



Lignum | Holzwirtschaft Schweiz
Mühlebachstrasse 8, CH-8008 Zürich

Projektierung und Prognose
MFH Frohburgstrasse 60, 8006 Zürich

Olin Bartlomé
Dipl. Ing. (FH)
Projektleiter Technik
Lignum
olin.bartlome@lignum.ch

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage.....	3
1.1	Rohdecke	3
1.2	Sanierte Decke.....	4
1.3	Subjektive Wahrnehmung	5
2	Lösung	6
2.1	Resonanzfrequenz	6
2.2	In der Physik gibt es nichts gratis	6
3	Prognose.....	8
3.1	Varianten.....	8
3.2	Berechnungen	8
3.2.1	Resonanzfrequenz	8
3.2.2	Trittschallminderung	8
3.2.3	Berechneter Norm-Trittschallpegel	9
3.2.4	Validierung	11
3.3	Projektierung.....	11
4	Vorschlag	12
5	Am Bau schliesslich durchgeführte Sanierung.....	13
5.1	Variante mit Knauf «GIFAFloor».....	13
5.2	Resultate der Decke mit «GIFAFloor»	13
5.3	Validierung Prognosemodell	15

1 Ausgangslage

1.1 Rohdecke

Das MFH hat drei Geschosse und einen Keller. Der Aufbau der Hohlkammer-Rohdecken sowie der Standard-Trittschallpegel L'_{nT} nach SIA 181 <Schallschutz im Hochbau> der Situation EG/UG ist in Abbildung 1 dargestellt:

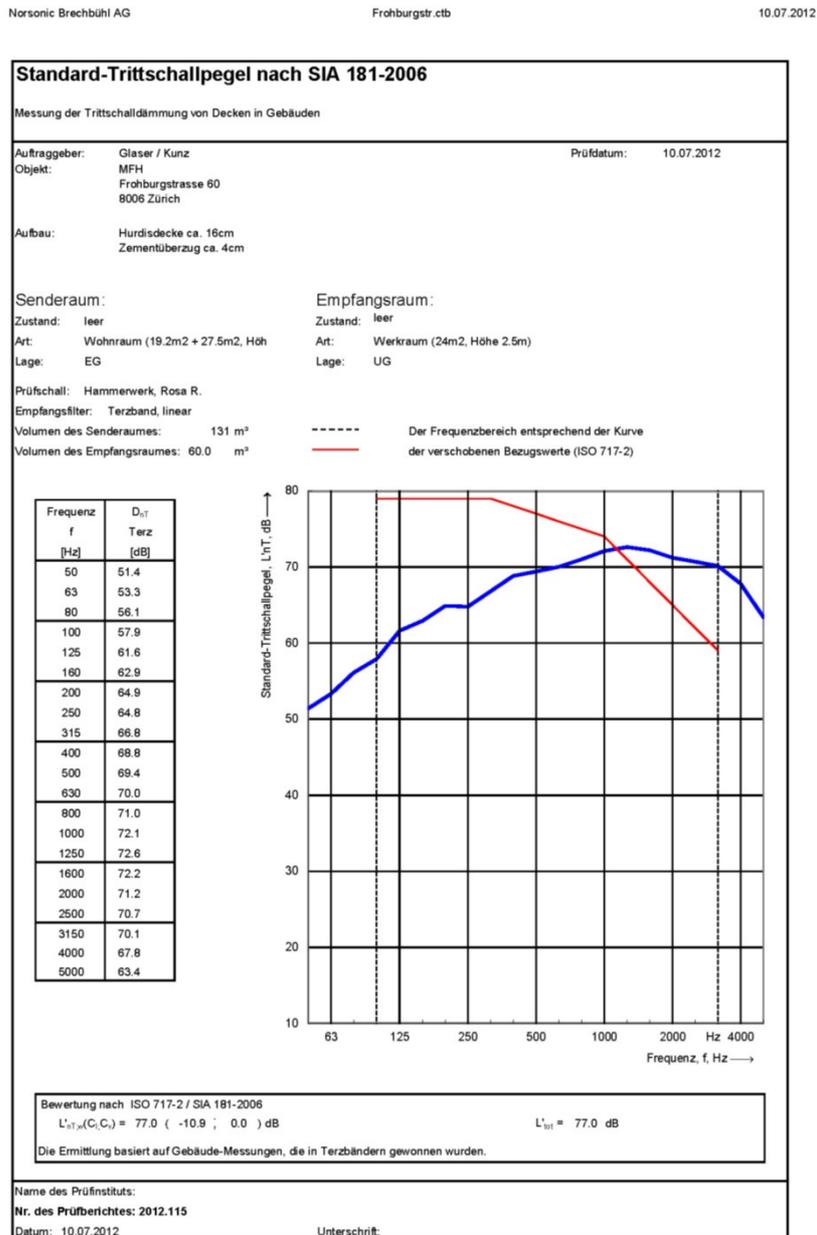


Abbildung 1: Prüfbericht Nr. 2012.115 vom Ingenieurbüro für Bauphysik + Akustik, Benglen

Die Messung zeigt, dass die Rohdecke einen Standard Trittschallpegel $L'_{nT,w} = 77$ dB aufweist. Damit liegt die Decke in etwas im Bereich einer 180 mm Betondecke. Weitere Infos zu Hourdisdecken finden sich im Anhang.

1.2 Sanierte Decke

Die Decken im 1. und 2. Geschoss sind mit einem Fussbodenaufbau versehen worden. Dieser ist zusammen mit dem Standard-Trittschallpegel L'_{nT} nach SIA 181 «Schallschutz im Hochbau» für die Situation 1. OG/EG in Abbildung 2 aufgeführt:

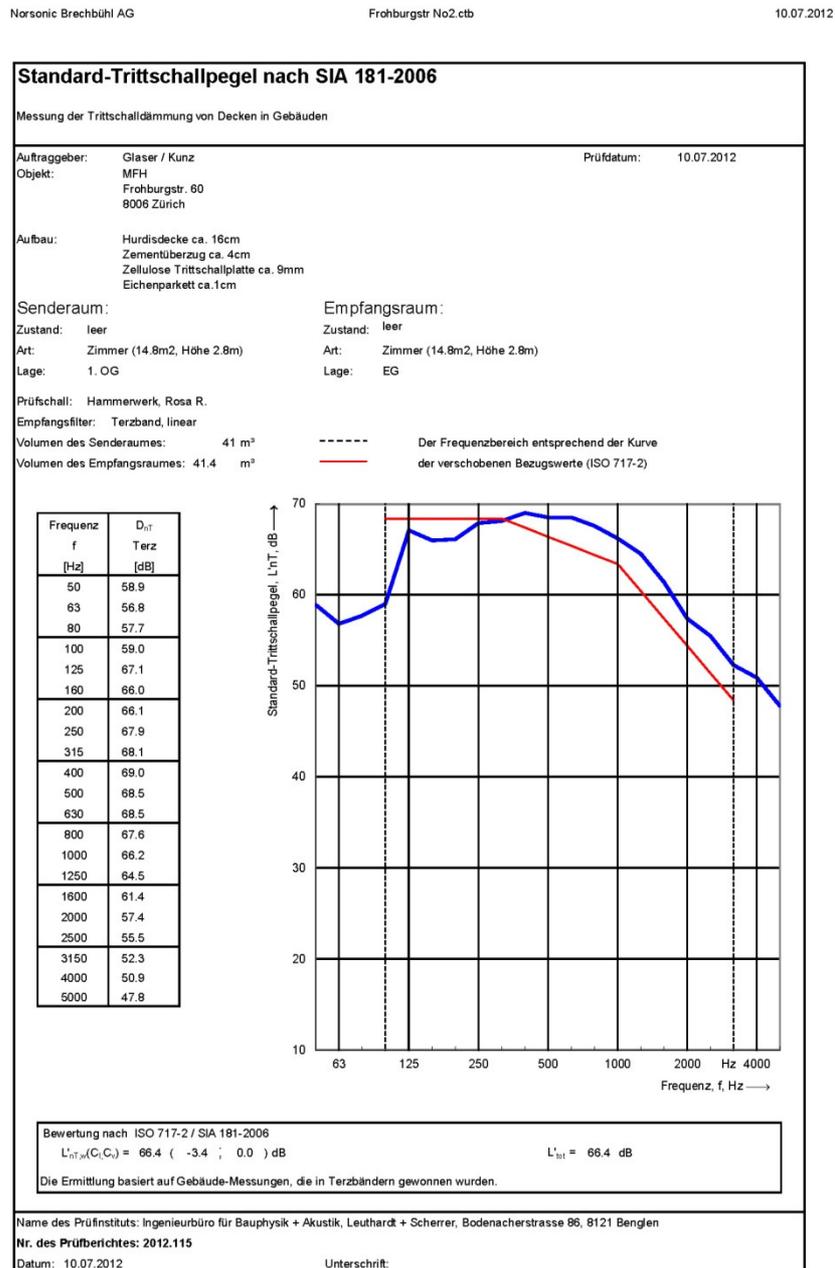


Abbildung 2: Prüfbericht Nr. 2012.115 vom Ingenieurbüro für Bauphysik + Akustik, Benglen

Die Rohdecke mit Trittschalldämmung und Eichenparkett weist ein Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w} = 66 \text{ dB}$ auf. Aus der Differenz ergibt sich ein Trittschallverbesserungsmass von $L_w = 11 \text{ dB}$. Die Anforderung an den Trittschall für Umbauten nach SIA 181 «Schallschutz im Hochbau» beträgt für Räume mittlerer Lärmempfindlichkeit (Wohnräume,

Zimmer) bei mässiger Lärmbelastung (Wohnnutzung) $L' \leq 55$ dB. Bei der sanierten Decke mit Trittschalldämmung liegt der gewichtete Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ mit 66 dB deutlich über dieser Anforderung.

1.3 Subjektive Wahrnehmung

Bei leichten Deckenkonstruktionen ergeben sich oft Klagen über störende Gehgeräusche-Immissionen. Dabei handelt es sich um dröhnende Gehgeräusche im tieffrequenten Bereich, welche beim Begehen der Decke in den darunter liegende Räume abgestrahlt werden. Beim Gehgeräusch ist es so, dass seine Hauptkomponenten zwischen 16 Hz und 100 Hz liegen, was für das Dröhnen charakteristisch ist.

Bei Betrachtung der Terzwerte bzw. der Kurven von Abbildung 1 und Abbildung 2 fällt auf, dass durch die Sanierung der Deckenkonstruktion in den tiefen Frequenzbändern eine Verschlechterung stattgefunden hat. Erst ab 400 Hz erfolgt eine Verbesserung. In den kritischen Frequenzbändern (von 50 – 100...200 Hz) liegt die Verschlechterung bei der sanierten Decke gegenüber der Rohdecke frequenzabhängig bei 7,5...3,5...1,6...1,1...5,5...3,1...1,2 dB. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass trotz einem Trittschallverbesserungsmass $L_w = 11$ dB subjektiv keine Verbesserung wahrnehmbar ist, bzw. sogar von einer Verschlechterung ausgegangen werden kann.

2 Lösung

2.1 Resonanzfrequenz

Die Resonanzfrequenz ist die wichtigste Grösse bei der Dimensionierung des Fussbodenaufbaus. Ein Fussbodenaufbau stellt ein Tiefpassfilter dar, welcher erst bei Frequenzen oberhalb der Resonanzfrequenz f_0 zu dämmen beginnt. Im Bereich der Resonanzfrequenz und darunter lässt der Filter die Signale ungehindert passieren. Im ungünstigsten Fall – dieser tritt dann ein, wenn die inneren Körperschallverluste bzw. Reibung im Dämmmaterial klein sind – ist sogar mit einer Verstärkung der übertragenen Signale in der Grössenordnung von 10 bis 15 dB zu rechnen.

D.h. um beim Trittschall gute Resultate zu erzielen, ist es nötig, dass die Resonanzfrequenz des Fussbodenaufbaus möglichst tief ist, also unterhalb des fürs menschliche Gehör störenden Bereichs. Das ist mit der aktuell verwendeten Konstruktion nicht der Fall. Anhand der Werte in Abbildung 2 kann davon ausgegangen werden, dass diese bei ca. 300 Hz liegt.

2.2 In der Physik gibt es nichts gratis

Das System ist theoretisch so abzustimmen, dass die Resonanzfrequenz bei (weit) unter 50 Hz liegt (je tiefer desto besser, was aber zu einem dickeren und schwereren Aufbau führt). Bekanntlich ist speziell die Aufbauhöhe häufig begrenzt, speziell bei Sanierungen.

Die Parameter «flächenbezogene Estrichmasse» bzw. «dynamische Steifigkeit» lassen sich in Abhängigkeit der Resonanzfrequenz mit Formel 1 berechnen:

$$f_0 = 160 * \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad \text{Formel 1}$$

f_0 = Resonanzfrequenz in Hz

m' = flächenbezogene Masse des Estrichs in kg/m^2

s' = flächenbezogene dynamische Steifigkeit der Trittschalldämmung in MN/m^3

Davon ausgehend, dass eine Isover PS 81 Trittschalldämmung eingesetzt wird, weil diese sehr gute dynamische Steifigkeiten besitzt, ergeben sich folgende Estrichmassen bei 52 Hz Resonanzfrequenz:

- Bei 12/10 mm Trittschalldämmung ($s' = 16 \text{ MN/m}^3$): $151,5 \text{ kg/m}^2$
- Bei 15/12 mm Trittschalldämmung ($s' = 12 \text{ MN/m}^3$): $113,6 \text{ kg/m}^2$
- Bei 20/17 mm Trittschalldämmung ($s' = 9 \text{ MN/m}^3$): $85,2 \text{ kg/m}^2$
- Bei 30/27 mm Trittschalldämmung ($s' = 6 \text{ MN/m}^3$): $56,8 \text{ kg/m}^2$

Dabei gilt es zu erwähnen, dass ein Trockenestrich-Aufbau auf dieser Trittschalldämmung von den Herstellern aus Gründen der Zusammendrückbarkeit nicht freigegeben ist.

Die Flächengewichte von verschiedenen Estrichen inkl. 15 mm Eichenparket (ca. 700 kg/m³) sind folgende:

- 55 mm Anhydrit: ca. 125 kg/m²
- 40 mm Anhydrit (= dünnst-mögliche Ausführung): ca. 94 kg/m²
- 2x 20 mm Fermacell-Estrichelement: ca. 56 kg/m²
- 2x 15 mm Fermacell- Estrichelement: ca. 45 kg/m²
- 2x 12,5 mm Fermacell-Estrichelement: ca. 38.5 kg/m²

Daraus geht hervor, dass es bei knappen Platzverhältnissen, d.h. eingeschränkter Aufbauhöhe, schwierig ist eine gute Lösung zu finden. Oder anders gesagt, in der Physik gibt es nichts gratis.

Der optimalste Aufbau wäre demnach eine 15/12 mm Mineralfaser-Trittschalldämmung mit 55 mm Anhydrit-Estrich (auch Gründen der Zusammendrückbarkeit der Trittschalldämmung). Mit einem 15 mm Parkett ergibt das eine Aufbauhöhe von ca. 82 mm. Um Platz zu sparen, ist ein Aufbau mit 12/10 mm Mineralfaser-Trittschalldämmung und 40 mm Anhydrit-Estrich ggf. eine Option. Dieser Aufbau hätte seine Grenzfrequenz bei 66 Hz. Die Gesamtaufbauhöhe liegt bei diesem System bei ca. 64 mm.

3 Prognose

3.1 Varianten

Basierend auf der maximal möglichen Aufbaudicke, wurde die Lignum beauftragt Berechnungen für drei verschiedene Fussbodenaufbau-Varianten durchzuführen. Diese sind wie folgt:

Tabelle 1: Parameter für die Variantenstudie

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Eichenparkett Masse	17 mm 10 kg		
Trockenestrich (Fermacell) ¹ Masse	2x 20 mm 46 kg	2x 15 mm 35 kg	2x 12,5 mm 28,5 kg
Trittschalldämmung (Isover PS 81) Dynamische Steifigkeit s'	12/10 mm 16 MN/m ³		

3.2 Berechnungen

3.2.1 Resonanzfrequenz

Die Resonanzfrequenzen der drei Varianten sind in Tabelle 2 aufgeführt (berechnet nach Formel 1):

Tabelle 2: Resonanzfrequenzen der Varianten

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Resonanzfrequenz f_0	86 Hz	95 Hz	103 Hz

3.2.2 Trittschallminderung

Für die Berechnung der erzielbaren Trittschallminderung bzw. der Einfügungsdämmung L_n eines Estrichs in Terzbandbreite kann die folgende, allgemein gültige Beziehung (Formel 2) herangezogen werden:

$$\Delta L_n = 10 \lg \frac{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + d}{1+d} \text{ [dB]} \quad \text{Formel 2}$$

Darin sind:

f = betrachtete Frequenz in Hz

f_0 = Resonanzfrequenz des Estrichs in Hz (gemäss Formel 1)

d = innere Dämpfung bzw. Verlustfaktor des Dämmmaterials unter dem Estrich [-]

¹ Wie erwähnt, wird dieser Aufbau von Fermacell Schweiz nicht empfohlen, weil Isover PS 81 eine zu grosse Zusammendrückbarkeit besitzt

Daraus ergeben sich für die Trittschallminderung ΔL_w folgende Kurven:

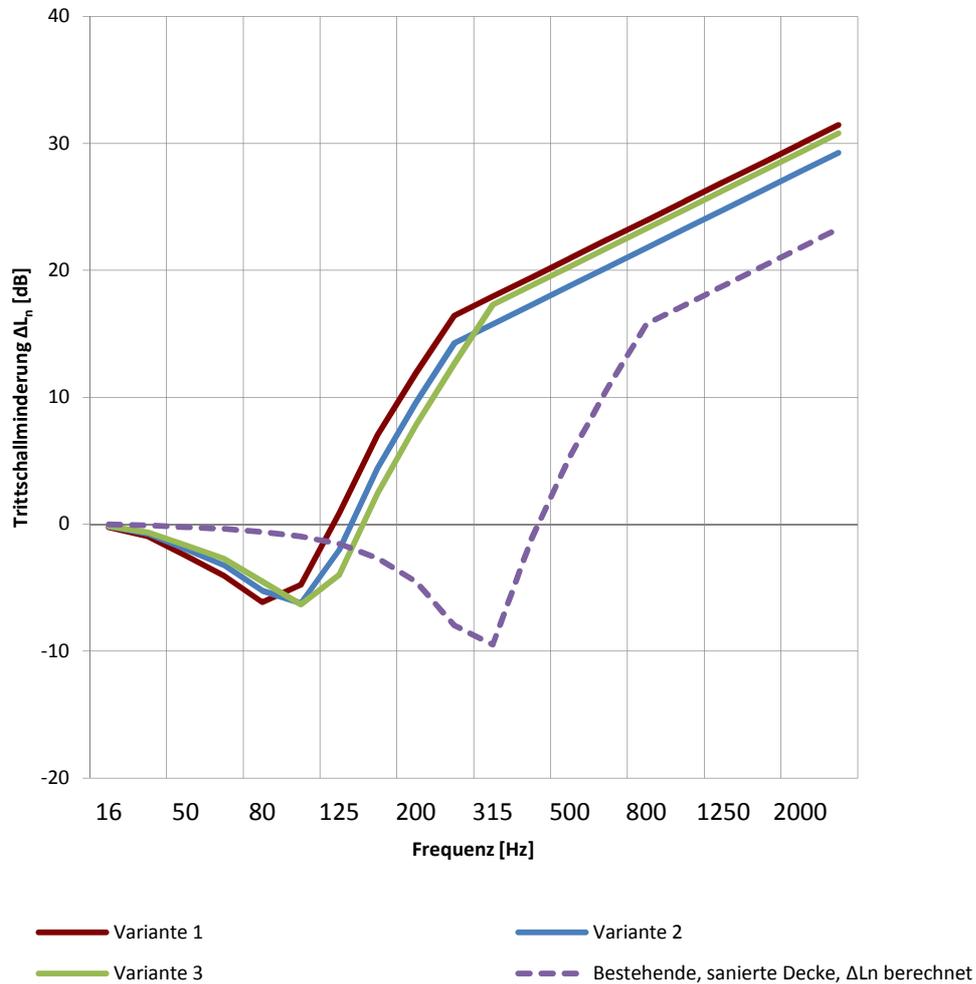


Abbildung 3: Darstellung der nach Formel 2 berechneten Trittschallminderung ΔL_w der verschiedenen Estrich-Varianten, sowie der bestehenden, «sanierten» Variante (Der Verlustfaktor der Mineralfaser-Trittschalldämmung (Isover PS 81) wurde zu $d = 0,3$, derjenige der bestehenden Trittschalldämmung zu $d = 0,1$ angenommen). Anmerkung zur Berechnung: In der Praxis steigt die Trittschallminderung nicht unendlich weiter, sondern bleiben oft bei ca. 20 dB «hängen». Um dieser Tatsache etwas gerecht zu werden, wurde bei der Berechnung bei Trittschallminderungs-Werten > 14 dB ein Knick mit 1,5 dB Anstieg pro Terzband eingegeben.

Aus Abbildung 3 geht hervor, dass bei allen Varianten mit einer Verschlechterung der Trittschallübertragung in den tiefen Frequenzbändern zu rechnen ist. Diese ist bei allen drei Varianten mit ca. 6 dB in etwa gleich gross und damit tiefer als die «sanierte» Variante mit ca. 7...10 dB.

3.2.3 Berechneter Norm-Trittschallpegel

Anhand Formel 2 und der gemessenen Werte der Rohdecke (vgl. Abbildung 2) lässt sich der Norm-Trittschallpegel L_n prognostizieren. Zusammen mit den frequenzabhängigen Kurven der gemessenen Rohdecke (D_{nT}) und den rechnerisch ermittelten Terzbandwerten der «sanierten» Variante sind diese in nachfolgender Abbildung dargestellt:

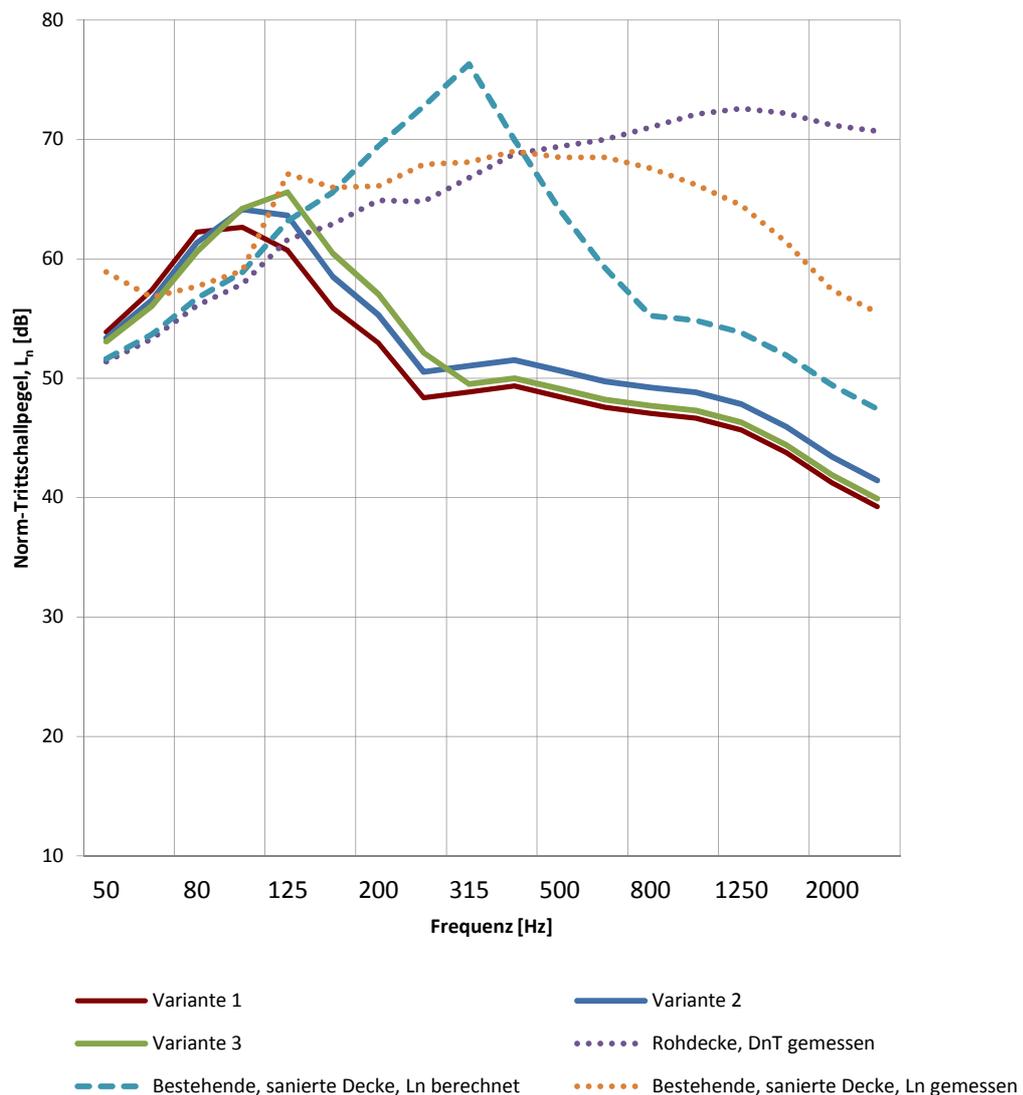


Abbildung 4: Rechnerisch ermittelte Norm-Trittschallpegel L_n der drei Varianten sowie der bestehenden, «sanierten» Variante und der D_{nT} -Kurve der gemessenen Rohdecke. Anmerkung zur Berechnung: In der Praxis verbessert sich der Norm-Trittschallpegel nicht unendlich weiter, sondern bleibt oft bei ca. 20 dB «hängen». Um dieser Tatsache etwas gerecht zu werden, wurde bei den addierten Trittschallminderungs-Werten > 14 dB ein Knick mit 1,5 dB Anstieg pro Terzband eingegeben.

Anhand der frequenzabhängigen Werte lassen sich die Einzahlwerte nach ISO 717-2 ermitteln. Diese sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt:

Tabelle 3: Bewertung nach ISO 717-2/SIA 181 «Schallschutz im Hochbau»

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Bestehend
$L_{n,w} (C_{150-2500})$	52 (1) dB	54 (0) dB	54 (1) dB	65 (2) dB

Betrachtet man den berechneten Einzahlwert der «sanierten» Situation, so erkennt man eine Differenz zur Messung am Bau ($L'_{nT,w}$; vgl. Abbildung 2) von 2,4 dB. Bezieht man den spektralen Anpassungswert $C_{150-2500}$ von 1 dB ein, beträgt die Differenz zum gemessenen Wert noch 1,4 dB. Diese Differenz fusst mutmasslich einerseits auf der (gemessenen) Flankenübertragung und auf Berechnungsunsicherheiten (Theorie/Praxis).

Wie üblich bei Prognose-Berechnungen muss man wohl auch bei den Werten in Tabelle 3 von einer Standardabweichung von ca. ± 2 dB ausgehen.

3.2.4 Validierung

Die Differenzen zwischen Einzahlwerten lassen sich über die Resonanzfrequenzen des Systems aber auch über die Estrichmasse mittels Annäherungsformeln bestimmen. Basierend auf den Estrichmassen bzw. den Resonanzfrequenzen (Resonanzfrequenzen) und Annäherungsformeln (Formel 3 bzw. Formel 4) sind in Tabelle 4 die zu erwartenden Einzahlwertverschiebungen der Varianten 2 und 3 gegenüber Variante 1 aufgeführt:

$$\Delta L'_{nT,w} = 15 * \log \frac{m_2}{m_1} \quad \text{Formel 3}$$

m_1 = Masse 1

m_2 = Masse 2

$$\Delta L'_{nT,w} = 40 * \log \frac{f_{0,1}}{f_{0,2}} \quad \text{Formel 4}$$

$f_{0,1}$ = Resonanzfrequenz 1 in Hz

$f_{0,2}$ = Resonanzfrequenz 2 in Hz

Tabelle 4: Einzahlwertverschiebung der Varianten 2 und 3 gegenüber Variante 1

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
$\Delta L'_{nT,w}$ anhand der Beziehung «Masse»		ca. - 1,4 dB	ca. - 2,4 dB
$\Delta L'_{nT,w}$ anhand der Beziehung «Resonanzfrequenz»		ca. - 1,7 dB	ca. - 3,1 dB

Die Validierung zeigt, dass die Werte in Tabelle 3 speziell in Bezug auf die Beziehung «Masse» plausibel sind. Davon ausgehend, dass mit Variante 1 auf der eingebauten Hourdisdecke theoretisch ein Trittschallverbesserungsmass L_w von max. 24 dB (inkl. spektralem Anpassungswert) erwartet werden kann, heisst das, dass mit Variante 2 bzw. 3 theoretisch Trittschallverbesserungsmasse L_w von max. ca. 21...22 bzw. max. ca. 19...21 dB erreicht werden (Standardabweichung = ± 2 dB).

Hier gilt es zu erwähnen, dass die Dämpfung in den tiefen, bekanntlich kritischen Frequenzen, negativ sein wird (vgl. Abbildung 3). Zudem gilt es zu Beachten, dass 3 dB(A) einer Verdoppelung des Schalldruckpegels entspricht.

3.3 Projektierung

Als Projektierungszuschlag müssen 3 dB angesetzt werden.

4 Vorschlag

Basierend auf der Tatsache, dass nur sehr wenig Platz zur Verfügung steht (in der Regel ≤ 50 mm), wird vorgeschlagen, einen Aufbau mit 40 mm Anhydrit und 15/12 mm Trittschalldämmung zu realisieren. Diese Wahl stellt jedoch im Vergleich zu den Varianten mit Trockenestrichen höhere Anforderungen an die Tragfähigkeit der bestehenden Hourdisdecke. Diese müsste abgeklärt werden.

Da es zudem Situationen gibt, wo eine Aufbauhöhe von > 40 mm nicht möglich ist (z. B. bei gewissen Balkontüren), müsste dort die Aufbauhöhe des Fussbodenaufbaus entsprechend angepasst werden.

Mit seiner fast doppelten Masse gegenüber Trockenestrichelementen kann in Kombination mit der etwas dickeren als geplanten Trittschalldämmung die Resonanzfrequenz des Fussbodenaufbaus auf unter 60 Hz gedrückt werden, was zu einer Verbesserung bei der subjektiven Wahrnehmung gegenüber den in diesem Bericht berechneten Varianten führen wird. Mit 40 mm Anhydrit auf 15/12 mm Isover PS 81 kann wohl von einem Trittschallverbesserungsmass L_w von ca. 26 dB ausgegangen werden.

5 Am Bau schliesslich durchgeführte Sanierung

5.1 Variante mit Knauf «GIFAfloor»

In KW 35 wurde auf Basis der obigen Berechnungen und nach Rücksprache mit Herstellern schliesslich folgende Variante eingebaut und gemessen:

Tabelle 5: Parameter für die Variante «GIFAfloor»

	Variante «GIFAfloor»
Eichenparkett	17 mm
<i>Masse</i>	<i>10 kg</i>
Trockenestrich (Knauf GIFAfloor)	28 mm
<i>Masse</i>	<i>46 kg</i>
Trittschalldämmung (Flumroc Bodenplatte)	15/13 mm
<i>Dynamische Steifigkeit s'</i>	<i>≤30 MN/m³</i>

Die Resonanzfrequenzen der Variante ist in Tabelle 2 aufgeführt (berechnet nach Formel 1):

Tabelle 6: Resonanzfrequenzen der Variante «GIFAfloor»

	Variante «GIFAfloor»
Resonanzfrequenz f_0 ²	80 Hz

GIFAfloor-Elemente wurden gewählt weil sie einerseits eine höhere Rohdichte als Gipsfaserplatten haben. Andererseits sind GIFAfloor-Elemente für das direkte Verlegen von Parkett vom Hersteller freigegeben. Jedoch muss dafür die Trittschalldämmung eine gewisse Druckfestigkeit haben. Die Flumroc Bodenplatte verspricht als Mittelweg eine gute Kombination aus Trittschalldämmung und Gehkomfort.

5.2 Resultate der Decke mit «GIFAfloor»

Die Decke im Erdgeschoss ist wie in Tabelle 5 dargestellt mit einem Fussbodenaufbau versehen worden. Dieser ist zusammen mit dem Standard-Trittschallpegel L'_{nT} nach SIA 181 «Schallschutz im Hochbau» für die Situation EG in Abbildung 5 aufgeführt:

² Für die Berechnung der Resonanzfrequenz wurde eine dynamische Steifigkeit s' von 9 MN/m³ eingesetzt

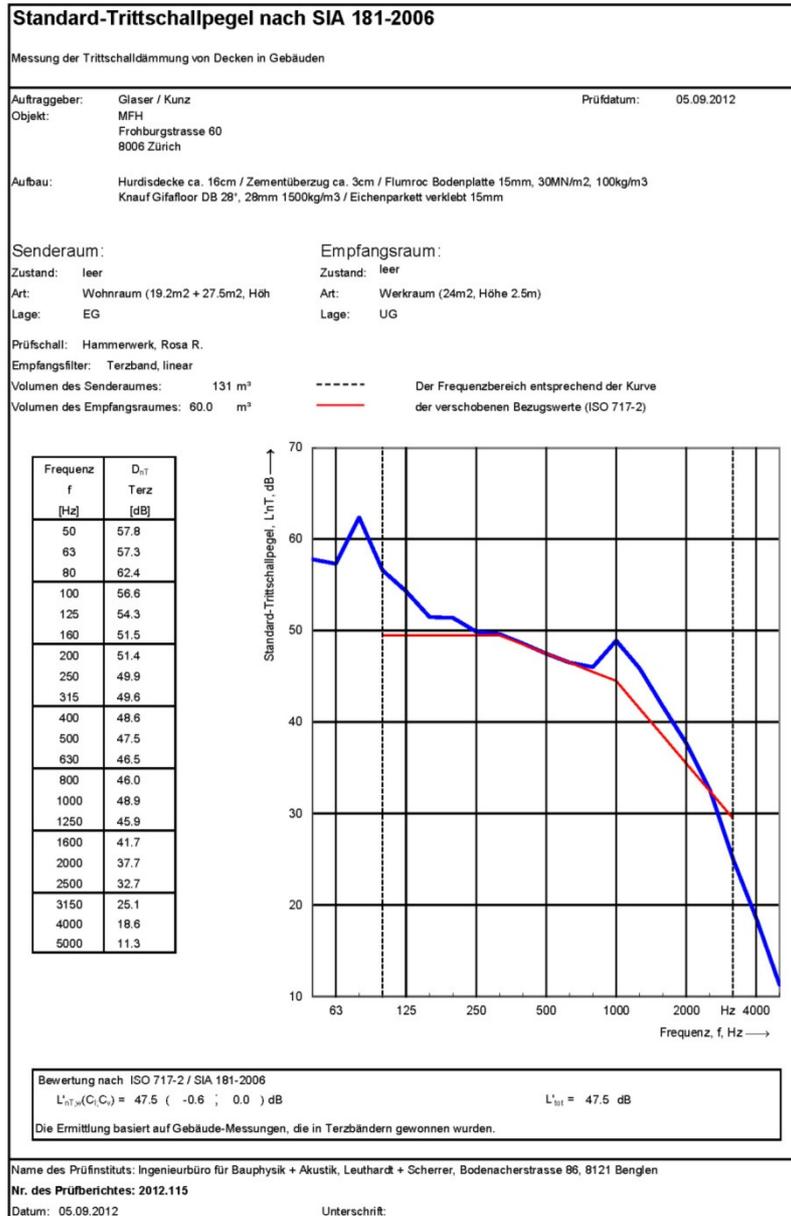


Abbildung 5: Prüfbericht Nr. 2012.115 vom Ingenieurbüro für Bauphysik + Akustik, Benglen

Die Rohdecke mit Flumroc-Trittschalldämmung, GIFA-Floor-Elementen und Eichenparket weist ein Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w} = 47,5$ dB auf. Aus der Differenz ergibt sich ein Trittschallverbesserungsmass von ca. $L_w = 29$ dB. Die Anforderung an den Trittschall für Umbauten beträgt nach SIA 181 <Schallschutz im Hochbau> für Räume mittlerer Lärmempfindlichkeit (Wohnräume, Zimmer) bei mässiger Lärmbelastung (Wohnnutzung) $L' \leq 55$ dB. Die Anforderung ist damit deutlich erfüllt.

5.3 Validierung Prognosemodell

Natürlich ist es nun interessant zu sehen, wie genau das entwickelte, im Hauptteil beschriebene Prognose-Verfahren, mit der schliesslich durchgeführten Sanierung übereinstimmt.

Basierend auf der dazu durchgeführten Berechnung bzw. den Messwerten sind in Abbildung 6 die beiden Kurven im gleichen Diagramm dargestellt:

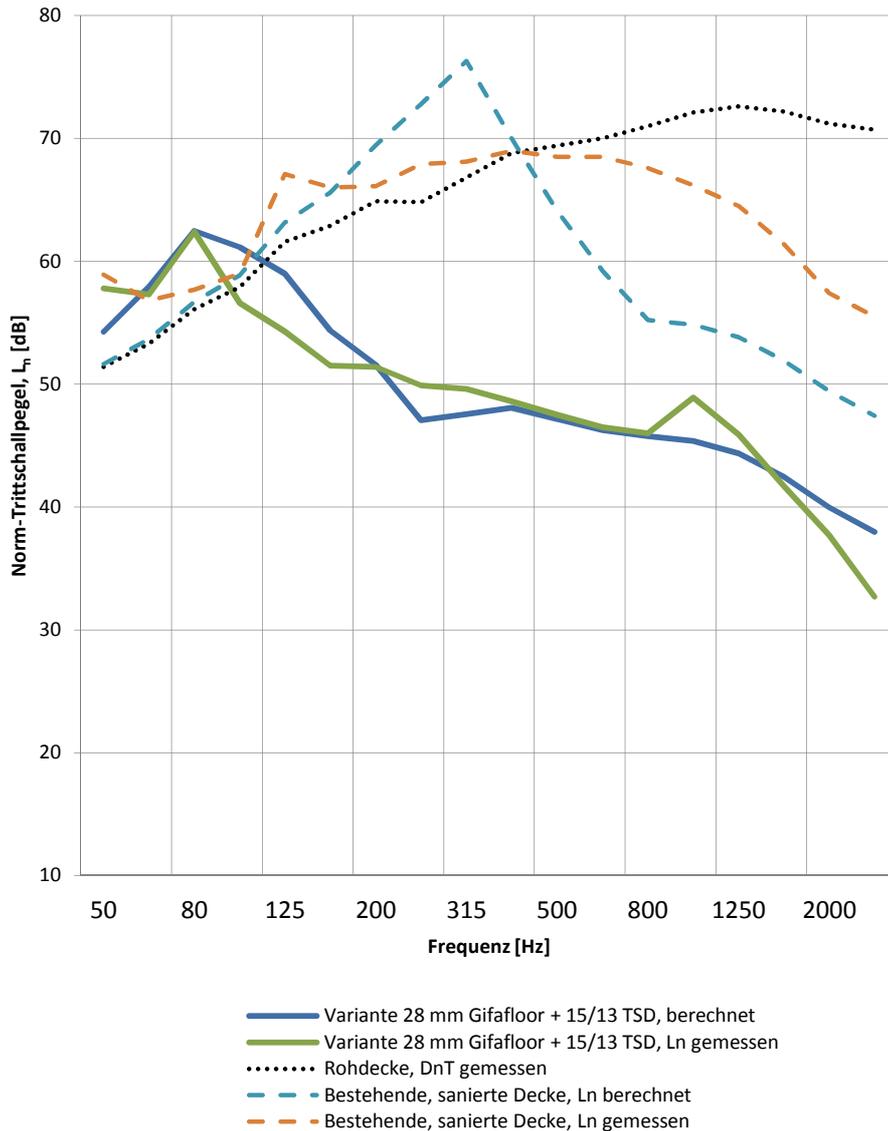


Abbildung 6: Rechnerisch ermittelte Norm-Trittschallpegel L_n der Variante «GIFAfloor» sowie der bestehenden, «sanierten» Variante im 1. OG und der D_{nT} -Kurven der gemessenen Rohdecke sowie der gemessenen Variante mit «GIFAfloor». Anmerkung zur Berechnung: In der Praxis verbessert sich der Norm-Trittschallpegel nicht unendlich weiter, sondern bleibt oft bei ca. 20 dB «hängen». Um dieser Tatsache etwas gerecht zu werden, wurde bei den addierten Trittschallminderungs-Werten > 14 dB ein Knick mit 1,5 dB Anstieg pro Terzband eingegeben.

In Abbildung 6 ist ersichtlich, dass die beiden Kurven «berechnet» und « L_n gemessen» der Variante «GIFAfloor» sehr ähnlich verlaufen.

Anhand der frequenzabhängigen Werte lassen sich wieder der Einzahlwert nach ISO 717-2 ermitteln. Dieser ist wie folgt:

Tabelle 7: Bewertung nach ISO 717-2/SIA 181 «Schallschutz im Hochbau»

	Variante «GIFAfloor»
$L_{n,w} (C_{150-2500})$	50 (-1) dB

Betrachtet man den berechneten Einzahlwert und mit jenem der Messung am Bau ($L'_{nT,w}$; vgl. Abbildung 5), stellt man eine von Differenz 2,5 dB fest. Damit liegt die Berechnung auf der sicheren Seite. Je nach Auffassung liegt die Berechnung damit knapp über der angenommenen Standardabweichung von ca. ± 2 dB.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Kurven wie auch die Einzahlwerte sehr ähnlich sind und die Berechnungen bei dieser Decke eine hohe Genauigkeit aufweisen, speziell bezogen auf den resultierenden Einzahlwert.