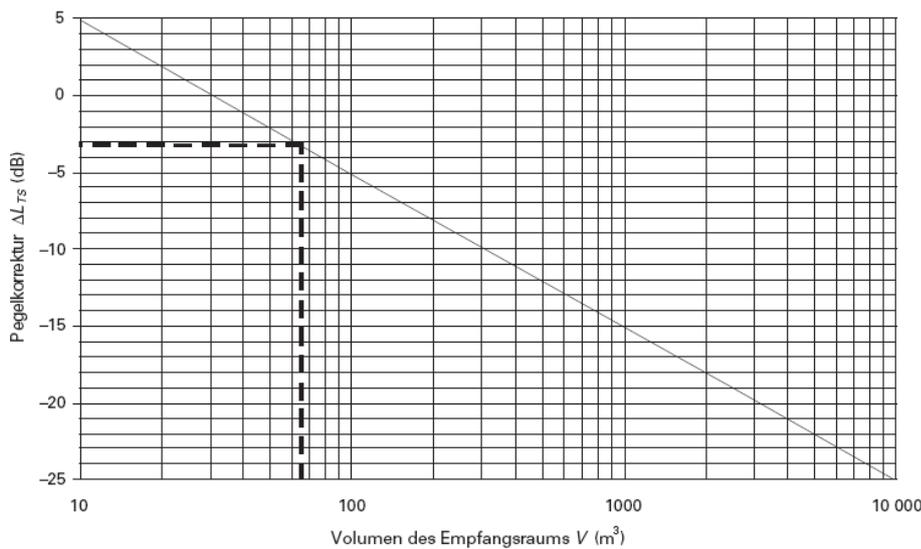


Diagramm 5:
Ermittlung der Pegelkorrektur ΔL_{TS} [3].

Prognosewert für Trittschall

$$L'_d = L'_{tot} + K_P = L'_{nT,w} + C_I + C_V + K_P \quad \text{Gleichung 9}$$

Daraus lässt sich der erforderliche Normtrittschallpegel berechnen:

$$(L'_{n,w} + C_I) \leq L' - \Delta L_{TS} - C_V - K_P \quad \text{Gleichung 10}$$

L' gemäss Tabelle 5 SIA 181-2006

Der so für ein Bauteil berechnete maximal zulässige Normtrittschallpegel ($L'_{n,w} + C_I$) kann nun mit den Werten aus Tabellen verglichen werden. Zulässig sind alle Konstruktionen, deren ($L'_{n,w} + C_I$) kleiner ist als der berechnete maximal zulässige Wert von ($L'_{n,w} + C_I$).

Vorgehen für die Planung des Trittschalls	Grössen	Angaben
1. Lärmempfindlichkeit des Empfangsraums definieren	<i>gering</i> <i>mittel</i> <i>hoch</i>	SIA 181 - Tabelle 1
2. Lärmbelastung des Senderraums definieren	<i>klein</i> <i>mässig</i> <i>stark</i> <i>sehr stark</i>	SIA 181 - Tabelle 5
3. Bestimmung des Anforderungswertes für Trittschall	L'	SIA 181 - Tabelle 5
4. Bestimmung der notwendigen Korrekturen aus dem vorliegenden Raumvolumen	ΔL_{TS} C_V K_P	SIA 181 - Figur 12 SIA 181 - Tabelle 2 Projektierungszuschlag
5. Berechnen des korrigierten maximal zulässigen Normtrittschallpegels	$L'_{n,w}+C_I$	Gleichung 10
6. Der korrigierte Normtrittschallpegel $L'_{n,w}+C_I$ des Bauteils muss kleiner sein als der Wert nach Punkt 5	$L'_{n,w}+C_I$	Herstellerangaben
<p>Man merke sich: Die Belästigung ist umso kleiner, je niedriger der Trittschallpegel ist (im Gegensatz zur Luftschalldämmung).</p>		

EN 12354 Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften

Die Rechenverfahren folgen im Wesentlichen den physikalisch nachvollziehbaren Gegebenheiten. Das Grundprinzip ist einfach: Berücksichtigt werden alle Schallübertragungswege, deren einzelne Beiträge zur gesamten Schallübertragung aufsummiert werden. Jeder Weg kann unabhängig von den anderen Wegen behandelt und berechnet werden. Besondere Beachtung wird der flankierenden Übertragung beigemessen. Bei der üblichen Übertragungssituation (1 Trennbauteil, vier flankierende Bauteile) sind insgesamt 13 verschiedene Übertragungswege zu berücksichtigen.

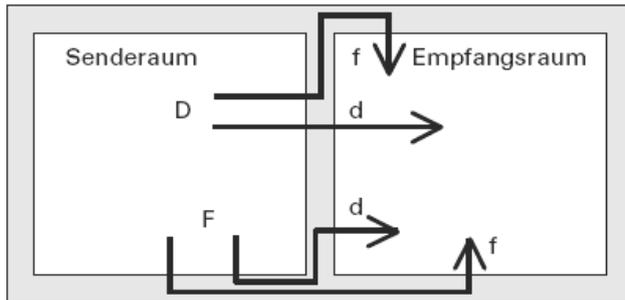


Abbildung 1:
Schall-Übertragungswege gemäss DIN 12354

Davon entfallen 12 Wege auf die flankierende Übertragung. Für jeden dieser Übertragungswege kann ein eigenes Schalldämm-Maß ermittelt werden. Die resultierende Schalldämmung R'_w unter Berücksichtigung aller flankierenden Wege ergibt sich dann durch „energetische“ Addition der einzelnen Schalldämm-Maße.

Insgesamt setzt sich die EN 12354 [5] aus folgenden Teilen zusammen:

- Teil 1 Luftschalldämmung zwischen Räumen
- Teil 2 Trittschalldämmung zwischen Räumen
- Teil 3 Luftschalldämmung gegen Aussen
- Teil 4 Schallübertragung von Räumen ins Freie
- Teil 5 Schallpegel von haustechnischen Anlagen und Installationen in Räumen
- Teil 6 Nachhallzeit in Räumen.

Es ist klar, dass diese Berechnung nicht von Hand sondern mit Hilfe geeigneter Berechnungsprogramme durchgeführt wird. Der befürchtete zusätzliche Aufwand gegenüber der derzeitigen Nachweismethode kann dadurch drastisch gesenkt werden. Vor allem aber muss auf einen wesentlichen Vorteil hingewiesen werden, der sich durch den vorliegenden Berechnungsansatz ergibt: Der Anteil jedes Übertragungsweges an der Gesamt-Schalldämmung kann einzeln betrachtet werden und bezüglich seines Einflusses auf das Endresultat beurteilt werden. Im Einzelfall kann, falls der Bedarf nach detaillierterer Betrachtung existiert, durch Variation der konstruktiven Eigenschaften die Auswirkung von Alternativlösungen auf den zu planenden Schallschutz ermittelt werden.

Den physikalischen Gegebenheiten folgend werden nicht nur die Eigenschaften der einzelnen Bauteile sondern auch die akustischen Eigenschaften von Bauteilverbindungen (Stoßstellen) zur Berechnung der Schallübertragung einbezogen (Abbildung 2). Die Luftschallanregung und die Luftschallabstrahlung können durch das Schalldämm-Maß R beschrieben werden. Die Schallübertragung über die Stoßstelle hinweg wird durch das sog. Stoßstellendämm-Maß k_{ij} charakterisiert. Im Prinzip können Stoßstellen aller in der Praxis auftretenden Bauteilverbindungen in die Berechnung eingebunden werden, sofern die dafür benötigten Daten verfügbar

sind. Darüber hinaus können bei allen Bauteilen Vorsatzkonstruktionen (z.B. Vorsatzschalen vor Wänden, schwimmende Estriche auf Böden) separat berücksichtigt werden.

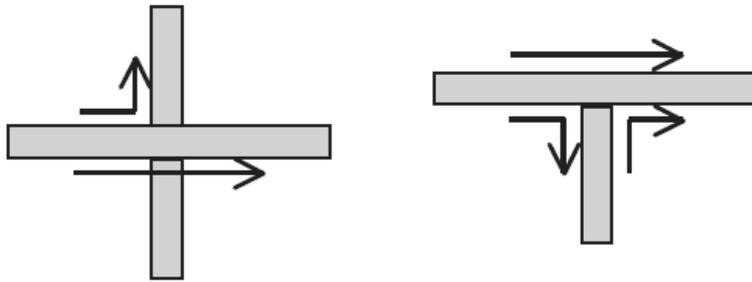


Abbildung 2: Das Stossstellen-Dämm-Mass K_{ij} hängt von der Konfiguration der Bauteile und dem Typus des Schallwegs ab: Kreuz- und T Übergang, mit unterschiedlichen Wegen

Die Rechenverfahren verwenden als Eingangsdaten diejenigen Kenngrößen, die auch in den Bauteilprüfungen nach harmonisierten Prüfverfahren ermittelt werden können. In sogenannten „Detaillierten Modellen“ wird die Rechnung frequenzabhängig durchgeführt. Benötigt werden deshalb auch frequenzabhängige Eingangsdaten. Zusätzlich zu diesen frequenzabhängigen Berechnungen gibt es sogenannte „Vereinfachte Modelle“, in denen neben weiteren Vereinfachungen die Berechnung auf Einzahlangaben basiert.

Vereinfachtes Verfahren

Luftschallübertragung zwischen Räumen

Gegenüber dem detaillierten Modell geht das vereinfachte Modell von Einzahlangaben nach EN ISO 717 [5] aus und verzichtet auf die Anpassung der Eingangsgrößen an die aktuelle Gebäudesituation mit Hilfe der Körperschall-Nachhallzeit.

$$R'_w = -10 \lg \left[10^{-R_{Dd,w}/10} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-R_{Ff,w}/10} + \sum_{f=1}^n 10^{-R_{Df,w}/10} + \sum_{F=1}^n 10^{-R_{Fd,w}/10} \right] \quad \text{Gleichung 11}$$

Für die Übertragung über das trennende Bauteil und die Flankenpfade ij gilt:

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} + \Delta R_{Dd,w} \quad \text{Gleichung 12}$$

$$R_{ij,w} = \frac{R_{i,w} + R_{j,w}}{2} + \Delta R_{ij,w} + K_{ij} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_{ij}} \quad \text{Gleichung 13}$$

Hierin bezeichnet i die sendeseitigen Bauteile F und D sowie j die empfangsseitigen Bauteile f und d . Die Gesamt-Verbesserung durch sende- und/oder empfangsseitig angebrachte Vorsatzkonstruktionen am trennenden oder an flankierenden Bauteilen $\Delta R_{ij,w}$ wird abgeschätzt zu:

$$\Delta R_{ij,w} = \left. \begin{cases} \Delta R_{i,w} \\ \Delta R_{j,w} \end{cases} \right\} \begin{array}{l} \text{bei 1-seitig angebrachter} \\ \text{Vorsatzschale} \end{array} \quad \text{Gleichung 14}$$

$$\left. \begin{cases} \max(\Delta R_{i,w}; \Delta R_{j,w}) + \frac{\min(\Delta R_{i,w}; \Delta R_{j,w})}{2} \end{cases} \right\} \begin{array}{l} \text{bei 2-seitig angebrachten} \\ \text{Vorsatzschalen} \end{array}$$

Im Fall der Frequenzabhängigkeit des Stossstellendämm-Masses K_{ij} wird empfohlen, den Wert bei 500 Hz für die Berechnung zu verwenden. Aufgrund der fehlenden Korrektur durch geometrische Parameter kann das Stossstellendämm-Mass negative Werte annehmen. Daher wird K_{ij} nach unten begrenzt:

$$K_{ij,\min} = 10 \lg \left[I_{ij} I_0 \left(\frac{1}{S_i} + \frac{1}{S_j} \right) \right] \text{dB} \quad \text{Gleichung 15}$$

Sowohl das detaillierte, als auch das vereinfachte Berechnungsmodell unterliegt folgenden Einschränkungen, beziehungsweise Voraussetzungen:

- Die Modelle können nur zur Berechnung der Schallübertragung zwischen benachbarten Räumen herangezogen werden. Berechnungen über mehrere Räume oder Geschosse hinweg führen zu fehlerhaften Ergebnissen.
- Der Beitrag der Schallabstrahlung 2. Ordnung (ausgehend vom rückwärtigen Bauteil im Empfangsraum) wird vernachlässigt. Falls alle Flankenbauteile mit wirksamen Vorsatzkonstruktionen verkleidet sind, kann die berechnete Flankenübertragung zu niedrig liegen.
- In Situationen mit grossflächigen trennenden, biegesteifen Bauteilen (vorwiegend bei Decken) und empfangsraumseitigen biegeweichen Flankenbauteilen wird die Flankenübertragung als zu hoch eingesetzt.
- Es wird angenommen, dass die Abstrahleigenschaften näherungsweise gleich für beide Seiten eines Grundbauteils sind.
- Das Modell kann nur auf Bauteilkombinationen angewendet werden, für die das Stossstellendämm-Mass bekannt ist.

Die Anwendung des vereinfachten Modells ist zudem beschränkt auf Gebäudesituationen mit ähnlichen Bauteilabmessungen wie sie bei Prüfungen in Prüfständen verwendet werden. Zudem kann sich bei Bauteilen mit stark voneinander abweichenden Verläufen des Schalldämm-Masses die Ungenauigkeit des Berechnungsergebnisses erhöhen.

Trittschallübertragung zwischen Räumen

Das vereinfachte Modell für Trittschallübertragung geht im Gegensatz dazu von den Einzangaben nach EN ISO 717 [5] aus und betrachtet nur die direkte Übertragung unter globaler Korrektur der Flankenübertragung. Der bewertete Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ berechnet sich ausgehend vom äquivalenten, bewerteten Norm-Trittschallpegel $L_{n,w,eq}$ und der bewerteten Trittschallminderung ΔL_w zu:

$$L'_{n,w} = L_{n,w,eq} - \Delta L_w + K \quad \text{Gleichung 16}$$

Die Korrekturgrösse K berücksichtigt die Trittschallübertragung über flankierende, einschalige Bauteile in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse des Trennbauteils und der mittleren, flächenbezogenen Masse der Flankenbauteile, sofern sie nicht durch Vorsatzkonstruktionen verkleidet sind. Bei der Verwendung von Vorsatzkonstruktionen mit einer Resonanzfrequenz $f_0 < 125\text{Hz}$ wird die flächenbezogene Masse des Grundbauteils bei der Berechnung der mittleren, flächenbezogenen Masse vernachlässigt. Der Korrekturwert K kann sowohl auf vertikale, als auch auf horizontale Übertragungssituationen angewendet werden [12].

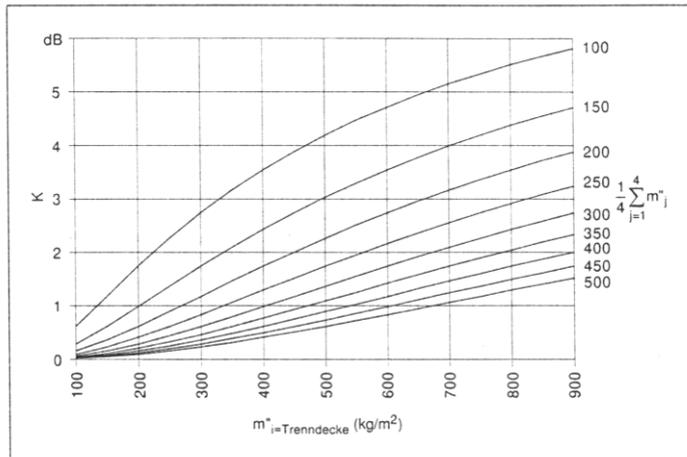


Diagramm 6: Korrekturwert K in dB für flankierende Trittschallübertragung bei übereinanderliegenden Räumen [12]

m_i^* : flächenbezogene Masse der Trenndecke
 m_j^* : mittlere, flächenbezogene Masse der einschaligen flankierenden Wände (ohne Vorsatzschalen $f_0 < 125$ Hz im Empfangsraum)

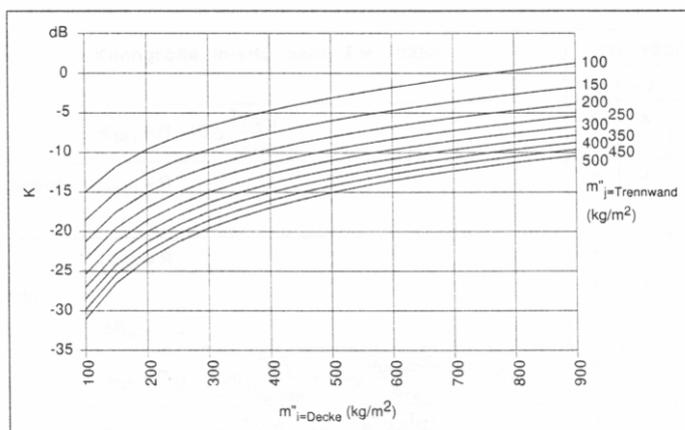


Diagramm 7: Korrekturwert K in dB für flankierende Trittschallübertragung bei nebeneinanderliegenden Räumen [12]

m_i^* : flächenbezogene Masse der Trenndecke
 m_j^* : mittlere, flächenbezogene Masse der einschaligen Trennwand (ohne Vorsatzschalen $f_0 < 125$ Hz im Empfangsraum)

Neben den schon für das Berechnungsmodell für Luftschallübertragung genannten, gelten hier zusätzlich folgende Beschränkungen:

- Die auf einer massiven Bezugsdecke gemessene Trittschallminderung ΔL nach EN ISO 140-8 [5] kann nicht in Verbindung mit Holzbalkendecken oder anderen Arten von Leichtdecken verwendet werden.
- Das vereinfachte Modell ist nur anwendbar auf einschalige Massivdecken in Verbindung mit schwimmenden Estrichen oder Bodenbelägen bei den in Wohngebäuden üblichen Raumabmessungen.

Neue DIN 4109 - Schallschutz im Hochbau

Die Harmonisierung der europäischen Normen im bauakustischen Bereich und die Einführung der EN 12354 hat zur Folge, dass die derzeitige DIN 4109 in weiten Teilen nicht kompatibel ist mit den europäischen Vorgaben. Neu werden die Eingangsgrößen nebenwegfrei und isoliert betrachtet. Die Norm wird zurzeit hinsichtlich Mess-, Bewertungs- und Berechnungsverfahren überarbeitet. Ein weiterer Aspekt für die Überarbeitung ist die mangelnde Aktualität des Bauteilkatalogs. Dies betrifft einerseits die angewandten Konstruktionen, andererseits auch die eingesetzten Werkstoffe.

Nachdem zunächst nur an eine Überarbeitung des Beiblattes 1 gedacht war, wurde letztlich eine komplette Neustrukturierung der Norm beschlossen. Hiernach soll sich die neue DIN 4109 in fünf Teile gliedern [14]:

Teil 1 Mindestanforderungen an den Schallschutz

Enthält die Definitionen der kennzeichnenden Größen für die Anforderungen an den Schallschutz in Gebäuden sowie die zahlenmäßige Festlegung der entsprechenden Mindestanforderungen;

Teil 2 Vorschläge für erhöhten Schallschutz

Definiert verschiedene Schallschutz-Klassen jenseits der Mindestanforderungen;

Teil 3 Rechnerischer Nachweis der Erfüllung der Anforderungen

Beschreibt die Durchführung des rechnerischen Nachweises im Hinblick auf die in EN 12354 enthaltenen Rahmenvorgaben und enthält erläuternde Beispiele;

Teil 4 Eingangsdaten für den rechnerischen Nachweis des Schallschutzes (Bauteilkatalog)

Enthält eine Sammlung von bauakustischen Kennwerten typischer Konstruktionen mit Hinweisen zur Herkunft der Daten und der für den rechnerischen Nachweis anzusetzenden Unsicherheit;

Teil 5 Handhabung bauakustischer Prüfungen

Gibt Durchführungshinweise sowohl für Labormessungen als auch für Baumessungen (Güteprüfungen).

Der Bauteilkatalog ist in verschiedene Bauteilbereiche (Wände, Decken, Dächer etc.) aufgeteilt, wobei Stoßstellen und flankierende Bauteile wie in der bisherigen Norm in einem getrennten Kapitel zusammengefasst sind. Die einzelnen Bauteilbereiche sind je nach Bedarf noch weiter in Bauteilklassen unterteilt, z.B. in leichte und schwere Wände. Jede Bauteilkategorie wird anhand eines einheitlich gegliederten Kapitels beschrieben, das sich in seiner Struktur an dem in der Vergangenheit erarbeiteten Neuentwurf der Tabelle 23 „Gipskarton-Ständerwände“ orientiert. Hierbei kommt zuerst ein allgemeiner Abschnitt mit der Definition der Bauteilgruppe, einer Erläuterung der die Schalldämmung beeinflussenden Größen sowie Hinweisen zur Planung und Ausführung des Bauteils hinsichtlich bauakustisch relevanter Aspekte. Danach folgen die Ausführungsbeispiele („Bemessungstabellen“) mit genauer Bauteilbeschreibung und den akustischen Kennwerten des Bauteils und zuletzt ein Abschnitt über Herkunft und Streuung der Daten.

Vorschlag eines Prognoseverfahrens für Luftschallübertragung

Das bewertete Bau-Schalldämm-Maß berechnet sich nach

$$R'_{w} = -10 \lg \left[10^{-R_{Dd,w}/10} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-R_{Ff,w}/10} \right] + K \quad (\text{dB}) \quad \text{Gleichung 17}$$

mit

$$R'_{w} = D_{n,f,w} + 10 \lg \frac{l_{lab}}{l_f} + 10 \lg \frac{S_s}{A_0} \quad (\text{dB}) \quad \text{Gleichung 18}$$

Dabei ist

- R'_{w} das bewertete Bau-Schalldämm-Maß zwischen zwei Räumen, in Dezibel;
- $R_{Dd,w}$ das bewertete Schalldämm-Maß des trennenden Bauteils, in Dezibel;
- $R_{Ff,w}$ das bewertete Flankendämm-Maß für den Übertragungsweg Ff , in Dezibel;
- $D_{n,f,w}$ die bewertete Norm-Schallpegeldifferenz eines flankierenden Bauteils, in Dezibel;
- n die Anzahl der flankierenden Bauteile in einem Raum; üblicherweise ist $n=4$, je nach Entwurf und Konstruktion kann aber n in der betreffenden Bausituation auch kleiner oder größer sein;
- l_{lab} die Bezugslänge, in Metern;
- l_f die gemeinsame Kopplungslänge der Verbindungsstelle zwischen dem trennenden Bauteil und den flankierenden Bauteilen F und f in der Bausituation, in Metern;
- S_s die Fläche des trennenden Bauteils, in m^2
- A_0 10 m^2
- K Längsleitungs Korrektur für die Übertragung über die Kreuzkopplungspfade (Fd, Df), in Dezibel.

Aufgrund bisheriger Untersuchungen wurde die Korrekturgröße K mit -2 dB angesetzt. Neueste Erkenntnisse [14] zeigen jedoch die beste Übereinstimmung zwischen Prognose und Baumesung, wenn $K=0$ verwendet wird. Es wird daher empfohlen, diese Korrekturgröße ganz wegzulassen.

Vorschlag eines Prognoseverfahrens für Trittschallübertragung

Im Falle der Trittschallübertragung bestand die Problematik, dass in DIN EN 12354-2 kein vereinfachtes Verfahren vorgesehen ist, was eine frequenzabhängige Prognose der Trittschallübertragung bedingt. Da jedoch ein vereinfachtes Verfahren mit Einzahlangaben angewendet werden soll, war die Notwendigkeit gegeben, ein alternatives Verfahren zu formulieren. Vom Labor für Schall- und Wärmemesstechnik, Rosenheim, wurde ein vereinfachtes Modell zur Prognose der Trittschallübertragung in Holzbauten entwickelt. Dieses verwendet den bewerteten Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$ der Holzbalkendecke ohne Flankenübertragung und berücksichtigt zwei Korrekturterme K_1 und K_2 . Hintergrund ist die Tatsache, dass bei Holzbalkendecken neben dem eigentlichen Flankenweg Df über die Holzbalkendecke ein weiterer Nebenweg DFf über den Randanschluss des schwimmenden Estrichs existiert. Diese Nebenwege werden durch zwei Korrekturglieder berücksichtigt. Die Trittschallübertragung berechnet sich demnach wie folgt:

$$L'_{n,w} = L_{n,w} + K_1 + K_2 \quad (\text{dB}) \quad \text{Gleichung 19}$$

$L'_{n,w}$	der bewertete Norm-Trittschallpegel der Holzbalkendecke in der Bausituation, in Dezibel;
$L_{n,w}$	der bewertete Norm-Trittschallpegel der Holzbalkendecke ohne Flankenübertragung nach DIN EN ISO 140-6, in Dezibel;
K_1	der bewertete Norm-Trittschallpegel der Holzbalkendecke ohne Flankenübertragung nach DIN EN ISO 140-6, in Dezibel, ermittelt nach Abschnitt 5.4.3.2.2 des Bauteilkataloges;
K_2	der bewertete Norm-Trittschallpegel der Holzbalkendecke ohne Flankenübertragung nach DIN EN ISO 140-6, in Dezibel, ermittelt nach Abschnitt 5.4.3.2.3 des Bauteilkataloges;

Zur Genauigkeit bzw. Ungenauigkeit

Die verschiedenen Prognoseverfahren wurden in den letzten Jahren verschiedentlich auf ihre Genauigkeit hin geprüft. Grundsätzlich wurden die Prognoseberechnungen mit Messungen am Bau für Konstruktionen in Massivbau- und Holzbauweise verglichen. Folgend sind die Resultate der unterschiedlichen Untersuchungen abgebildet:

Prognoseverfahren		Rechenergebnis-Messergebnis dB		σ dB	V m ³	S m ²	n	Typ
Neue DIN 4109 [14]	$D_{nT,w}$	+3	-3,5	1,1	22-122	7-37	24	Holzbau
	$L'_{n,w}$	+4	-4	1,3	22-122	7-37	13	Holzbau
EN 12354 [11]	$D_{nT,w}$	+3,2	-4				26	Massivbau
	$D_{nT,w}$	+4,4	-3,2				36	Massivbau
SIA 181 [8]	$L'_{n,w}$	±2		in 60% der Fälle				Massivbau
	$L'_{n,w}$	±4		in 100% der Fälle				Massivbau

Die Ergebnisse der Verfahren zeigen grundsätzlich auf, dass zwischen den Rechenergebnissen und den Messungen praktisch keine signifikanten Unterschiede vorliegen. Werden die Messunsicherheiten, die Reproduzierbarkeit der Rechenverfahren und der untersuchten Bauteile berücksichtigt, kann von einer Übereinstimmung der Prognoserechnungen zu den Messergebnissen von Luft- und Trittschall am Bau gesprochen werden.

Literaturhinweise

Normen und Richtlinien

- [1] Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Bauprodukte (Bauprodukterichtlinie), Dokument 89/106/EWG, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft Nr. L 40/12 vom 11. Februar 1989.
- [2] Richtlinie des Rates 89/106/EEC, Grundlagendokument, Wesentliche Anforderung Nr. 5, Schallschutz.
- [3] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: SIA 181-2006; Schallschutz im Hochbau, SIA Zürich 2006
- [4] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: SIA Dokumentation D0189 Bauteildokumentation Schallschutz im Holzbau, SIA Zürich 2005, ISBN 3-908483-55-7
- [5] DIN. DIN-Taschenbuch 35. Schallschutz, 11. ed. 2002. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Deutschland: Beuth, 2002, 682 p. ISBN 3-410-15285-7

Forschungsberichte und Publikationen

- [6] BERGER Richard. Dissertation: Über die Schalldurchlässigkeit. München, Deutschland: gedruckt von R. Oldenbourg, 1911, 42 p.
- [7] CREMER L., MÖSER M. Technische Akustik, 5ème ed. 2003. Berlin, Deutschland: Springer-Verlag, 2003, p. 183-205. ISBN 3-540-44249-9
- [8] GEINOZ Denis: Präsentation zur neuen Norm SIA 181
- [9] GÖSELE Karl, SCHRÖDER E. Taschenbuch der Technischen Akustik; Schallausbreitung in Gebäuden, Kapitel 8. Berlin, Deutschland: Springer-Verlag, 2004, p. 207-245. ISBN 3-540-41242-5
- [10] HOLTZ Fritz. Schalldämmende Holzbalken- und Brettstapeldecken, Reihe 3, Teil 3 Folge 3. Holzbau Handbuch, Informationsdienst Holz. München, Deutschland: Entwicklungsgemeinschaft Holzbau, 1999, 35 p. ISSN 0466-2114
- [11] LANG Judith: Schallschutz im Wohnungsbau, Endbericht Technische Universität Wien 2006, im Auftrag der Saint-Gobain ISOVER
- [12] METZEN, H. A.: Estimation of the Reduction in Impact Sound Pressure Level of Floating Floors from the Dynamic Stiffness of Insulation Layers, Building Acoustics Vol. 5, No. 1, 1996, 33-53.
- [13] SCHMID Matthias: Schallverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken im mehrgeschossigen Holzbau, Master-Thesis ENSTIB Epinal 2004 BFH-AHB Biel
- [14] SCHOLL Werner: Integration des Holz- und Skelettbbaus in die neue DIN 4109, Forschungsbericht T 3090 Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart 2005, ISBN 3-8167-6947-0

Elektronische Plattformen und Datenbanken

- [15] <http://www.dataholz.com>
Datenbank mit Bauteilen, Baustoffen und Anschlüssen mit den relevanten bauphysikalischen Kennwerten

Software

- [16] ACOUBAT
Prognoseprogramm zur Berechnung der Luft- und Trittschallübertragung in Gebäuden sowie der Schallübertragung von Außengeräuschen, basierend auf den europäischen Normen EN 12354 Teile 1 bis 3.
- [17] BASTIAN
Prognoseprogramm zur Berechnung der Luft- und Trittschallübertragung in Gebäuden sowie der Schallübertragung von Außengeräuschen, basierend auf den europäischen Normen EN 12354 Teile 1 bis 3.
- [18] <http://www.informationsdienst-holz.de>
Excel-Arbeitshilfe Trittschallprognose durch Wahl von Einzelkomponenten