



Entwicklung und Optimierung einer Holzbetonverbunddecke mit Buche für Büro- und Wohngebäude

Schlussbericht

Bericht Nr.	R.008730-10-72FE-SB01
Projekt Nr.	R.008730-10-72FE-01
Klassifizierung	Öffentlich
Datum	26. Juni 2019
Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt – BAFU Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Claire-Lise Suter-Thalmann
Projektnummer BAFU	2017.08
Adresse der Forschungsstelle	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur Kompetenzbereich Bauphysik und Energie Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel
Verfasser	Prof. Dr. Christoph Geyer / Amabel Melián Hernández
Projektverantwortlicher	Prof. Dr. Christoph Geyer
Institutsleiter	Prof. Andreas Müller

Inhaltsverzeichnis

Schlussbericht	1
1 Ausgangslage	5
2 Zielsetzungen des Forschungsprojekts	5
3 Projektpartner	6
4 Ausgangskonstruktion der Deckensysteme	6
5 Berechnung der wirksamen Wärmekapazität	9
5.1 Berechnung nach EN ISO 13786	9
5.2 Berechnung mit dynamischen Wärmebrückenprogrammen	10
5.2.1 Eigenschaften der Materialien	12
5.2.2 Randbedingungen	13
5.2.3 Ausgangskonstruktion für die Optimierung der Schallabsorption	26
5.2.4 Ergebnisse der dynamischen Wärmekapazität der Holzbetonverbunddecke	28
6 Optimierung der Schallabsorption der Deckenunterseite	31
6.1 Schallabsorptionsgrad	31
6.2 Äquivalente schallabsorbierende Fläche	31
6.3 Optimierung der Deckenunterseite	32
6.3.1 Verwandte Materialien	33
6.3.2 Bestimmung der Schallabsorption	33
6.3.3 Rechenmodell zur Abschätzung der Schallabsorptionsgrade	38
6.3.4 Schallabsorption verschiedener Deckenunterseiten	40
6.3.5 Bewerteter Schallabsorptionsgrad nach EN ISO 11654	42
6.3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse	43
7 Schalldämmung der Geschossdecke	45
7.1 Luftschalldämmung	46
7.2 Trittschalldämmung	47
7.3 Bestimmung der Einzahlangaben	48
7.3.1 Bestimmung des bewerteten Schalldämmmasses	48
7.3.2 Bestimmung des bewerteten Norm-Trittschallpegels	48
7.4 Aufbau der trennenden Geschossdecken	48
7.5 Schalldämmung der Holzbetonverbunddecke	49
7.6 Messergebnisse der Direktschallübertragung	49
7.7 Schallschutz von Raum zu Raum	50
7.7.1 Luftschallschutz	51
7.7.2 Trittschallschutz	52
7.7.3 Beurteilung	52
8 Literaturverzeichnis	53
9 Verzeichnisse	53
9.1 Tabellenverzeichnis	53
9.2 Abbildungsverzeichnis	54
10 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	55

Anlage 1: profilierte Decken	56
Anlage 2: Decken für Schallabsorption	70
Anlage 3: Datenblätter	79
Anlage 4: Berechnungen Schallabsorption	84
Anlage 5: Luftschalldämmung Ergebnisse	95
Anlage 6: Trittschalldämmung Ergebnisse	100

Abstract

Es wird eine Holzbetonverbunddecke mit Buche entwickelt.

Die wichtigsten bauphysikalischen Parameter dieser Holzbetonverbunddecke werden ermittelt. Dies sind für den sommerlichen Wärmeschutz die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite, κ nach EN ISO 13786, für die Raumakustik der Schallabsorptionsgrad der Deckenunterseite, α nach EN ISO 354, der praktische und der bewertete Schallabsorptionsgrad, α_p und α_w nach EN ISO 11654 und für die Bauakustik der Luft- und Trittschallschutz, das bewertete Schalldämm-Mass R_w und der bewertete Normtrittschallpegel $L_{n,w}$ nach EN ISO 10140.

Die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite kann von $\kappa = 32 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ für eine glatte Deckenunterseite durch geeignete Profilierung bis auf $\kappa = 71 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ gesteigert werden.

Die akustischen Parameter werden durch Messungen in Prüfständen bestimmt bzw. berechnet.

Es werden die bauakustischen Parameter der Geschossdecke im direkten Durchgang im Deckenprüfstand der Eidgenössischen Material- und Prüfanstalt, EMPA, in Dübendorf gemessen.

Es ergibt sich ein bewertetes Schalldämm-Mass von $R_w(C) = 74,4(-2) \text{ dB}$ und ein bewerteter Normtrittschallpegel von $L_{n,w}(C_i) = 47,2(-4) \text{ dB}$ im direkten Durchgang.

Die raumakustischen Eigenschaften, namentlich die Schallabsorptionsgrade von Teilflächen der Deckenunterseite, werden in einem Hallraum bei der École polytechnique fédérale de Lausanne, EPFL, festgestellt. Mit diesen Informationen kann der bewertete Schallabsorptionsgrad der Deckenunterseite von $\alpha_w = 0,05$ für eine glatte Deckenunterseite bis auf $\alpha_w = 0,50$ mit Streifen aus schallabsorbierendem Material gesteigert werden.

Durch das Forschungsprojekt werden die wichtigsten bauphysikalischen Parameter der Holzbetonverbunddecke mit Buche bestimmt und optimiert. Somit stehen die Eingabeparameter für die Planung des sommerlichen Wärmeschutzes, des Schallschutzes und der Raumakustik zur Verfügung, was den Einsatz dieses neuartigen Deckentyps in zukünftigen Gebäuden erleichtern wird.

1 Ausgangslage

Um den wachsenden Laubholzanteil, insbesondere von Buchenholz, in den Schweizer Wäldern sinnvoll zu nutzen, wird der Einsatz von Buche in neuen Marktsegmenten seit Jahren erforscht und ausgeweitet.

Durch die Verwendung von einheimischem Laubholz wird zum einen die Wertschöpfungskette vom Forst bis zum Verbraucher in der Schweiz nutzbar gemacht. Darüber hinaus ermöglicht die Verwendung von Buchenholz als Konstruktionsholz die volle Ausschöpfung seiner ökologischen Potenziale. Insbesondere kann durch den Einbau von Holz in Gebäuden die Eigenschaft des Holzes als CO₂-Speicher ausgenutzt werden. Daher soll, auch im Sinne des Klimaschutzes, die Nutzung von Laubholz als Konstruktionsholz deutlich erhöht werden.

Um diese Entwicklung voranzutreiben, werden die bauphysikalischen Eigenschaften einer Holzbetonverbunddecke mit Buchenholz als Konstruktionsholz untersucht.

2 Zielsetzungen des Forschungsprojekts

Als erster bauphysikalischer Parameter der Holzbetonverbunddecke mit Buche wird ihre dynamische Wärmekapazität berechnet. Die dynamische Wärmekapazität wird als Eingabegrösse zur Berechnung des sommerlichen Wärmeschutzes von Gebäuden benötigt.

Um die Leistungsfähigkeit dieses Deckensystems mit anderen vergleichen zu können, wird auch die dynamische Wärmekapazität zweier weiterer Deckensysteme, einer massiven Betondecke und einer massiven Betondecke mit Akustikelementen ermittelt.

Während die wärmeschutztechnischen Kennwerte von Buchenholz weitgehend bekannt sind, hängt die dynamische Wärmekapazität auch von der Konstruktion ab. Zur Berechnung der dynamischen Wärmekapazität wird das neu entwickelte Verfahren mit dynamischen Wärmebrückenberechnungen [1] angewandt.

Die akustischen Parameter werden durch Messungen in Prüfständen bestimmt. Durch die Herstellung der Prototypen für die bauakustischen Prüfstandsmessungen werden auch erste Erfahrungen bei der Produktion des neuen Deckensystems gesammelt.

Es werden die bauakustischen Parameter der Geschossdecke im direkten Durchgang im Deckenprüfstand der Eidgenössischen Material- und Prüfanstalt, EMPA, in Dübendorf gemessen. Dies sind der Luftschallschutz in Form der Schalldämmmasse, R , nach EN ISO 10140-2 [2] und der Trittschallschutz in Form der Normtrittschallpegel, nach EN ISO 10140-3 [3] ermittelt.

Die raumakustischen Eigenschaften, namentlich die Schallabsorptionsgrade der Deckenunterseite, werden in einem Hallraum bei der École polytechnique fédérale de Lausanne, EPFL, nach EN ISO 354 [4] festgestellt.

Durch das Forschungsprojekt werden die wichtigsten bauphysikalischen Parameter der Holzbetonverbunddecke mit Buche bestimmt und optimiert. Somit stehen die Eingabeparameter für die Planung des sommerlichen Wärmeschutzes, des Schallschutzes und der Raumakustik zur Verfügung, was den Einsatz dieses neuartigen Deckentyps in zukünftigen Gebäuden erleichtern wird.

3 Projektpartner

Die Bearbeitung des Projektes erfolgt in Kooperation mit den in Tabelle 1 aufgeführten Projektpartnern.

Tabelle 1: Übersicht der Projektpartner. Quelle: Berner Fachhochschule.

Projektpartner	Ansprechperson	Kategorie
Fagus Suisse SA	Stefan Vögtli	Wirtschaftspartner
SJB Kempster Fitze AG	Christoph Meier	Wirtschaftspartner
Berner Fachhochschule	Christoph Geyer	Forschungspartner

4 Ausgangskonstruktion der Deckensysteme

Es wurden drei verschiedene Deckensysteme untersucht, um die dynamische Wärmekapazität der neuen Holzbetonverbunddecke mit Buchenholz mit anderen Deckensystemen vergleichen zu können. Dabei handelt es sich um

- eine massive Betondecke
- eine massive Betondecke mit Akustikelementen
- und eine Holzbetonverbunddecke mit Buche

Abbildung 1 zeigt einen Vertikalschnitt durch die massive Betondecke, Abbildung 2 einen Vertikalschnitt durch die massive Betondecke mit Akustikelementen, Abbildung 3 einen Vertikalschnitt durch die Holzbetonverbunddecke mit Buche.

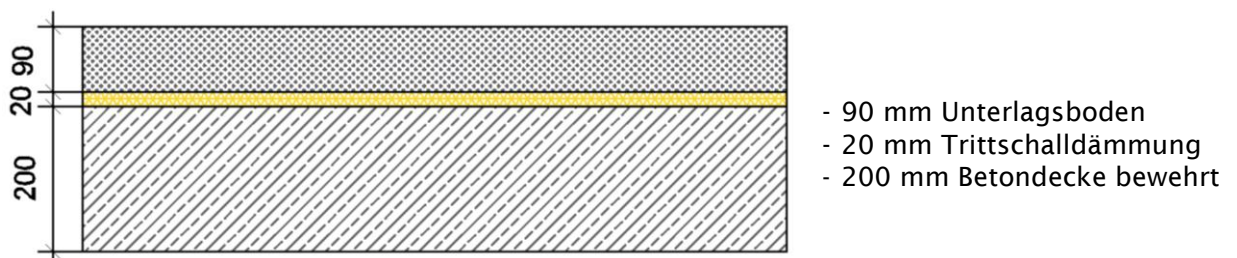
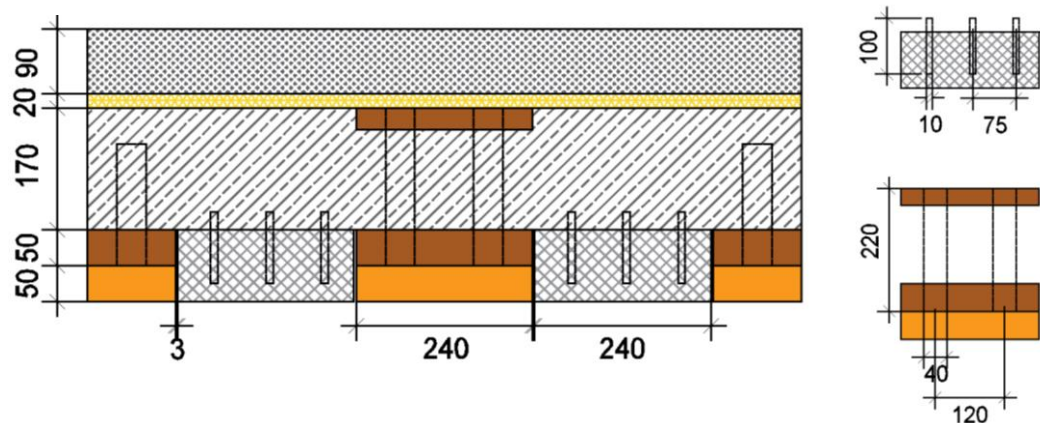
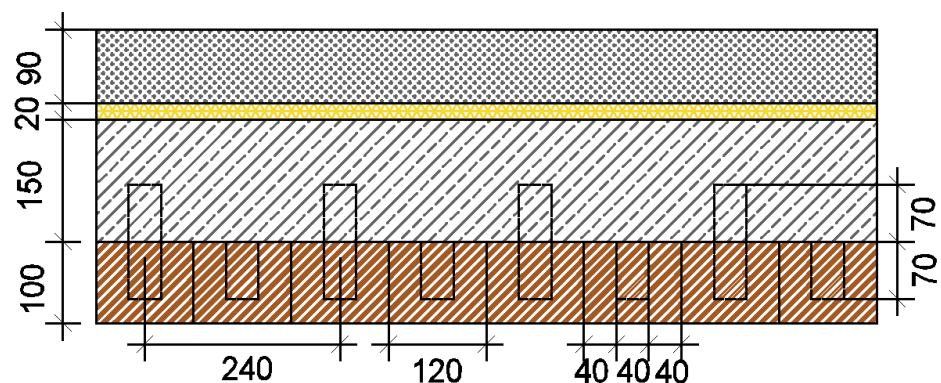


Abbildung 1: Vertikalschnitt der massiven Betondecke. Quelle: Berner Fachhochschule.



- | | |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| - 90 mm Unterlagsboden | - 90 mm Unterlagsboden |
| - 20 mm Trittschalldämmung | - 20 mm Trittschalldämmung |
| - 220 mm HB-Träger ausbetoniert | - 170 mm Überbeton C25/30 |
| Decklamelle C24, 30/240 mm | - 100 mm Betonelement vorfabriziert |
| Buchendübel d = 40 mm, a = 250 mm | b = 240 mm, mit Bewehrung |
| Traglamelle C24, 50/240 mm | |
| - 50 mm Topakustik | |

Abbildung 2: Vertikalschnitt der Betondecke mit Akustikelementen nach Angaben von Christoph Meier. Quelle: Berner Fachhochschule.



- 90 mm Unterlagsboden
- 20 mm Trittschalldämmung
- 150 mm Überbeton bewehrt
- 100 mm Buchenschnittholz;
 Buchendübel Ø40 mm, Abstand 500 mm
 Bohrung Ø40 mm, Abstand 250 mm

Abbildung 3: Vertikalschnitt der Holzbetonverbunddecke mit Buche nach Angaben von Christoph Meier. Quelle: Berner Fachhochschule.

Zunächst wird die dynamische Wärmekapazität der Deckenunterseite der Holz-betonverbunddecke mit Buche optimiert. Für die Optimierung werden unterschiedliche Profilierungen der Deckenunterseite untersucht.

Zur Optimierung der raumakustischen Eigenschaften der Deckenunterseite wird der Schallabsorptionsgrad der Deckenunterseite mit Profilierung im Hallraum bestimmt. Die Schallabsorption der Deckenunterseite wird durch Anbringen von

schallabsorbierenden Aussparungen, welche mit hochschalldämmenden Holzfaserdämmstoffen gefüllt werden, optimiert. Auch der Schallabsorptionsgrad einer optimierten Deckenunterseite wird im Hallraum gemessen.

Im Deckenprüfstand werden schliesslich die bauakustischen Parameter in Form von bewerteten Schalldämmmassen und von bewerteten Normtrittschallpegeln bestimmt.

5 Berechnung der wirksamen Wärmekapazität

Die Wärmekapazität oder Wärmespeicherfähigkeit eines Bauteils bezeichnet seine Fähigkeit, Energie in Form von Wärme aufzunehmen bzw. abzugeben. Die Wärmekapazität ist definiert als die Energie ΔQ , welche benötigt wird, um die Temperatur eines Bauteils um eine Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ zu erwärmen. Die Wärmekapazität κ ist dann als das Verhältnis von ΔQ und $\Delta\Theta$ definiert.

$$\kappa = \frac{\Delta Q}{\Delta\Theta} \quad \text{Formel 1}$$

Allerdings gilt diese Gleichung nur im stationären Zustand, d. h. wenn dem Bauteil genügend Zeit verbleibt, sich an die neuen Temperaturbedingungen anzupassen.

Bei sich zeitlich schnell ändernden Temperaturrandbedingungen steht für die Wärmespeicherung nicht die gesamte Wärmekapazität eines Körpers, sondern nur die Wärmekapazität der oberflächennahen Körperschichten zur Verfügung. Der Anteil der Wärmekapazität des Körpers, der dann für die Wärmespeicherfähigkeit zur Verfügung steht, wird als wirksame Wärmekapazität oder dynamische Wärmespeicherfähigkeit bezeichnet.

Da in der Realität auch in Räumen, besonders im Sommer, keine stationären, sondern dynamische Temperaturrandbedingungen in Räumen vorliegen, muss zur Berechnung der Wärmespeicherfähigkeit von Gebäuden die dynamische Wärmekapazität zur Berechnung der Speicherfähigkeit eines Raumes verwandt werden. Zu deren Ermittlung wird zunächst die wirksame Wärmespeicherfähigkeit der einzelnen Bauteile berechnet. Die wirksame Wärmekapazität des Raumes ergibt sich dann als Summe der wirksamen Wärmespeicherfähigkeiten der einzelnen raumbegrenzenden Bauteile.

5.1 Berechnung nach EN ISO 13786

Die Norm EN ISO 13786 *Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen – Dynamisch-thermische Kenngrößen – Berechnungsverfahren*, Ausgabe April 2008 stellt ein analytisches Verfahren zur Berechnung der wirksamen Wärmekapazität für sinusförmige Temperaturrandbedingungen zur Verfügung. Die Berechnung der dynamischen Wärmekapazität nach EN ISO 13786 ist allerdings auf homogene, ebene Bauteile beschränkt. Für die zeitliche Temperaturschwankung der Luft wird eine Sinusfunktion, welche um einen Mittelwert schwingt, angenommen.

Die Temperatur- bzw. Wärmestromdichteschwankung werden als komplexe Größen in Zeigerschreibweise geschrieben: $\Theta(t)$ bzw. $q(t)$

Diese Temperaturschwankung durchdringt das Bauteil. Die Fortpflanzung dieser Schwingung im Bauteil hängt von den wärmeschutztechnischen Größen der einzelnen Bauteilschichten, von der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität, ab.

Die dynamischen d. h. zeitabhängigen wärmeschutztechnischen Grössen des Bauteils werden in einer komplexen Matrix, Z_{ij} , zusammengefasst. Diese Matrix bestimmt die Weiterleitung der Temperatur- und Wärmestromdichteschwankung auf die gegenüberliegende Seite des Bauteils. Sie wird schliesslich mit folgendem Ansatz berechnet:

$$\begin{pmatrix} \Theta_e \\ q_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Theta_i \\ q_i \end{pmatrix} \quad \text{Formel 2}$$

Hierbei bezeichnet

- $\Theta_{e \text{ oder } i}$ die Temperatur an der Vorderseite, i, oder an der Rückseite des Bauteils, e.
- $q_{e \text{ oder } i}$ die Wärmestromdichte an der Vorderseite, i, oder an der Rückseite des Bauteils, e.

Aus dieser Gleichung kann mit geeigneten Randbedingungen die dynamische oder wirksame Wärmekapazität berechnet werden. Für Aussenbauteile, an denen raumseitig eine Temperaturschwankung der Raumluft anliegt, ist die wirksame Wärmekapazität κ auf der Raumseite gegeben als

$$\kappa = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_i}{\hat{\Theta}_i} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{11}}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 3}$$

Hier bezeichnet

- $\hat{\Theta}_{e \text{ oder } i}$ die Amplitude der Temperatur an der Vorderseite, i, oder an der Rückseite des Bauteils, e.
- $\hat{q}_{e \text{ oder } i}$ die Amplitude der Wärmestromdichte an der Vorderseite, i, oder an der Rückseite des Bauteils, e.

Für Innenbauteile, die an beiden Oberflächen einer Temperaturschwankung der Raumluft ausgesetzt sind, ergibt sich die wirksame Wärmekapazität der beiden Oberflächen

$$\kappa_1 = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_i}{\hat{\Theta}_i} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 4}$$

$$\kappa_2 = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_e}{\hat{\Theta}_e} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{22} - 1}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 5}$$

5.2 Berechnung mit dynamischen Wärmebrückenprogrammen

Aus dem ersten Teil von *Formel 3* bis *Formel 5* folgt, dass die wirksame Wärmekapazität eines Bauteils als der Quotient der Amplitude der Wärmestromdichteschwankung und der Amplitude der Temperaturschwankung der am Bauteil angrenzenden Luft, dividiert durch die Kreisfrequenz der Temperaturschwankung, ausgedrückt werden kann. Bei konstanter Kreisfrequenz, die im Weiteren mit

$\omega = \frac{2\pi}{24 \text{ h}}$ angenommen wird, wird die wirksame Wärmekapazität umso grösser, je grösser die Amplitude der Wärmestromdichte bei einer bestimmten Amplitude der Temperaturschwankung ist.

Dieser Zusammenhang wird nun genutzt, um die wirksame Wärmekapazität mit dem Wärmebrückenprogramm ANSYS [7] zu berechnen.

Für diese Berechnung wird die Bauteilgeometrie im Wärmebrückenprogramm modelliert. Als Randbedingung wird eine sinusförmige Temperaturschwankung, welche um einen Mittelwert schwankt, der angrenzenden Luft gemäss folgender Gleichung angesetzt:

$$\theta(t) = \theta_m + \hat{\theta} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{t}{T}\right) \quad \text{Formel 6}$$

Hierbei bezeichnet

- $\theta_m = 20^\circ \text{ C}$ den Mittelwert der Temperatur
- $\hat{\theta} = 5 \text{ K}$ die Amplitude der Temperaturschwankung
- t die Zeit in h
- $T = 24 \text{ h}$ die Periodendauer

Mit Hilfe des Wärmebrückenprogramms wird nun die zur Temperaturschwankung gehörende Schwankung der Wärmestromdichte durch die Oberfläche berechnet.

Da die Geschossdecke sowohl an der Deckenoberseite, als auch an der Deckenunterseite im thermischen Kontakt mit der Raumluft steht, ergeben sich verschiedene Werte für die dynamische Wärmekapazität der Deckenober- und der Deckenunterseite.

Allerdings konnte schon im Forschungsprojekt dynamische Wärmekapazität [1] gezeigt werden, dass die dynamische Wärmekapazität der Deckenoberseite vor allem durch die Eigenschaften der Unterlagsbodenplatte, der Dicke und des verwendeten Baustoffs und weniger durch die Rohdeckenkonstruktion, gegeben ist. Daher wird die wirksame Wärmekapazität der Deckenoberseite in diesem Bericht nicht weiter betrachtet.

Die Amplitude der Temperaturschwankung, $\hat{\theta}$, folgt aus der Festlegung der Randbedingungen. Die hieraus resultierenden Wärmestromdichten werden mit Wärmebrückenprogrammen berechnet. Mit den berechneten Wärmestromdichten wird die Amplitude der sinusförmigen Schwingung, \hat{q} , bestimmt.

Für die Deckenunterseite wird die wirksame Wärmekapazität κ als Quotient der Amplitude der Schwingung der Wärmestromdichte und der Amplitude der Schwingung der Temperatur wie folgt berechnet:

$$\kappa = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}}{\hat{\theta}} \quad \text{Formel 7}$$

5.2.1 Eigenschaften der Materialien

Die folgende Tabelle enthält die wärmeschutztechnischen Eigenschaften der Baustoffe, die für die Berechnung der dynamischen Wärmekapazität angesetzt werden.

Tabelle 2: Wärmeschutztechnische Eigenschaften für die Simulationen der dynamischen Wärmekapazität. Quelle: Berner Fachhochschule.

Material	Rohdichte ρ kg/m ³	Spezifische Kapazität c_p J/(kg·K)	Wärmeleitfähigkeit λ W/m·K		
Zement (Unterlagsboden)	2'200	1'008	1.4		
Trittschalldämmung	80	1'030	0.033		
Armierter Beton 2%	2'400	1'008	2.5		
Heraklith A2-M (25 bis 35mm)	440	2'100	0.081		
Schallabsorptionsplatte	30	1'500	0.025		
Buchenspäne	500	1'000	0.042		
Pavatherm-COMBI	145	2'100	0.041		
Buche (radial, tangential und longitudinal)	720	2'021	R=0.12	T=0.092	L= 0.257

5.2.2 Randbedingungen

Zur Berechnung der dynamischen Wärmekapazität der Deckenunterseite wird auf der Oberseite eine konstante Temperatur von 20 °C und an der Unterseite eine sinusförmige Temperaturrendbedingung mit einer Periode von 24 h und einer Amplitude von 5 K um einen Mittelwert von 20° C angenommen. Die Wärmeübergangswiderstände betragen für alle Oberflächen 0,13 m²K/W.

5.2.2.1 Werte der Ausgangskonstruktionen

Für alle Ausgangskonstruktionen der Deckensysteme wird die dynamische Wärmekapazität mit dem Verfahren der dynamischen Wärmebrückenberechnung bestimmt. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnungen in Form der Amplitude der Wärmestromdichte und der dynamischen Wärmekapazität für die Deckenunterseite jeder Decke.

Tabelle 3: Ergebnisse der Berechnungen der dynamischen Wärmekapazität der Ausgangskonstruktionen der Deckensysteme. Die erste Spalte zeigt einen Vertikalschnitt durch das Deckensystem, die zweite Spalte enthält die Amplitude der Wärmestromdichte und die dritte Spalte gibt die dynamische Wärmekapazität der Deckenunterseite an. Alle Masse sind in mm angegeben. Quelle: Berner Fachhochschule.

Decke	Amplitude der Wärmestromdichte \hat{q} in W/m ²	dynamische Wärmekapazität κ in kJ/(m ² K)]
Betondecke mit Akustikelement 	21.4	59
Betondecke 	32.2	89
HBV-Decke mit Buche 	11.8	32

5.2.2.2 Optimierung der dynamischen Wärmekapazität der HBV Decke

Die dynamische Wärmekapazität der Deckenunterseite der Holzbetonverbunddecke mit Buche wird durch verschiedene Profilierungen der Deckenunterseite verbessert. Hierfür werden folgende Profilierungen untersucht:

- Profilierte Decke (mit konischen Nuten)
- Variante A: Profilierte Decke mit schallabsorbierenden Kassetten, Steghöhe 150 mm
- Variante B: Profilierte Decke mit schallabsorbierenden Kassetten, Steghöhe 80 mm
- Variante C: Profilierte Decke mit Streifen aus schallabsorbierendem Polyurethanschaum, Dicke x Breite = 20 x 60 mm
- Variante D: Profilierte Decke mit gekreuzten Streifen aus schallabsorbierendem Polyurethanschaum, Dicke x Breite = 20 x 60 mm
- Variante E: Profilierte Decke mit Streifen aus schallabsorbierendem Heraklith A2-M, Dicke x Breite = 25 x 60 mm
- Variante F: Profilierte Decke mit gekreuzten Streifen aus schallabsorbierendem Heraklith A2-M, Dicke x Breite = 25 x 60 mm
- Variante G: Holzdecke mit Latten mit Streifen aus Heraklith A2-M, Dicke x Breite = 25 x 40 mm
- Variante H: Holzdecke mit Latten mit breiten Streifen aus Heraklith A2-M, Dicke x Breite = 25 x 80 mm
- Variante I: Holzdecke mit Latten mit Streifen aus Buchenspänen, Dicke x Breite = 25 x 40 mm
- Variante J: Holzdecke mit Latten mit breiten Streifen aus Buchenspänen, Dicke x Breite = 25 x 80 mm
- Variante K: Abgehängte Decke mit Lochplatte aus Buche mit Löchern $\varnothing = 20$ mm
- Variante L: Abgehängte Decke mit Lochplatte aus Buche mit Löchern $\varnothing = 20, 10$ und 5 mm

In Tabelle 4 sind die Geometrien der untersuchten Profilierungen in Form von Schnittzeichnungen dargestellt.

Tabelle 4: Varianten der Deckenunterseite der Holzbetonverbunddecke aus Buche zur Optimierung der Schallabsorption. Die Deckenkonstruktion wird in zwei aufeinander senkrecht stehenden Vertikalschnitten dargestellt. Alle Masse sind in mm angegeben. In den angegebenen Anlagen sind weitere Details der Deckenkonstruktionen angegeben. Quelle: Berner Fachhochschule.

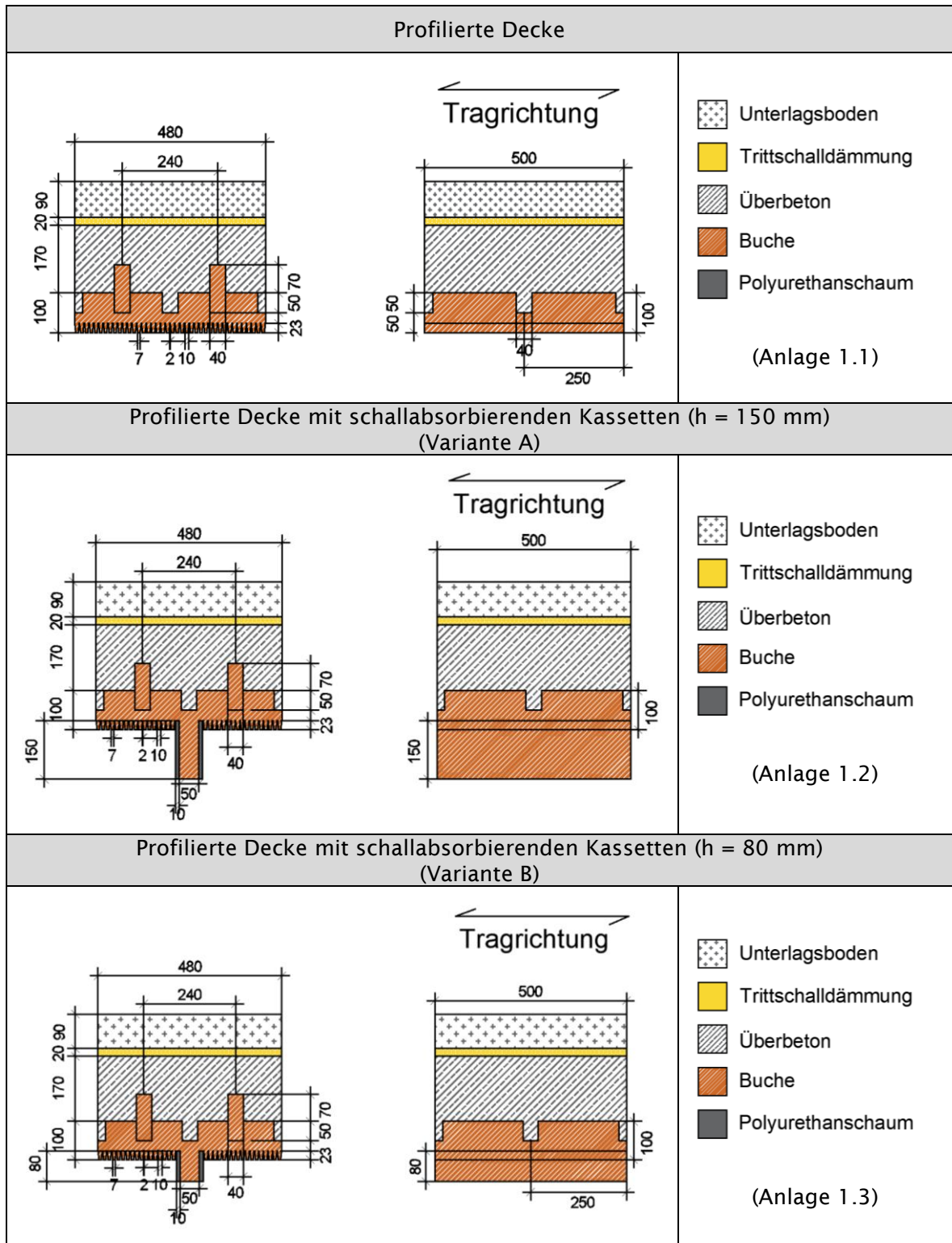


Tabelle 4 Fortsetzung 1

Profilierte Decke mit Streifen aus Polyurethanschaum 20 x 60 mm (Variante C)		
		(Anlage 1.4)
Profilierte Decke mit gekreuzten Streifen aus Polyurethanschaum 20 x 60 mm (Variante D)		
		(Anlage 1.5)
Profilierte Decke mit Streifen aus Heraklith A2-M 25 x 60 mm (Variante E)		
		(Anlage 1.6)

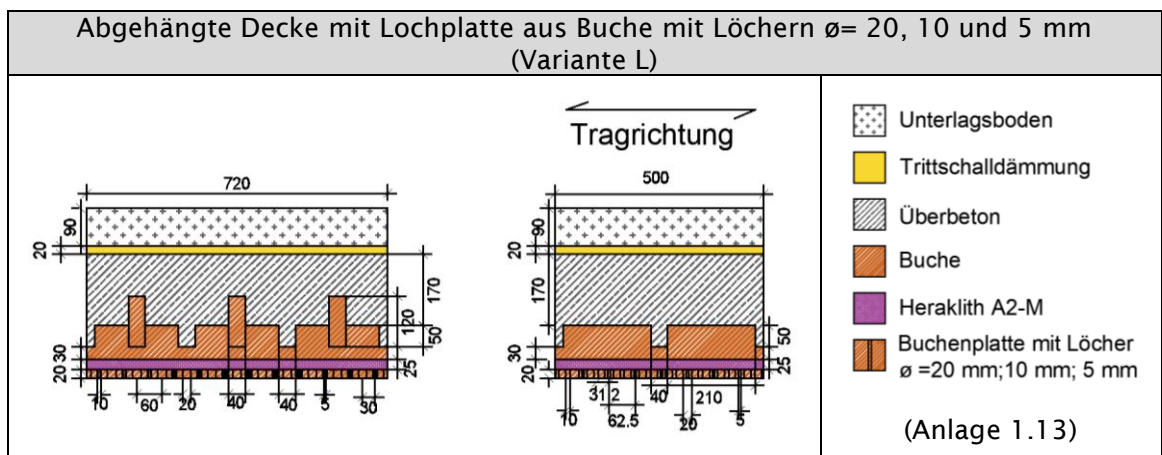
Tabelle 4 Fortsetzung 2

Profilierte Decke mit gekreuzten Streifen aus Heraklith A2-M 25 x 60 mm (Variante F)		
		<ul style="list-style-type: none"> Unterlagsboden Trittschalldämmung Überbeton Buche Heraklith A2-M <p>(Anlage 1.7)</p>
Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit Streifen aus Heraklith A2-M 25 x 40 mm (Variante G)		
		<ul style="list-style-type: none"> Unterlagsboden Trittschalldämmung Überbeton Buche Heraklith A2-M Vlies als Rieselschutz <p>(Anlage 1.8)</p>
Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit breiten Streifen aus Heraklith A2-M 25 x 80 mm (Variante H)		
		<ul style="list-style-type: none"> Unterlagsboden Trittschalldämmung Überbeton Buche Heraklith A2-M Vlies als Rieselschutz <p>(Anlage 1.9)</p>

Tabelle 4: Fortsetzung 3

Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit Streifen aus Buchenspäne 25 x 40 mm (Variante I)		
		<p>Tragrichtung</p>
<p> </p> <p>(Anlage 1.10)</p>		
Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit Streifen aus Buchenspäne 25 x 80 mm (Variante J)		
		<p>Tragrichtung</p>
<p> </p> <p>(Anlage 1.11)</p>		
Abgehängte Decke mit Lochplatte aus Buche mit Löchern $\varnothing=20$ mm (Variante K)		
		<p>Tragrichtung</p>
<p> </p> <p>(Anlage 1.12)</p>		

Tabelle 4 Fortsetzung 4



Die Ergebnisse für die dynamische Wärmekapazität der Deckenunterseite für verschiedene Profilierungen der HBV-Decke sind in der Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Zusammenstellung der dynamischen Wärmekapazitäten der Deckenunterseite der HBV-Decke mit Buche für die verschiedenen Profilierungen. Die erste Spalte zeigt eine perspektivische Darstellung der Deckenunterseite. Es wird auch die Verbesserung der dynamischen Wärmekapazität in % gegenüber dem Wert der Ausgangskonstruktion der HBV-Decke mit glatter Deckenunterseite angegeben. Quelle: Berner Fachhochschule.

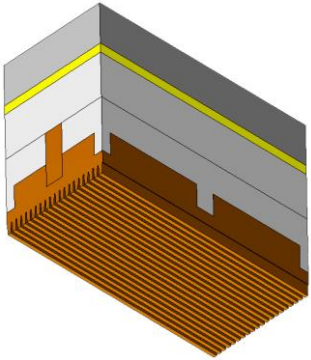
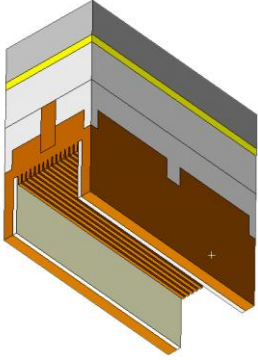
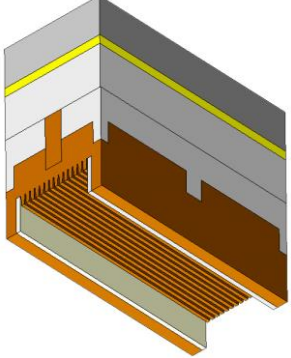
Deckentyp		Dynamische Wärmekapazität	
		κ in $\text{kJ}/(\text{m}^2\text{K})$	Verbesserung in %
Profilierte Decke		58	78
Variante A		71	118
Variante B		60	85

Tabelle 5 Fortsetzung 1

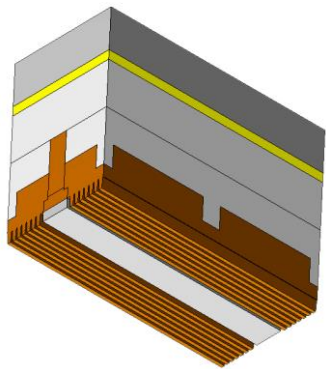
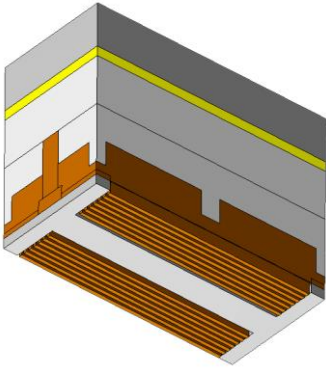
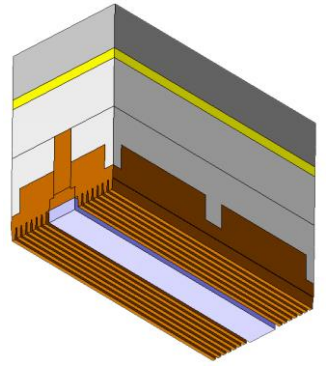
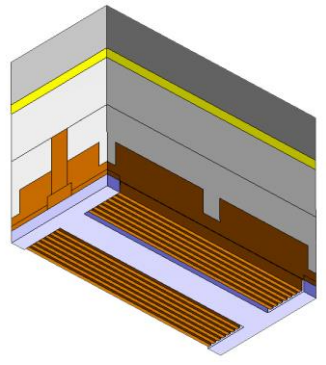
Deckentyp		Dynamische Wärmekapazität	
		κ in kJ/(m²K)	Verbesserung in %
Variante C		46	41
Variante D		44	35
Variante E		51	57
Variante F		50	54

Tabelle 5 Fortsetzung 2

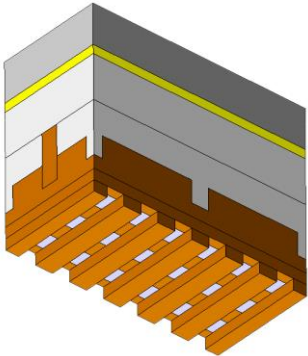
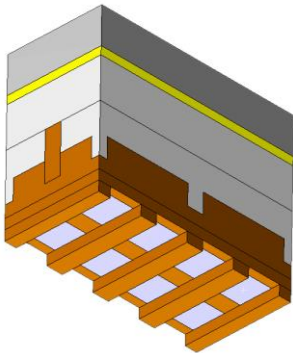
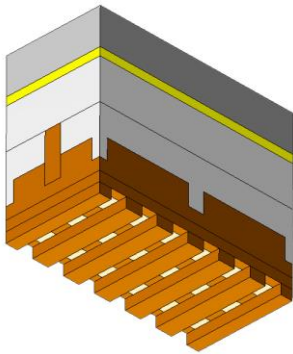
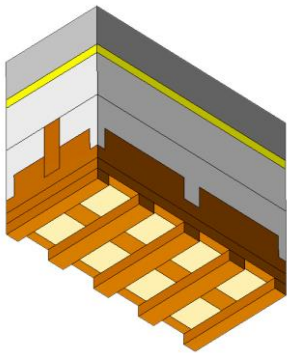
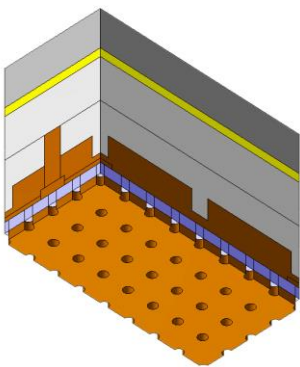
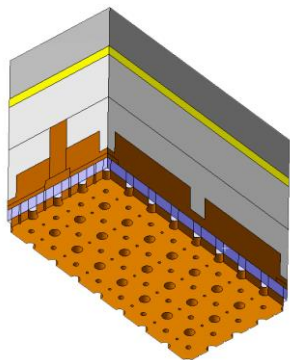
Deckentyp		Dynamische Wärmekapazität	
		κ in kJ/(m²K)	Verbesserung in %
Variante G		41	26
Variante H		36	11
Variante I		45	38
Variante J		36	11

Tabelle 5 Fortsetzung 3

Deckentyp		Dynamische Wärmekapazität	
		κ in $\text{kJ}/(\text{m}^2\text{K})$	Verbesserung in %
Variante K		38	17
Variante L		40	23

In Abbildung 4 sind die dynamischen Wärmekapazitäten der verschiedenen Profilierungen der Deckenunterseite der Holzbetonverbunddecke mit Buche zusammengestellt. Die rote Linie in diesem Diagramm entspricht dem Referenzwert der dynamische Wärmekapazität der Ausgangskonstruktion der Holzbetonverbunddecke mit glatter Deckenunterseite. Es ist zu erkennen, dass durch die Profilierung die dynamische Wärmekapazität der Deckenunterseite auf bis zu $72 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ erhöht werden kann.

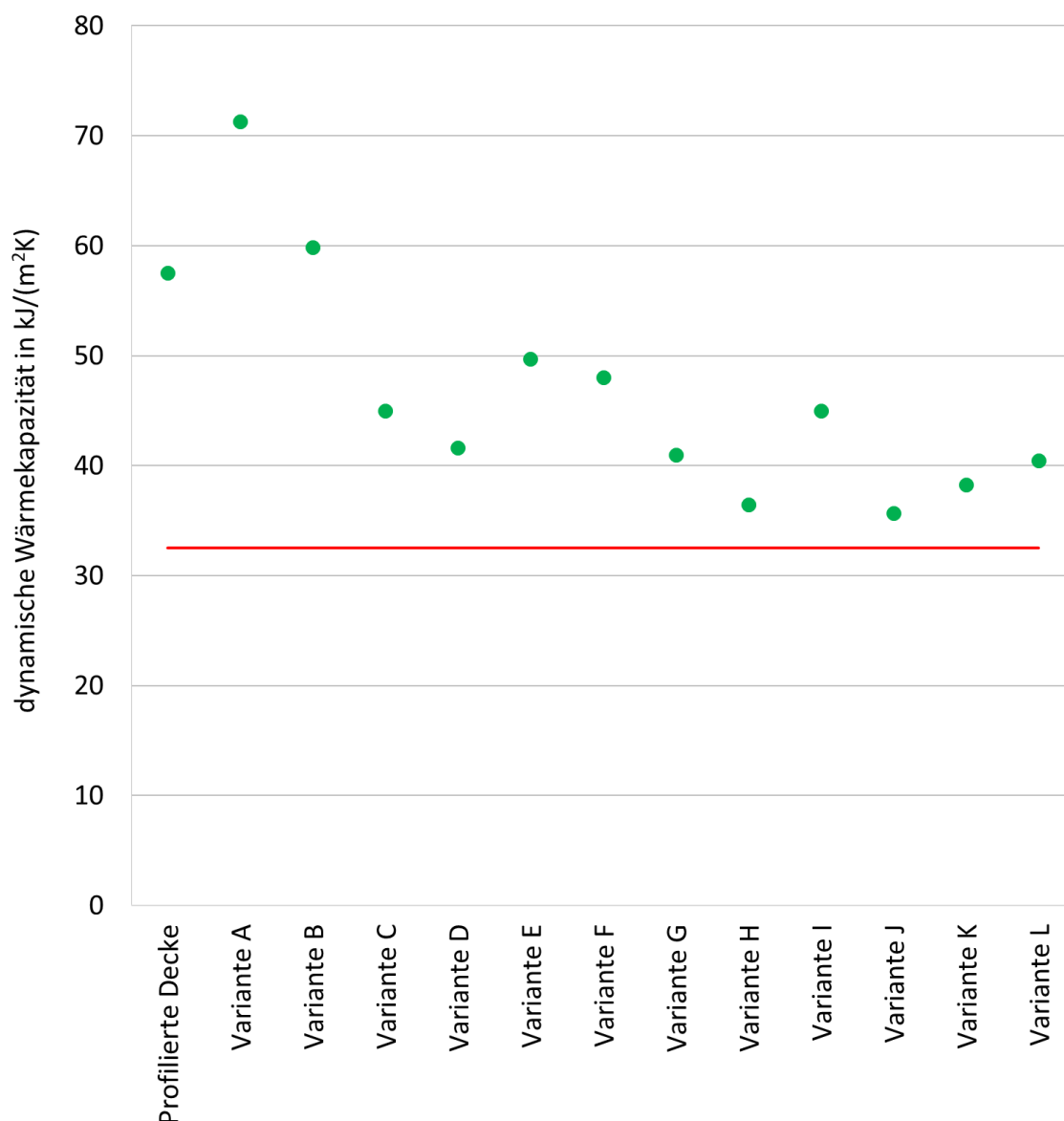


Abbildung 4: Dynamische Wärmekapazitäten der verschiedenen Profilierungen der Deckenunterseite der Holzbetonverbunddecke. Quelle: Berner Fachhochschule.

Die Deckenunterseite der Holzbetonverbunddecke beeinflusst die Wärmespeicherfähigkeit eines Raumes. Durch ihre schallabsorbierenden Eigenschaften hat sie aber auch einen wesentlichen Einfluss auf die Nachhallzeit im Raum unter der Decke. Es wird daher aus den betrachteten Varianten eine Konstruktion mit einer möglichst hohen dynamischen Wärmekapazität ausgewählt, mit der die schallabsorbierenden Eigenschaften der Deckenunterseite weiter untersucht werden.

5.2.3 Ausgangskonstruktion für die Optimierung der Schallabsorption

Aus den verschiedenen Deckenunterseiten wurde die Deckenkonstruktion ausgewählt, welche eine lineare Profilierung aufweist. In Tabelle 6 ist ein Vertikalschnitt der ausgewählten Holzbetonverbunddecke mit der Geometrie der Profilierung abgebildet. Mit dieser Profilierung konnte die dynamische Wärmekapazität der Deckenunterseite auf $58 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ erhöht werden, was einer Verbesserung der dynamischen Wärmekapazität der Deckenunterseite gegenüber einer glatten Deckenunterseite von 78 % entspricht.

Zur Verbesserung der raumakustischen Eigenschaften der Deckenunterseite werden nun Aussparungen an der Deckenunterseite angelegt, welche mit schallabsorbierenden Materialien ausgefüllt werden.

Tabelle 6: Vertikalschnitte der ausgewählten Holzbetonverbunddecke mit verschiedenen Profilierungen für die Optimierung der Schallabsorption. Es werden immer zwei aufeinander senkrecht stehende Schnitte gezeigt. Es werden für die Varianten nur die unteren 6 cm des Deckenaufbaus dargestellt. Alle Masse in mm. Quelle: Berner Fachhochschule.

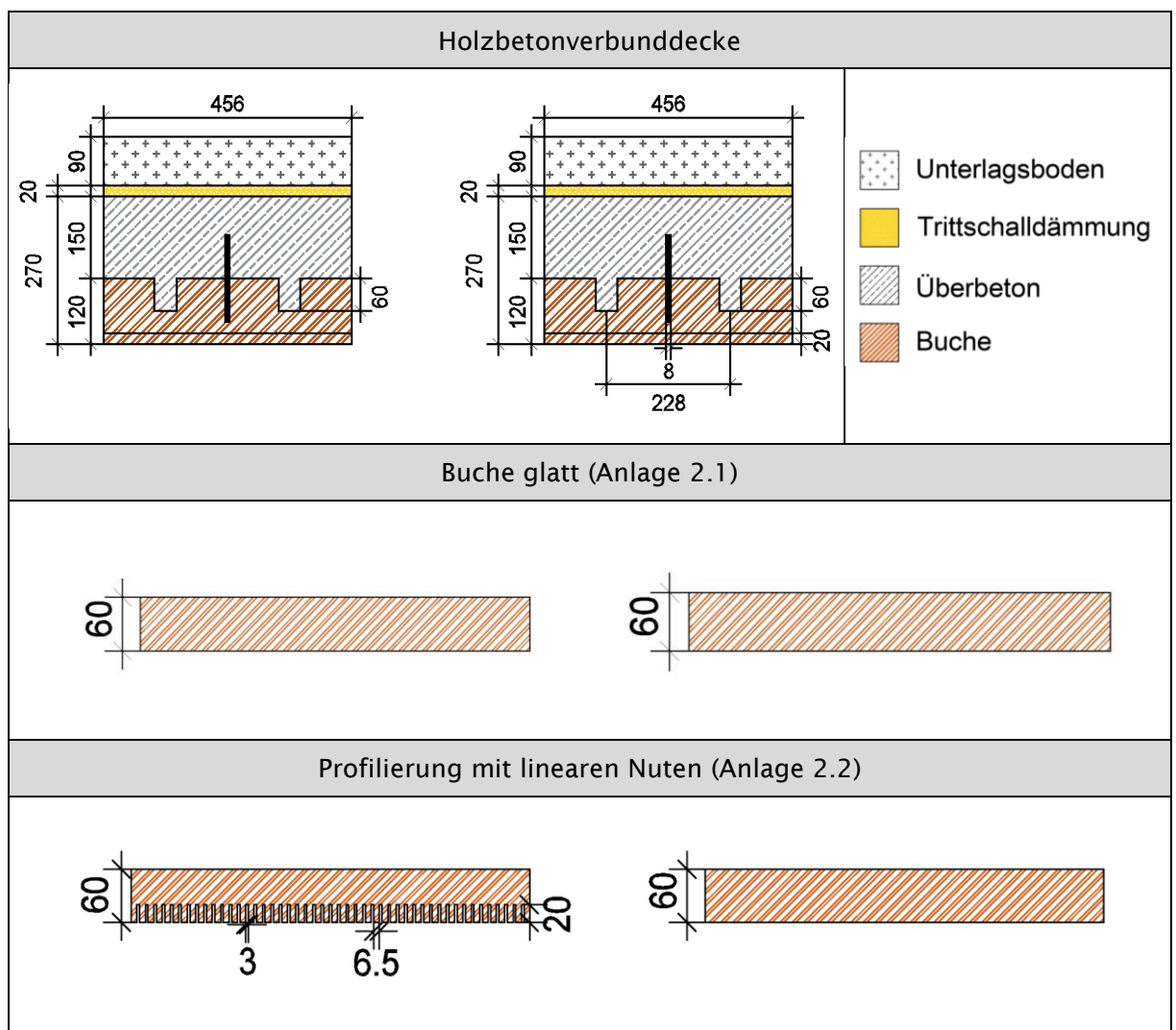
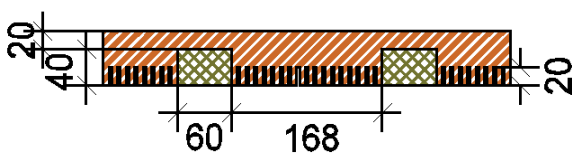
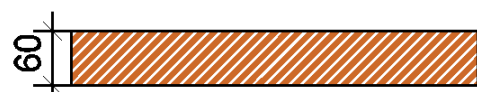
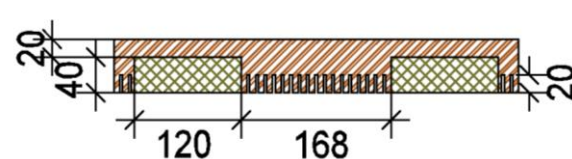

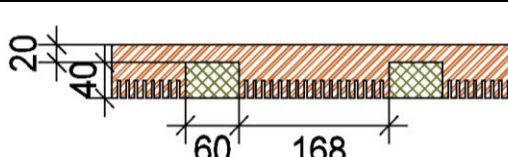
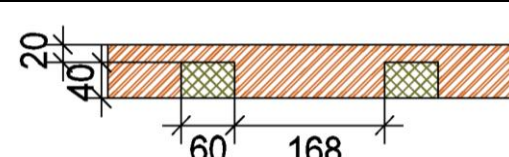
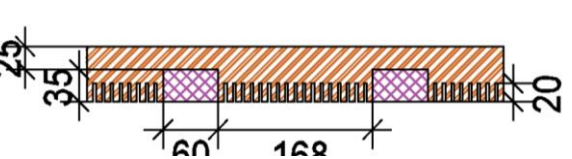

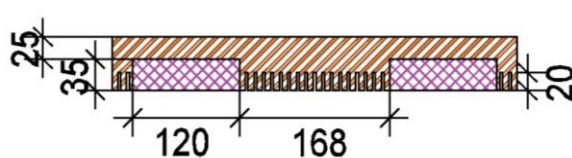

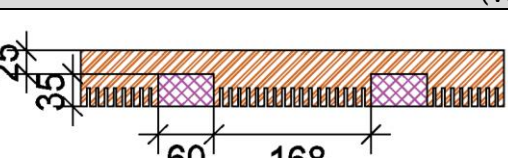
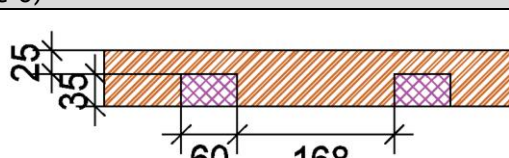


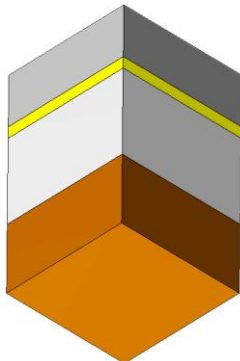
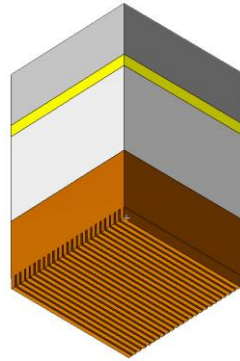
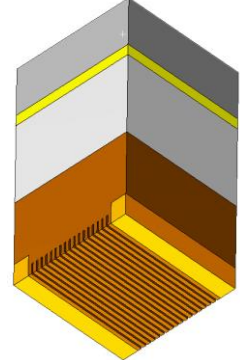
Tabelle 6 Fortsetzung 1

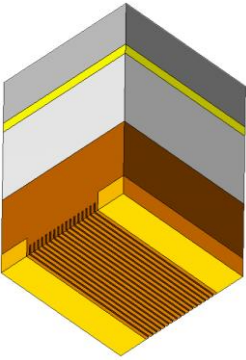
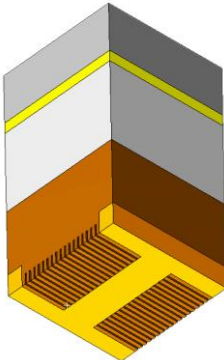
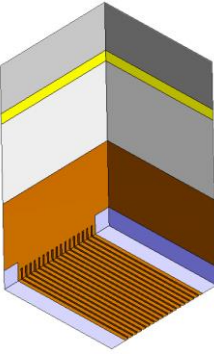
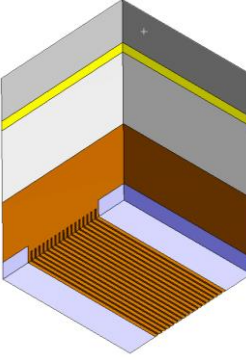
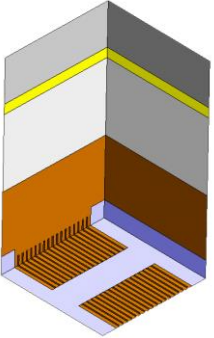
Profilierte Holzdecke mit Streifen aus Pavatherm-COMBI (Anlage 2.3) (Variante 1)	
	
Profilierte Holzdecke mit breiten Streifen aus Pavatherm-COMBI (Anlage 2.4) (Variante 2)	
	
Profilierte Holzdecke mit einem Kreuz aus Pavatherm-COMBI (Anlage 2.5) (Variante 3)	
	
Profilierte Holzdecke mit Streifen aus Heraklith A2-M (Anlage 2.6) (Variante 4)	
	
Profilierte Holzdecke mit breitem Streifen aus Heraklith A2-M (Anlage 2.7) (Variante 5)	
	
Profilierte Holzdecke mit einem Kreuz aus Heraklith A2-M (Anlage 2.8) (Variante 6)	
	

5.2.4 Ergebnisse der dynamischen Wärmekapazität der Holzbetonverbunddecke

Die Ergebnisse für die dynamische Wärmekapazität der Deckenunterseite für die Optimierung der Schallabsorption sind in der Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Zusammenstellung der dynamischen Wärmekapazitäten der Deckenunterseite der HBV-Decke mit Buche für die Optimierung der Schallabsorption. Es wird auch die Verbesserung der dynamischen Wärmekapazität in % gegenüber dem Wert der Ausgangskonstruktion in % angegeben. Quelle: Berner Fachhochschule.

Deckentyp		κ in kJ/(m ² K)	Verbesserung der dyn. Wärmekapazität κ in %
Buche glatt		36	12
Profilierung mit linearen Nuten		56	75
Variante 1		45	38

Variante 2		38	19
Variante 3		37	14
Variante 4		49	51
Variante 5		44	37
Variante 6		45	38

In Abbildung 5 sind die dynamischen Wärmekapazitäten der verschiedenen Profilierungen mit schallabsorbierendem Material der Holzbetonverbunddecke mit Buche zusammengestellt. Die rote Linie in diesem Diagramm, entspricht dem Referenzwert der dynamischen Wärmekapazität der Ausgangskonstruktion der Holzbetonverbunddecke. Durch diese Varianten kann die dynamische Wärmekapazität der Deckenunterseite mit Schallabsorption um bis zu 51 % erhöht werden.

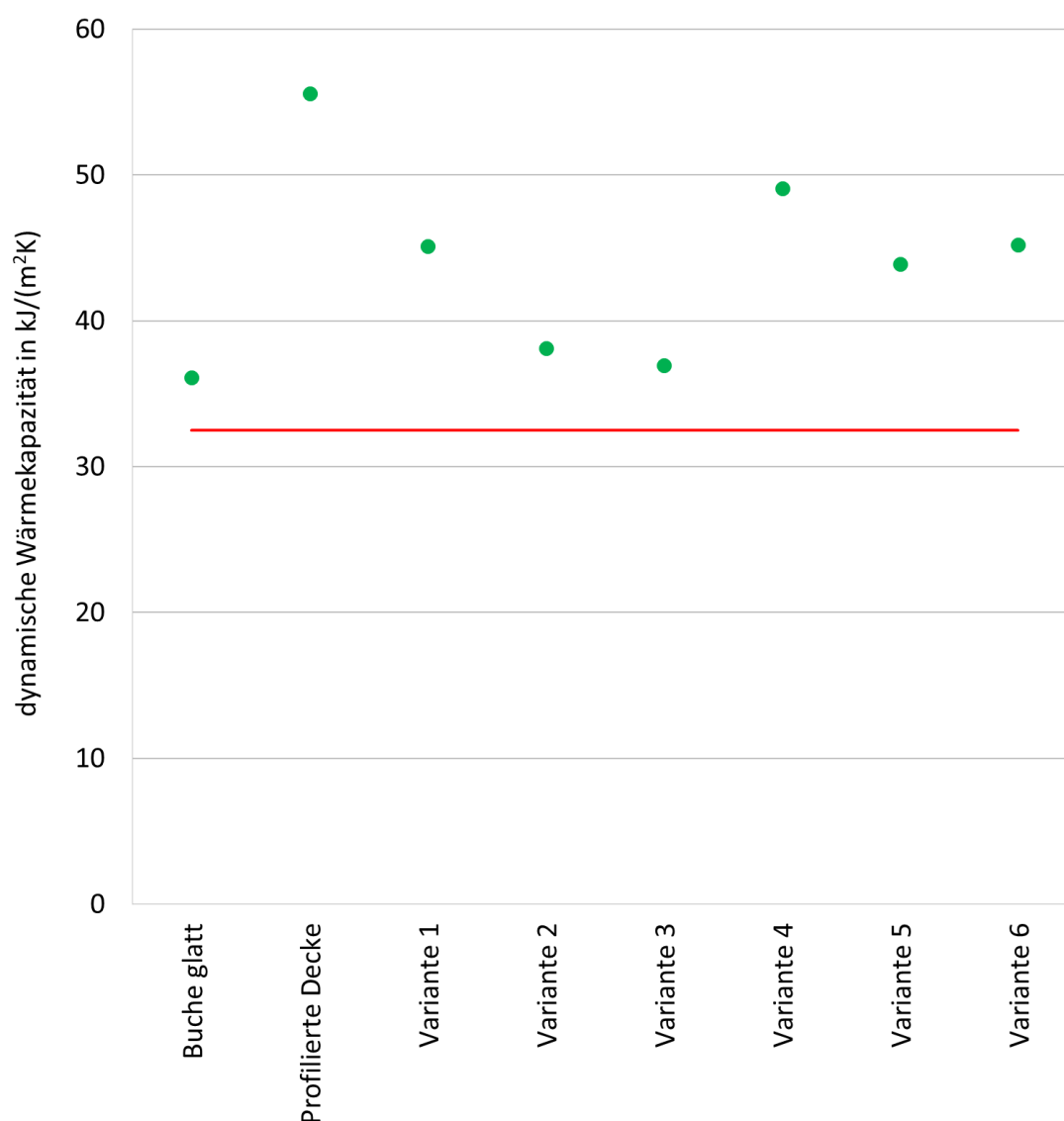


Abbildung 5: Dynamische Wärmekapazitäten für die verschiedenen schallabsorbierenden Varianten der Deckenunterseite der Holzbetonverbunddecke. Quelle: Berner Fachhochschule.

6 Optimierung der Schallabsorption der Deckenunterseite

6.1 Schallabsorptionsgrad

Fällt eine Schallwelle auf eine Oberfläche, so wird ein Teil der Schallenergie reflektiert und ein Teil absorbiert. Der Schallabsorptionsgrad α gibt den prozentualen Anteil der auffallenden Schallenergie an, der an der Oberfläche absorbiert wird.

$$\alpha = \frac{W_{abs}}{W_1} \quad \text{Formel 8}$$

Hierbei ist

- W_{abs} die absorbierte Leistung in W
- W_1 die auftreffende Leistung in W

Daher kann der Schallabsorptionsgrad Werte zwischen 0 (alles wird reflektiert) und 1 (alles wird absorbiert) annehmen. Oberflächen mit einem Schallabsorptionsgrad von 1 werden als schallabsorbierend, Oberflächen mit einem Schallabsorptionsgrad in der Nähe von 0 als schallhart bezeichnet.

Der Schallabsorptionsgrad α ist frequenzabhängig.

6.2 Äquivalente schallabsorbierende Fläche

Zur Charakterisierung der Fähigkeit zur Schallabsorption einer Oberfläche wird nun die sogenannte äquivalente schallabsorbierende Fläche, A , definiert. Diese äquivalente schallabsorbierende Fläche berechnet sich aus dem Produkt des Schallabsorptionsgrades und der geometrischen Fläche nach folgender Gleichung:

$$A = \alpha \cdot S \text{ in } m^2 \quad \text{Formel 9}$$

hierbei ist

- A die äquivalente schallabsorbierende Fläche in m^2
- α der Schallabsorptionsgrad (ohne Einheit)
- S die geometrische Fläche der Oberfläche in m^2

6.3 Optimierung der Deckenunterseite

Die Optimierung der Schallabsorption der Deckenunterseite erfolgte unter Berücksichtigung folgender Kriterien:

- die Konstruktionsteile sollen möglichst aus Buchenholz hergestellt werden können
- durch Einbau von Materialien mit einem hohen Schallabsorptionsgrad auf Teilflächen sollen die raumakustischen Eigenschaften der Deckenunterseite verbessert werden

Schallabsorbierende Materialien weisen in der Regel geringe Wärmeleitfähigkeit in der Grössenordnung der Wärmeleitfähigkeit von Wärmedämmungen auf. Daher dürfen diese Materialien nicht vollflächig auf der Deckenunterseite angebracht werden, da sonst die dynamische Wärmekapazität der Deckenunterseite zu stark reduziert würde.

Basierend auf diesen Voraussetzungen, werden verschiedene Decken entwickelt, die unterschiedliche Profilierungen und absorbierende Materialien kombinieren.

Es werden im Folgenden verschiedene Deckenaufbauten beschrieben. Die Aufbauten unterscheiden sich bezüglich der Gestaltung der Unterseite der Decke.

Hierbei wird unter der tragenden Deckenkonstruktion eine Profilierung der Decke erarbeitet, welche einen Kompromiss zwischen maximaler Schallabsorption und maximaler dynamischer Wärmekapazität darstellt.

Für die schallabsorbierenden Materialien kommen prinzipiell alle faserförmigen Platten in Frage. Für die Untersuchungen werden Holzfaserplatten der Firma Pavatex und magnesitgebundene Spanplatten der Firma Heraklith A2-M untersucht.

Für die Deckenunterseite werden folgende Varianten untersucht (Aufbau siehe Anlage 2):

- Profilierte Decke: in der Deckenunterseite wird eine lineare Profilierung eingearbeitet.
- Variante 1: Profilierte Holzdecke mit einem Streifen schallabsorbierendem Pavatherm-COMBI: Dieser Deckenaufbau stellt eine Kombination der profilierten Decke und Aussparungen dar, die mit schallabsorbierendem Material ausgefüllt werden ($h \times b = 40 \times 60 \text{ mm}$).
- Variante 2: Profilierte Holzdecke mit einem Streifen mit doppelter Fläche schallabsorbierendem Pavatherm-COMBI ($h \times b = 40 \times 120 \text{ mm}$).
- Variante 3: Profilierte Holzdecke mit Pavatherm-COMBI: Dies ist die gleiche Konstruktion wie zuvor, aber mit einem Kreuz aus schallabsorbierendem Material Pavatherm-COMBI ($h \times b = 40 \times 60 \text{ mm}$).
- Variante 4: Profilierte Holzdecke mit einem Streifen aus schallabsorbierendem Heraklith A2-M ($h \times b = 40 \times 60 \text{ mm}$).
- Variante 5: Profilierte Holzdecke mit einem Streifen mit doppelter Fläche schallabsorbierendem Heraklith A2-M: ($h \times b = 40 \times 120 \text{ mm}$).
- Variante 6: Profilierte Holzdecke mit einem Kreuz aus schallabsorbierenden Heraklith A2-M ($h \times b = 40 \times 60 \text{ mm}$).

6.3.1 Verwandte Materialien

Für die Varianten der Deckenunterseite werden repräsentative Materialien verwendet. Für die Holzfaserplatten wird die Platte Pavatherm - COMBI beispielhaft angesetzt. Ein Merkblatt des Herstellers mit den technischen Eigenschaften des Produkts ist als Anlage 3.1 angehängt.

Für die Platte aus Holzspänen wird als repräsentatives Material eine magnesithgebundene Platte, das Produkt Heraklith A2-M der Firma Knauf Insulation, in den Untersuchungen betrachtet. Ein Merkblatt des Herstellers mit den technischen Eigenschaften des Produkts ist als Anlage 3.2 angehängt.

6.3.2 Bestimmung der Schallabsorption

Für jede Variante der Deckenunterseite wird nun die Schallabsorption bestimmt.

6.3.2.1 Messung der Schallabsorption der Deckenunterseite

Die Schallabsorption einer Teilfläche kann in der Regel nicht berechnet, sondern muss in einem Prüfstand gemessen werden. Diese Prüfstandsmessung (Abbildung 6) wird im Hallraum der EPFL in Lausanne durchgeführt.



Abbildung 6: Aufnahme des leeren Hallraums des Prüfstands der EPFL in Lausanne. Quelle: Berner Fachhochschule.

Es werden die Schallabsorptionsgrade

- der Deckenunterseite mit profilierter Fläche
- und der Deckenunterseite mit profilierter Fläche und Aussparungen, gefüllt mit Pavatherm-COMBI

messtechnisch bestimmt.

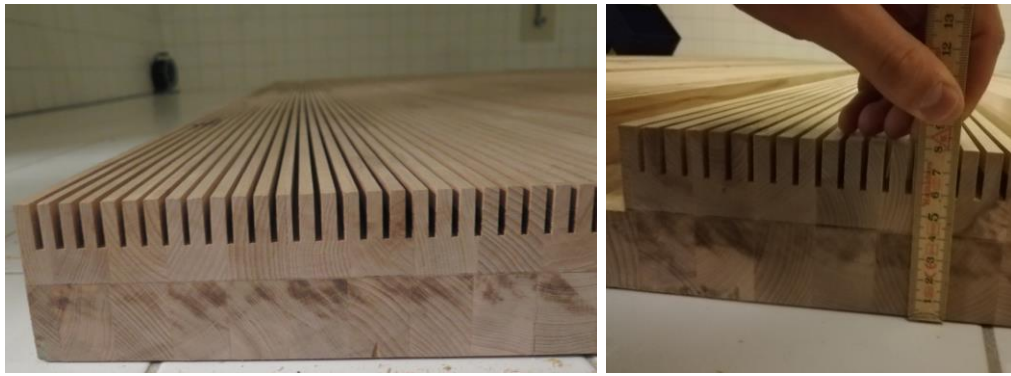
Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen Aufnahmen der untersuchten Prüfkörper.



Abbildung 7: Prüfkörper der Deckenunterseite mit Profilierung im Hallraum. Quelle: Berner Fachhochschule.



Abbildung 8: Prüfkörper der Deckenunterseite mit Profilierung und Aussparungen mit Pavatherm-COMBI im Hallraum. Quelle: Berner Fachhochschule.



*Abbildung 9: Detailaufnahme der linearen Profilierung der Deckenunterseite.
Quelle: Berner Fachhochschule.*

Die Messmethode und die Details der Messung der Schallabsorptionsgrade werden im Messbericht *Measurement of acoustic absorption coefficient after ISO 354 Assessment of 2 wooden samples provided by Berner Fachhochschule* vom 04.04.2019 der EPFL Lausanne detailliert beschrieben, welcher als Anlage beigelegt ist.

6.3.2.2 Messergebnisse der Schallabsorption

Die Messwerte der Schallabsorptionsgrade der beiden untersuchten Deckenunterseiten sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. Es wurden die Schallabsorptionsgrade von zwei Deckenunterseiten untersucht:

- Deckenunterseite mit linearer Profilierung (vergleiche Abbildung 7)
- Deckenunterseite mit linearer Profilierung und Aussparungen, gefüllt mit schallabsorbierendem Material (vergleiche Abbildung 8)

Tabelle 8: Zusammenstellung der Messwerte der Schallabsorptionsgrade der beiden Deckenunterseiten. Quelle: Berner Fachhochschule.

Frequenz in Hz	Deckenunterseite profiliert mit Pavatherm-COMBI	Deckenunterseite profiliert
100	0,03	0,03
125	0,04	0,03
160	0,12	0,05
200	0,16	0,09
250	0,21	0,10
315	0,29	0,09
400	0,45	0,11
500	0,53	0,12
630	0,57	0,12
800	0,53	0,13
1000	0,55	0,14
1250	0,52	0,15
1600	0,53	0,18
2000	0,52	0,21
2500	0,53	0,24
3150	0,59	0,30
4000	0,75	0,35
5000	0,84	0,26
6300	0,90	0,16
8000	0,83	

Die Schallabsorptionsgrade der Deckenunterseite mit Profilierung sind vergleichsweise gering. Allerdings kann durch die Anordnung des schallabsorbierenden Materials auf einem Viertel der Fläche der Deckenunterseite der Schallabsorptionsgrad in fast allen Frequenzen deutlich gesteigert werden. Abbildung 10 zeigt einen Vergleich der gemessenen Schallabsorptionsgrade der beiden Deckenunterseiten.

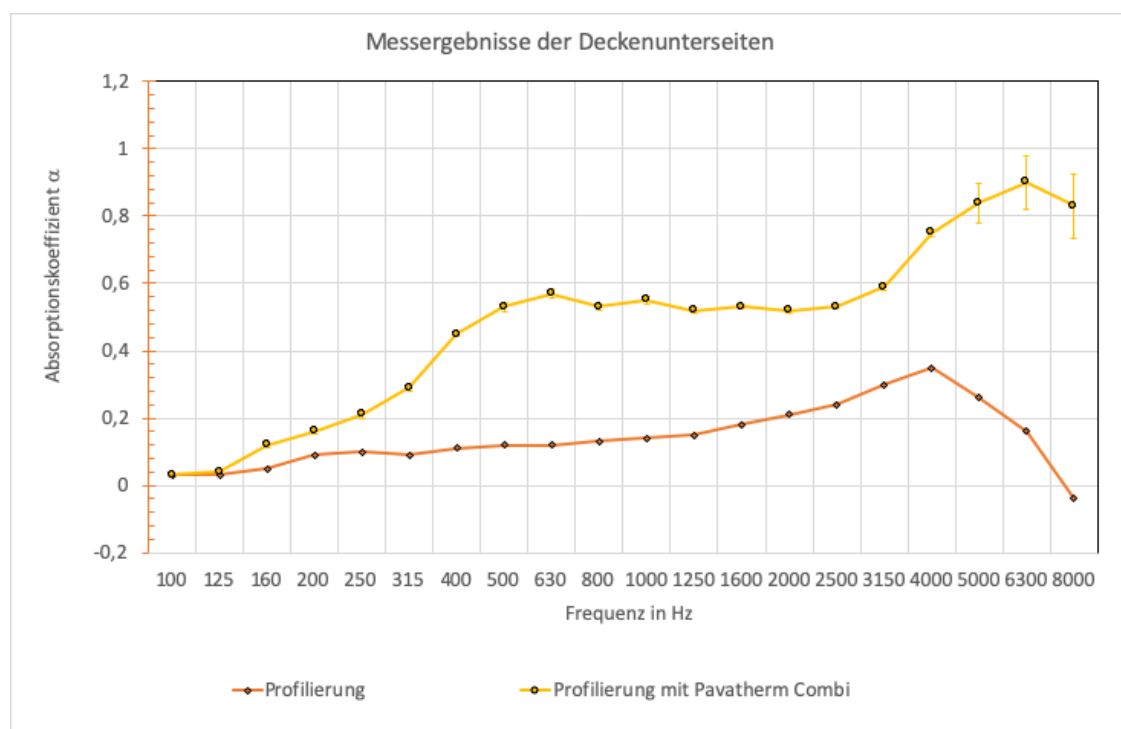


Abbildung 10: Vergleich der gemessenen Schallabsorptionsgrade der beiden Deckenunterseiten. Quelle: Berner Fachhochschule.

Wenn der Flächenanteil des schallabsorbierenden Materials an der Deckenunterseite vergrößert würde, könnten die Schallabsorptionsgrade der Deckenunterseite weiter erhöht werden. Da das schallabsorbierende Material aber auch eine vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit hat, darf nicht die gesamte Deckenunterseite mit ihm bedeckt werden. Sonst würde dies zu einer starken Reduzierung der dynamischen Wärmekapazität der Deckenunterseite führen.

6.3.3 Rechenmodell zur Abschätzung der Schallabsorptionsgrade

Die Messung der Schallabsorptionsgrade im Hohlraum ist vergleichsweise kosten- und arbeitsintensiv. Daher wäre ein Rechenmodell, mit dem sich der Schallabsorptionsgrad einer aus verschiedenen Teilflächen zusammengesetzten Deckenunterseite rechnerisch vorhersagen liesse, nützlich.

Die Deckenunterseite setzt sich aus Teilflächen mit unterschiedlichen Schallabsorptionsgraden zusammen. Sind die Schallabsorptionsgrade der Teilflächen bekannt, so kann mit diesen die äquivalente Schallabsorptionsfläche der gesamten Fläche wie folgt berechnet werden:

$$A_{ges} = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i \cdot S_i \text{ in } m^2 \quad \text{Formel 10}$$

Hierbei bezeichnet

- A_{ges} die äquivalente Schallabsorptionsfläche der gesamten Fläche in m^2
- α_i den Schallabsorptionsgrad (ohne Einheit) der i. Teilfläche
- S_i die geometrische Fläche des Materials in m^2 der i. Teilfläche
- n die Anzahl der Teilflächen

Aus dieser äquivalenten schallabsorbierenden Fläche der Deckenunterseite kann dann der Schallabsorptionsgrad mit folgender Gleichung abgeleitet werden.

$$\alpha_{ges} = \frac{A_{ges}}{S_{ges}} \quad \text{Formel 11}$$

Wendet man diese Formel auf die Deckenunterseite an und ersetzt die äquivalente Schallabsorptionsfläche A_{ges} durch das Produkt aus der geometrischen Fläche der Deckenunterseite, S_{ges} , und dem Schallabsorptionsgrad der Deckenunterseite, α_{ges} , so erhält man folgenden Zusammenhang:

$$\alpha_{ges} \cdot S_{ges} = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i \cdot S_i \text{ in } m^2 \quad \text{Formel 12}$$

Löst man diese Formel nach dem Schallabsorptionsgrad der Deckenunterseite auf und nimmt nur zwei Teilflächen an, so erhält man folgende Gleichung:

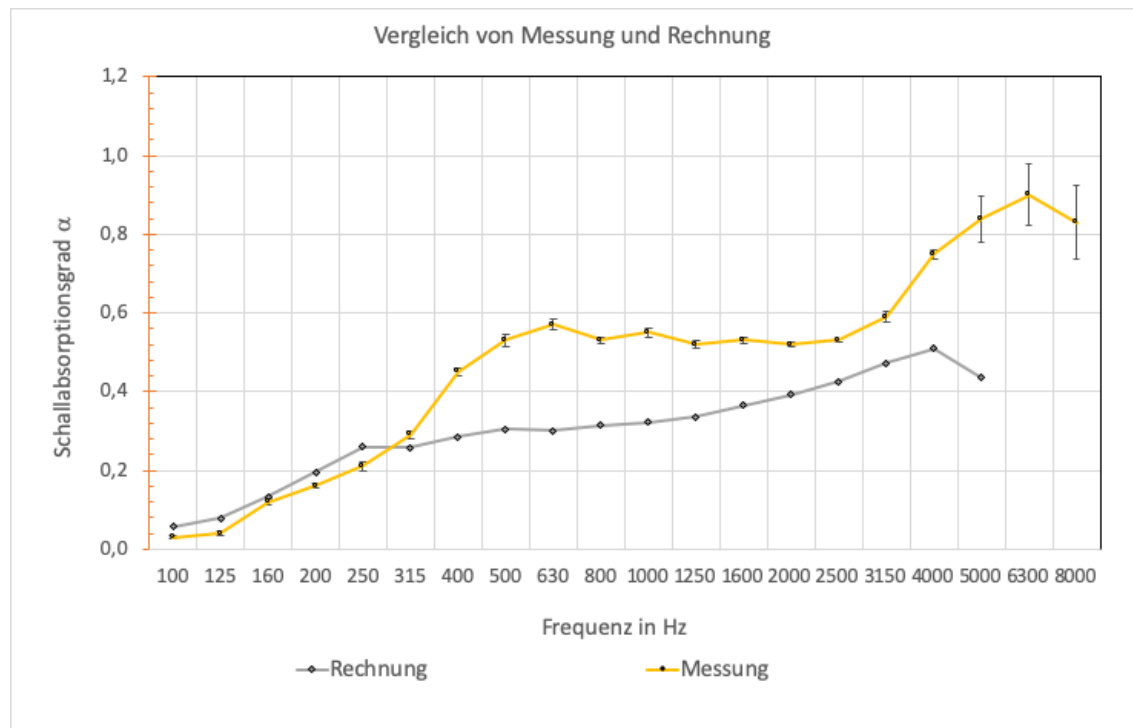
$$\alpha_{ges} = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2}{S_{ges}} = \alpha_1 \cdot f_1 + \alpha_2 \cdot f_2 \quad \text{Formel 13}$$

Hierbei bezeichnet

- $\alpha_{1,2}$ die Schallabsorptionsgrade der beiden Teilflächen
- $f_{1,2}$ die Flächenanteile der beiden Teilflächen

Damit steht ein einfaches Rechenmodell zur Verfügung, mit dem man den Schallabsorptionsgrad der, aus verschiedenen Teilflächen zusammengesetzten Deckenunterseite, berechnen kann. Es müssen lediglich die Schallabsorptionsgrade der Teilflächen und ihr Flächenanteil an der Deckenunterseite bekannt sein.

Die Schallabsorptionsgrade der Profilierungen können aus Tabelle 8 für die Teilfläche der Profilierung und aus dem technischen Merkblatt der Firma Pavatex in Anlage 3.1 für das Material Pavatherm-COMBI entnommen werden. Der Flächenanteil der Profilierung beträgt 75 %, der Flächenanteil des schallabsorbierenden Materials 25 %. Diese Berechnung wird für alle Frequenzen durchgeführt. Abbildung 11 stellt einen Vergleich zwischen den berechneten und den gemessenen Schallabsorptionsgraden dar.



*Abbildung 11: Vergleich der aus den schallabsorbierenden Eigenschaften der Teilflächen berechneten Werte mit den Messwerten der Deckenunterseite.
Quelle: Berner Fachhochschule.*

Es zeigt sich allerdings, dass die berechneten Werte der Schallabsorptionsgrade der Deckenunterseite nur bis zu einer Frequenz von 315 Hz mit den Messwerten übereinstimmen. Bei höheren Frequenzen werden Schallabsorptionsgrade gemessen, welche wesentlich höher als die berechneten Werte sind.

Das Rechenmodell berücksichtigt nur die Schallabsorptionsgrade von plattenförmigen Prüfkörpern der Teilflächen. Bei den Aussparungen handelt es sich aber um Streifen mit einer Breite von 6 cm. Offenbar weisen diese Streifen höhere Schallabsorptionsgrade auf, als sich aus den Schallabsorptionsgraden der flächigen Teilflächen ergibt.

Daher wird das Rechenmodell im weiteren als konservative Abschätzung verwandt, welche allerdings in allen Frequenzen auf der sicheren Seite liegt.

6.3.4 Schallabsorption verschiedener Deckenunterseiten

Mit dem oben beschriebenen Rechenmodell wird nun der Schallabsorptionsgrad für die Varianten der Deckenunterseiten mit verschiedenen schallabsorbierenden Materialien und Flächenanteilen berechnet.

Es werden folgende Varianten betrachtet:

- Variante 1: profilierte Deckenunterseite mit 60 mm breiten Streifen aus Pavatherm-COMBI
- Variante 2: profilierte Deckenunterseite mit 120 mm breiten Streifen aus Pavatherm-COMBI
- Variante 3: profilierte Deckenunterseite mit 60 mm breiten, gekreuzten Streifen aus Pavatherm-COMBI
- Variante 4: profilierte Deckenunterseite mit 60 mm breiten Streifen aus Heraklith A2-M
- Variante 5: profilierte Deckenunterseite mit 120 mm breiten Streifen aus Heraklith A2-M
- Variante 6: profilierte Deckenunterseite mit 60 mm breiten, gekreuzten Streifen aus Heraklith A2-M

In der nachfolgenden Tabelle sind die berechneten Schallabsorptionsgrade der verschiedenen Deckenunterseiten zusammengefasst.

Tabelle 9: Berechnete Schallabsorptionsgrade der Varianten der Deckenunterseite. Quelle: Berner Fachhochschule.

	Pavatherm COMBI			Heraklith A2-M		
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
Flächenanteil in %	26,3%	41,7%	45,7%	26,3%	41,7%	45,7%
Frequenz in Hz	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
100	0,06	0,08	0,08	0,04	0,04	0,04
125	0,08	0,11	0,12	0,04	0,05	0,05
160	0,14	0,19	0,20	0,06	0,07	0,07
200	0,20	0,27	0,28	0,10	0,10	0,10
250	0,27	0,37	0,39	0,11	0,11	0,11
315	0,27	0,37	0,40	0,11	0,12	0,12
400	0,29	0,40	0,43	0,13	0,14	0,15
500	0,31	0,43	0,46	0,16	0,18	0,18
630	0,31	0,42	0,45	0,17	0,20	0,21
800	0,32	0,44	0,47	0,20	0,24	0,25
1000	0,33	0,44	0,47	0,24	0,30	0,31
1250	0,34	0,46	0,49	0,29	0,37	0,39
1600	0,37	0,49	0,52	0,34	0,43	0,45
2000	0,40	0,51	0,54	0,33	0,41	0,42
2500	0,43	0,55	0,58	0,32	0,37	0,39
3150	0,48	0,59	0,62	0,34	0,37	0,37
4000	0,52	0,62	0,64	0,39	0,41	0,41
5000	0,44	0,55	0,58	0,37	0,44	0,45
6300	0,37	0,49	0,53	0,30	0,38	0,40
8000	0,25	0,40	0,44	0,18	0,28	0,31

In der nachfolgenden Abbildung sind die berechneten Schallabsorptionsgrade der sechs Varianten der Deckenunterseite ebenfalls dargestellt.

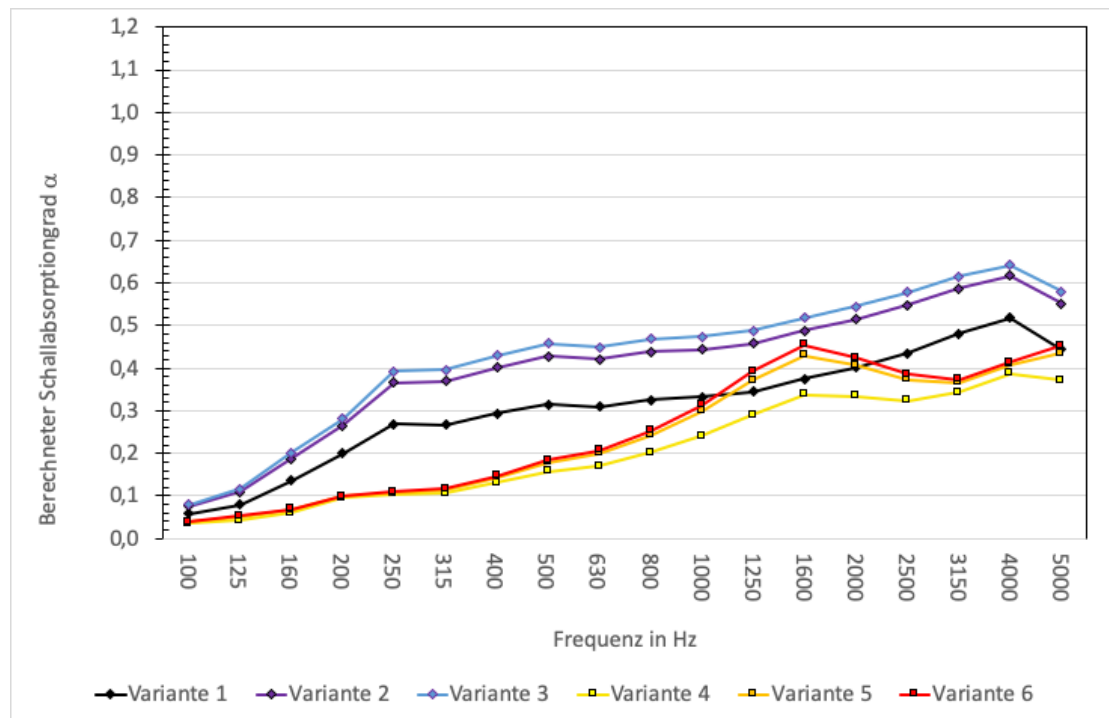


Abbildung 12: Zusammenfassung der frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade der sechs Varianten der Deckenunterseite der HBV-Decke. Quelle: Berner Fachhochschule.

6.3.5 Bewerteter Schallabsorptionsgrad nach EN ISO 11654

Um die Schallabsorption der Deckenunterseite mit nur einer Zahl ausdrücken zu können, wird für jede Variante der bewertete Schallabsorptionsgrad α_w nach EN ISO 11654 *Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden-Bewertung der Schallabsorption*, Ausgabe Juli 1997 gebildet.

Gemäß dieser Norm wird zunächst aus den in den Terzintervallen gemessenen Schallabsorptionsgraden, α_s , der praktische Schallabsorptionsgrad in der zugehörigen Oktave, α_p , berechnet. Die so berechneten Schallabsorptionsgrade werden dann mit einer Bezugskurve, welche ebenfalls in der Norm definiert wird, verglichen. Diese Bezugskurve wird so lange in Schritten von 0,05 in Richtung der Messwerte verschoben, bis die Summe der ungünstigen Abweichungen kleiner oder gleich 0,1 ist. Der bewertete Schallabsorptionsgrad α_w ist als Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz definiert.

Darüber hinaus werden auch Formindikatoren definiert, welche anzeigen, in welchem Bereich die Überschreitung der Bezugskurve durch die Messwerte auftritt: L wird für Überschreitungen bei tiefen Frequenzen, M für Überschreitungen bei mittleren Frequenzen und H für Überschreitungen bei hohen Frequenzen verwendet.

Die detaillierten Berechnungen des bewerteten Schallabsorptionsgrades nach EN ISO 11654 sind für die gemessenen Werte der Teilflächen Buche glatt, Profilierung, Pavatherm COMBI und Heraklith A2-M sowie für die berechneten Werte aller sechs Varianten der Deckenunterseite in den Anlagen 4.1 bis 4.10 dargestellt.

In der nachfolgenden Tabelle sind die bewerteten Schallabsorptionsgrade zusammengestellt.

Tabelle 10: Zusammenstellung der Bewertung der Schallabsorption der Deckenunterseiten nach EN ISO 11654. Quelle: Berner Fachhochschule.

Deckenunterseite	Bewerteter Schallabsorptionsgrad α_w	Schallabsorberklasse
Buche glatt	0,05	Nicht möglich
Buche profiliert	0,15 (H)	E
Pavatherm-COMBI 40 mm	0,90	A
Heraklith A2-M 35 mm	0,35 (H)	D
Variante 1	0,35 (H)	D
Variante 2	0,45 (H)	D
Variante 3	0,50	D
Variante 4	0,25 (H)	E
Variante 5	0,25 (H)	E
Variante 6	0,30	D



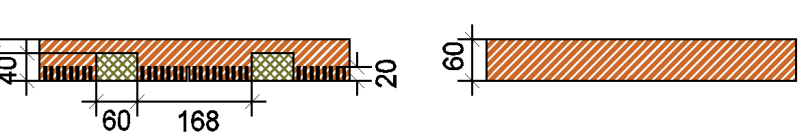

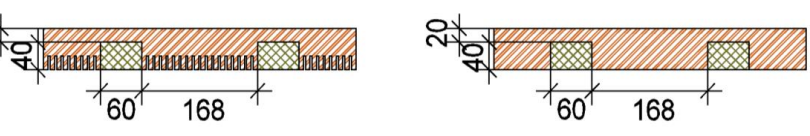
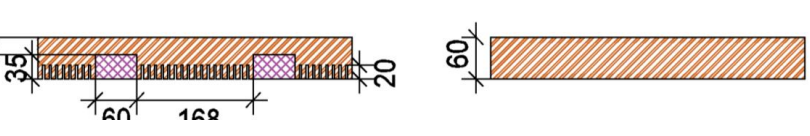

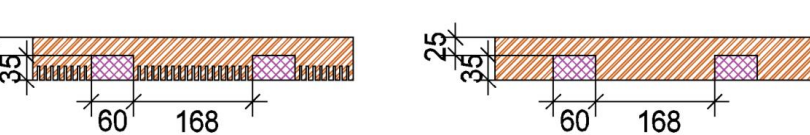
6.3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse für die Wärmespeicherfähigkeit in Form der dynamischen Wärmekapazität und für die Schallabsorption in Form der des bewerteten Schallabsorptionsgrades für die verschiedenen Decken Unterseiten der HBV Decke zusammengestellt.

Diese Ergebnisse finden sich auch detailliert im Bauteilkatalog, welcher als Anlage diesem Bericht beigelegt ist.

Diese Ergebnisse können nun für die Planung eines Gebäudes herangezogen werden, um die Wärmespeicherfähigkeit für den sommerlichen Wärmeschutz und die Raumakustik in den Räumen zu berechnen.

Tabelle 11: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wärmespeicherfähigkeit und der Schallabsorption der verschiedenen Varianten der Deckenunterseite der HBV-Decke. Es werden jeweils nur die unteren 8 cm des Deckenaufbaus dargestellt. Quelle: Berner Fachhochschule.

	Deckenunterseite der HBV-Decke	dyn. Wärmekapazität κ in kJ/(m ² K)	Schallabsorption α_w (-)
B. glatt		36	0,05
Profilierung		56	0,15 (H)
Variante 1		45	0,35 (H)
Variante 2		38	0,45 (H)
Variante 3		37	0,50
Variante 4		49	0,25 (H)
Variante 5		44	0,25 (H)
Variante 6		45	0,30

7 Schalldämmung der Geschossdecke

Durch die höhere Rohdichte des Buchenholzes gegenüber dem üblichen Bauholz, wie Fichte oder Tanne sollte eine Holzbetonverbunddecke mit Buchenholz einen höheren Schallschutz erreichen. Um diese Annahme zu verifizieren, wurde der Prototyp einer Holzbetonverbunddecke mit Buche gebaut. Der Luft- und Trittschallschutz dieser Geschossdecke wurde im Deckenprüfstand der eidgenössischen Material- und Prüfanstalt, EMPA, in Dübendorf messtechnisch überprüft.

Der so festgestellte Luft- und Trittschallschutz definiert die Leistungsfähigkeit der Geschossdecke für den direkten Schalldurchgang. Dieser muss bekannt sein, um in einem geplanten Gebäude den Luft- und Trittschallschutz zwischen Räumen, also unter Berücksichtigung der Schallübertragung der flankierenden Bauteile, berechnen zu können.

Es werden je zwei Messungen des Luft- und Trittschallschutzes, einmal der Rohdecke und zum zweiten Mal mit einem schwimmenden Unterlagsboden durchgeführt. Durch die Kombination dieser beiden Messungen kann die Leistungsfähigkeit des schwimmenden Unterlagsboden bei der Verbesserung des Luft- und Trittschallschutzes der Geschossdecke, welcher bei Holzbaukonstruktionen von der Konstruktion der Rohdecke abhängt, bestimmt werden.

Abbildung 13 zeigt eine Aussenaufnahme des Prüfstandes.



Abbildung 13: Aussenansicht des Deckenprüfstandes der EMPA. Quelle: EMPA Dübendorf.

7.1 Luftschalldämmung

Zur Beschreibung der Luftschalldämmung der Geschossdecke wird das Schalldämmmass R verwendet. Dabei wird das zu untersuchende Bauteil mit einem Dodekaeder beschallt und die Schallpegeldifferenz zwischen Sende- und Empfangsraum gemessen.

Die Messung der Luftschalldämmung der Bauteile erfolgt nach EN ISO 10140-2. Das Schalldämmmass, R wird ermittelt gemäss Gleichung (4) aus EN ISO 10140-2:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{A} \right) \text{ dB} \quad \text{Formel 14}$$

Dabei steht

- L_1 für den Schalldruckpegel im Senderaum in dB
- L_2 für den Schalldruckpegel im Empfangsraum in dB
- S für die Fläche des Bauteils in m^2
- A für die äquivalente schallabsorbierende Fläche im Empfangsraum in m^2

Das Schalldämmmass kennzeichnet den Luftschallschutz des trennenden Bauteils. Aus diesem Luftschallschutz des trennenden Bauteils kann dann der Schallschutz zwischen Räumen berechnet werden. Der Schallschutz zwischen Räumen wird in der Schweiz durch die Summe aus der bewerteten Standardschallpegeldifferenz, dem Spektrumsanpassungswert und einer Volumenkorrektur definiert.

Die Standardschallpegeldifferenz, D_{nT} , wird aus dem Schalldämmmass, R , mit folgender Formel errechnet:

$$D_{nT} = R + 10 \cdot \lg \left(\frac{V}{S} \cdot \frac{1}{m} \right) - 4,9 \text{ dB} \quad \text{Formel 15}$$

Dabei steht

- R für das Schalldämmmass in dB
- V für das Volumen des Empfangsraums

7.2 Trittschalldämmung

Zur Beschreibung des Trittschallschutzes zwischen den Räumen wird der sogenannte Norm-Trittschallpegel L_n verwendet.

Dabei wird das zu untersuchende Bauteil mit einem Normhammerwerk beklopft und der Schallpegel des Geräuschs im Empfangsraum mit Mikrofonen gemessen.

Die Messung der Trittschalldämmung zwischen den Räumen erfolgt nach EN ISO 10140-3.

Der Norm-Trittschallpegel wird nach Gleichung (1) von EN ISO 10140-3 ermittelt:

$$L_n = L_i + 10 \cdot \lg\left(\frac{A}{A_0}\right) \text{ dB}$$

Dabei steht:

- L_i für den mittleren Trittschallpegel je Terz im Senderraum in dB
- A für die äquivalente Schallabsorptionsfläche im Empfangsraum in m^2
- A_0 für die Bezugs-Absorptionsfläche im Empfangsraum ($A_0 = 10 \text{ m}^2$).

Der bewertete Norm-Trittschallpegel kennzeichnet den Trittschallschutz der Geschossdecke. Mit diesem Trittschallschutz der Geschossdecke kann der Trittschallschutz zwischen zwei Räumen, also unter Berücksichtigung der Trittschallübertragung über flankierende Bauteile, berechnet werden.

Der Trittschallschutz zwischen zwei Räumen wird in der Schweiz durch die Summe aus dem bewerteten Standard-Trittschallpegel, $L_{nT,w}$, dem Spektrumsanpassungswert C_i und einer Volumenkorrektur definiert.

Der Standard-Trittschallpegel, L_{nT} , wird aus dem Normtrittschallpegel mit folgender Gleichung berechnet:

$$L_{nT} = L_n - 10 \cdot \lg\left(\frac{V}{1 \text{ m}^3}\right) + 14,9 \text{ dB} \quad \text{Formel 16}$$

Dabei steht

- V für das Volumen des Empfangsraums

7.3 Bestimmung der Einzahlangaben

Aus den in den Terzbändern gemessenen Schalldämm-Massen bzw. den Norm-Trittschallpegeln werden Einzahlangaben gebildet.

7.3.1 Bestimmung des bewerteten Schalldämmmasses

Die Einzahlangabe des bewerteten Schalldämm-Masses berechnen wir für jede Messung nach EN ISO 717 – 1, durch Vergleich der Messwerte mit einer Bezugskurve. Das bewertete Schalldämmmass wird mit einem Index w , also R_w gekennzeichnet.

Darüber hinaus werden die Spektrumsanpassungswerte C , C_{tr} , $C_{50-3150}$, $C_{tr,50-3150}$, $C_{50-5000}$, $C_{tr,50-5000}$, $C_{100-5000}$ und $C_{tr,100-5000}$ nach EN ISO 717-1 ermittelt.

7.3.2 Bestimmung des bewerteten Norm-Trittschallpegels

Die Einzahlangabe des bewerteten Norm-Trittschallpegels berechnen wir für jede Messung nach EN ISO 717 – 2, durch Vergleich der Messwerte mit einer Bezugskurve.

Der bewertete Norm-Trittschallpegel wird mit einem Index w , also $L_{n,w}$ gekennzeichnet.

Darüber hinaus werden die Spektrumsanpassungswerte C_l und $C_{l,50-2500}$ nach EN ISO 717-2 ermittelt.

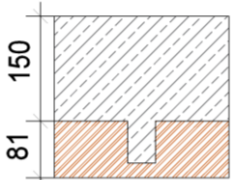
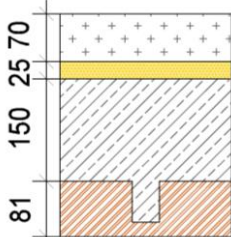
Die Messungen werden im beiliegenden Messbericht detailliert beschrieben.

7.4 Aufbau der trennenden Geschossdecken

Es werden die Schalldämmmasse und die Normtrittschallpegel einer Holzbetonverbunddecke aus Buche ermittelt. Dieses Deckenelement wird einmal als Rohdecke und einmal mit einem schwimmenden Unterlagsboden gemessen.

Die Konstruktion der trennenden Geschossdecke ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Die Konstruktion wird jeweils von oben nach unten beschrieben.

Tabelle 12: Beschreibung der Holzbetonverbunddecke von oben nach unten, ohne und mit Unterlagsboden. Quelle: Berner Fachhochschule.

HBV-Decke (in mm)	Beschreibung der Bauteilschichten
Geschossdecke	
	<ul style="list-style-type: none"> - 231 mm Holzbetonverbunddecke <ul style="list-style-type: none"> - 150 mm armerter Beton, $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ (*) - 81 mm Buche, $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$ (*)
Geschossdecke + Unterlagsboden	
	<ul style="list-style-type: none"> - 70 mm Betonplatte, $\rho \approx 2450 \text{ kg/m}^3$ - 25/22 mm Trittschalldämmung ISOVER PS81, $s' = 7 \text{ MN/m}^3$ (*) - 231 mm Holzbetonverbunddecke <ul style="list-style-type: none"> - 150 mm Beton, $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ (*) - 81 mm Buche, $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$ (*)
(*) nach Herstellerangabe	

7.5 Schalldämmung der Holzbetonverbunddecke

Mit der Holzbetonverbunddecke als trennendes Element wird die Schalldämmung des Prüfstands zwischen den beiden Räumen für den Luft- und den Trittschallschutz bestimmt. Die Luftschalldämmung wird in beiden Richtungen, von oben nach unten und von unten nach oben ermittelt. Da die Schallübertragung über die Prüfstandswände nach Angabe der Mitarbeiter der EMPA unterdrückt wird, handelt es sich hier um die Werte für die direkte Luft- und Trittschallübertragung ohne die Schallübertragung über flankierende Wände, also das Schalldämmmass R und den Norm-Trittschallpegel L_n .

7.6 Messergebnisse der Direktschallübertragung

In Tabelle 13 sind die Messergebnisse der beiden Luft- und Trittschallmessungen in Form der Einzahl- und der Spektrumsanpassungswerte zusammengestellt. Für die Luftschalldämmung wird jeweils der Mittelwert der beiden Messungen von Raum A nach Raum B und von Raum B nach Raum A aufgeführt.

Es werden ausserdem die Anlagen angegeben, in denen die Messergebnisse beschrieben werden.

Tabelle 13. Einzahlwerte und Spektrumanpassungswerte der Luftschalldämmung und der Trittschalldämmung für die direkte Schallübertragung der Geschossdecke. Quelle: Berner Fachhochschule.

Senderraum-Empfangsraum	HBV		HBV + UB	
	A-B	B-A	A-B	B-A
Luftschalldämmung	Anlage 5.1	Anlage 5.2	Anlage 5.3	Anlage 5.4
R_w	55.2	54.3	74.4	74.8
C	-1	-1	-2	-1
C_{tr}	-4	-5	-7	-6
$C_{50-5000}$	0	-1	-8	-6
$C_{tr,50-5000}$	-5	-6	-22	-20
$C_{50-3150}$	-1	-2	-9	-7
$C_{tr,50-3150}$	-5	-6	-22	-20
$C_{100-5000}$	0	0	-1	-1
$C_{tr,100-5000}$	-4	-5	-7	-7
Trittschalldämmung	Anlage 6.1		Anlage 6.2	
$L_{n,w}$	82.7		47.2	
C_i	-12		-4	
$C_{i,50-2500}$	-12		0	

7.7 Schallschutz von Raum zu Raum

Um einen Eindruck von dem Luft- und Trittschallschutz von Raum zu Raum zu erhalten, wird der Schallschutz von Raum zu Raum für den Luft- und Trittschallschutz aus den Schallschutzwerten der Geschossdecke für die Prüfstandsgeometrie berechnet.

Für die Umrechnung der gemessenen Werte in andere akustische Grössen sind die Werte für die Geometrie des Prüfstands in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 14: Geometrie des Prüfstands. Quelle: Berner Fachhochschule.

Geometrie	Abmessung HBV	Abmessung HBV mit UB
Volumen des oberen Raums A	93.9 m ³	91.5 m ³
Volumen des unteren Raums B	88.8 m ³	88.8 m ³
Fläche der trennenden Geschossdecke S	24.07 m ²	24.07 m ²

Die Berechnung des Luft- und Trittschallschutzes von Raum zu Raum erfolgt nur für die Geschossdecke mit schwimmenden Unterlagsböden, da dies die in der Praxis übliche Lösung ist.

7.7.1 Luftschallschutz

In einem ersten Schritt wird aus dem bewerteten Schalldämmmass der Geschossdecke die bewertete Standardschallpegeldifferenz mit Formel 15 berechnet:

$$D_{nT,w} = R_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{V}{S} \cdot \frac{1}{m} \right) - 4,9 \text{ dB} \quad \text{Formel 17}$$

$$= 74,4 \text{ dB} + 10 \cdot \lg \left(\frac{88,8 \text{ m}^3}{24,1 \text{ m}^2} \cdot \frac{1}{m} \right) - 4,9 \text{ dB} = 75,2 \text{ dB}$$

Nimmt man den unteren Raum des Prüfstandes als Empfangsraum, so ergibt sich aus dem Volumen von 88,8 m³ eine Volumenkorrektur von $C_v = 0 \text{ dB}$.

Für den Luftschallschutz von Raum zu Raum, $D_{i,tot}$ ergibt sich hieraus:

$$D_{i,tot} = D_{nT,w} + C - C_v = 75,2 \text{ dB} - 2 \text{ dB} - 0 \text{ dB} = 73,2 \text{ dB} \quad \text{Formel 18}$$

7.7.2 Trittschallschutz

Bei der Berechnung des Trittschallschutzes von Raum zu Raum dürfen gemäss SIA 181 *Schallschutz im Hochbau* [8] nur Spektrumsanpassungswerte aus Messungen berücksichtigt werden, die grösser als 0 dB sind, welche den Trittschallschutz also verschlechtern.

Zunächst ist auch hier der bewertete Standardtrittschallpegel zu berechnen.

$$L_{nT,w} = L_{n,w} - 10 \cdot \lg\left(\frac{V}{1 \text{ m}^3}\right) + 14,9 \text{ dB} \quad \text{Formel 19}$$

$$= 47,2 \text{ dB} - 10 \cdot \lg\left(\frac{88,8 \text{ m}^3}{1 \text{ m}^3}\right) + 14,9 \text{ dB} = 42,6 \text{ dB}$$

Für den Trittschallschutz von Raum zu Raum, L_{tot} lautet der Wert:

$$L_{\text{tot}} = L_{nT,w} + C_I + C_V \quad \text{Formel 20}$$

$$= 42,6 \text{ dB} + 0 \text{ dB} + 0 \text{ dB} = 42,6 \text{ dB}$$

7.7.3 Beurteilung

Vergleicht man diese Werte des Schallschutzes von Raum zu Raum mit den Anforderungswerten aus der SIA 181, so ist zu erkennen, dass die gemessenen Werte mit ausreichender Reserve unter den Anforderungswerten für Mehrfamiliengebäude liegen. Tabelle 15 enthält einen Vergleich der Messwerte und der Anforderungswerte für Mehrfamiliengebäude nach SIA 181.

Tabelle 15: Vergleich der berechneten Werte des Schallschutzes von Raum-zu-Raum mit den Anforderungswerten nach SIA 181 für Mehrfamiliengebäude. Quelle: Berner Fachhochschule.

		Tabelle 4 bzw. Tabelle 5, SIA 181	
		Mindestanforderung	Erhöhte Anforderungen
Luftschall	$D_{i,\text{tot}} = 73,2 \text{ dB}$	$D_{i,\text{tot}} \geq 53 \text{ dB}$	$D_{i,\text{tot}} \geq 56 \text{ dB}$
Trittschall	$L_{\text{tot}} = 42,6 \text{ dB}$	$L'_{\text{tot}} \leq 53 \text{ dB}$	$L'_{\text{tot}} \leq 50 \text{ dB}$

Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass diese Reserve des Schallschutzes auch erforderlich ist, da bei der Berechnung des Luft- und Trittschallschutzes von Raum zu Raum noch keine Schallübertragung über flankierende Bauteile berücksichtigt werden konnte.

Diese Schallübertragung wird aber sowohl den Luftschallschutz, als auch den Trittschallschutz von Raum zu Raum verschlechtern.

Vor einem Einsatz der Geschossdecken muss daher der Schallschutz von Raum zu Raum unter Berücksichtigung der konkreten Geometrie des Objektes und der Konstruktion der Flanken berechnet werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] A. Melián Hernández, Dr. Ch. Geyer *Schlussbericht Holzkonstruktionen mit optimierter Wärmespeicherfähigkeit*, Projektnummer BAFU 2016.09, Berner Fachhochschule (2017)
- [2] EN ISO 10140-2 *Akustik –Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 2: Messung der Luftschalldämmung (ISO 10140-2:2010)*
- [3] EN ISO 10140-3 *Akustik –Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 3: Messung der Trittschalldämmung (ISO 10140-3:2015)*
- [4] EN ISO 354 *Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen (ISO 354:2003)*
- [5] EN ISO 717 – 1 *Akustik, Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 1: Luftschalldämmung (ISO 717-1:2013)*
- [6] EN ISO 717 – 2 *Akustik, Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen“ - Teil 2: Trittschalldämmung (ISO 717-2:2013)*
- [7] ANSYS, Inc. Products Release 18
- [8] SIA 181 *Schallschutz im Hochbau* (Juni 2006)

9 Verzeichnisse

9.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Projektpartner. Quelle: Berner Fachhochschule.	6
Tabelle 2: Wärmeschutztechnische Eigenschaften für die Simulationen der dynamischen Wärmekapazität. Quelle: Berner Fachhochschule.	12
Tabelle 3: Ergebnisse der Berechnungen der dynamischen Wärmekapazität der Ausgangskonstruktionen der Deckensysteme. Die erste Spalte zeigt einen Vertikalschnitt durch das Deckensystem, die zweite Spalte enthält die Amplitude der Wärmestromdichte und die dritte Spalte gibt die dynamische Wärmekapazität der Deckenunterseite an. Alle Masse sind in mm angegeben. Quelle: Berner Fachhochschule.	14
Tabelle 4: Varianten der Deckenunterseite der Holzbetonverbunddecke aus Buche zur Optimierung der Schallabsorption. Die Deckenkonstruktion wird in zwei aufeinander senkrecht stehenden Vertikalschnitten dargestellt. Alle Masse sind in mm angegeben. In den angegebenen Anlagen sind weitere Details der Deckenkonstruktionen angegeben. Quelle: Berner Fachhochschule.	16
Tabelle 5: Zusammenstellung der dynamischen Wärmekapazitäten der Deckenunterseite der HBV-Decke mit Buche für die verschiedenen Profilierungen. Die erste Spalte zeigt eine perspektivische Darstellung der Deckenunterseite. Es wird auch die Verbesserung der dynamischen Wärmekapazität in % gegenüber dem Wert der Ausgangskonstruktion der HBV-Decke mit glatter Deckenunterseite angegeben. Quelle: Berner Fachhochschule.	21
Tabelle 6: Vertikalschnitte der ausgewählten Holzbetonverbunddecke mit verschiedenen Profilierungen für die Optimierung der Schallabsorption. Es werden immer zwei aufeinander senkrecht stehende Schnitte gezeigt. Es werden für die Varianten nur die unteren 8 cm des Deckenaufbaus dargestellt. Alle Masse in mm. Quelle: Berner Fachhochschule.....	26

Tabelle 7: Zusammenstellung der dynamischen Wärmekapazitäten der Deckenunterseite der HBV-Decke mit Buche für die Optimierung der Schallabsorption. Es wird auch die Verbesserung der dynamischen Wärmekapazität in % gegenüber dem Wert der Ausgangskonstruktion in % angegeben. Quelle: Berner Fachhochschule.	28
Tabelle 8: Zusammenstellung der Messwerte der Schallabsorptionsgrade der beiden Deckenunterseiten. Quelle: Berner Fachhochschule.	36
Tabelle 9: Berechnete Schallabsorptionsgrade der Varianten der Deckenunterseite. Quelle: Berner Fachhochschule.	41
Tabelle 10: Zusammenstellung der Bewertung der Schallabsorption der Deckenunterseiten nach EN ISO 11654. Quelle: Berner Fachhochschule.	43
Tabelle 11: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wärmespeicherfähigkeit und der Schallabsorption der verschiedenen Varianten der Deckenunterseite der HBV-Decke. Es werden jeweils nur die unteren 8 cm des Deckenaufbaus dargestellt. Quelle: Berner Fachhochschule.	44
Tabelle 12: Beschreibung der Holzbetonverbunddecke von oben nach unten, ohne und mit Unterlagsboden. Quelle: Berner Fachhochschule.	49
Tabelle 13: Einzahlwerte und Spektrumanpassungswerte der Luftschalldämmung und der Trittschalldämmung für die direkte Schallübertragung der Geschossdecke. Quelle: Berner Fachhochschule.	50
Tabelle 14: Geometrie des Prüfstands. Quelle: Berner Fachhochschule.	50
Tabelle 15: Vergleich der berechneten Werte des Schallschutzes von Raum-zu-Raum mit den Anforderungswerten nach SIA 181 für Mehrfamiliengebäude. Quelle: Berner Fachhochschule.	52

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vertikalschnitt der massiven Betondecke. Quelle: Berner Fachhochschule.	6
Abbildung 2: Vertikalschnitt der Betondecke mit Akustikelementen nach Angaben von Christoph Meier. Quelle: Berner Fachhochschule.	7
Abbildung 3: Vertikalschnitt der Holzbetonverbunddecke mit Buche nach Angaben von Christoph Meier. Quelle: Berner Fachhochschule.	7
Abbildung 4: Dynamische Wärmekapazitäten der verschiedenen Profilierungen der Deckenunterseite der Holzbetonverbunddecke. Quelle: Berner Fachhochschule.	25
Abbildung 5: Dynamische Wärmekapazitäten für die verschiedenen schallabsorbierenden Varianten der Deckenunterseite der Holzbetonverbunddecke. Quelle: Berner Fachhochschule.	30
Abbildung 6: Aufnahme des leeren Hallraums des Prüfstands der EPFL in Lausanne. Quelle: Berner Fachhochschule.	33
Abbildung 7: Prüfkörper der Deckenunterseite mit Profilierung im Hallraum. Quelle: Berner Fachhochschule.	34
Abbildung 8: Prüfkörper der Deckenunterseite mit Profilierung und Aussparungen mit Pavatherm-COMBI im Hallraum. Quelle: Berner Fachhochschule.	34
Abbildung 9: Detailaufnahme der linearen Profilierung der Deckenunterseite. Quelle: Berner Fachhochschule.	35
Abbildung 10: Vergleich der gemessenen Schallabsorptionsgrade der beiden Deckenunterseiten. Quelle: Berner Fachhochschule.	37
Abbildung 11: Vergleich der aus den schallabsorbierenden Eigenschaften der Teilflächen berechneten Werte mit den Messwerten der Deckenunterseite. Quelle: Berner Fachhochschule.	39

Abbildung 12: Zusammenfassung der frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade der sechs Varianten der Deckenunterseite der HBV-Decke. Quelle: Berner Fachhochschule. 42

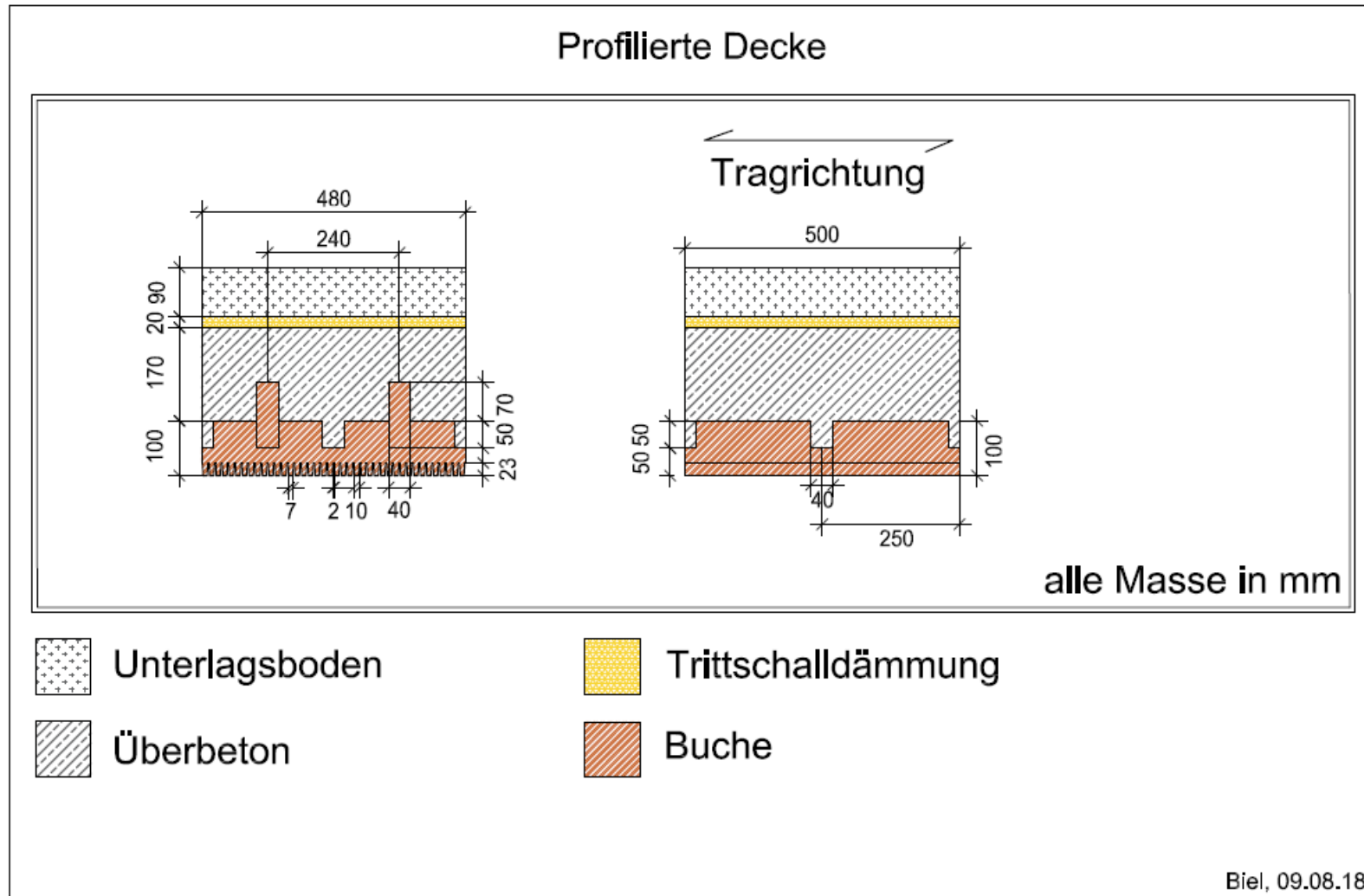
Abbildung 13: Aussenansicht des Deckenprüfstandes der EMPA. Quelle: EMPA
Dübendorf. 45

10 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt. Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Institutsleiters für Holzbau, Tragwerke und Architektur und des Projektverantwortlichen gültig.

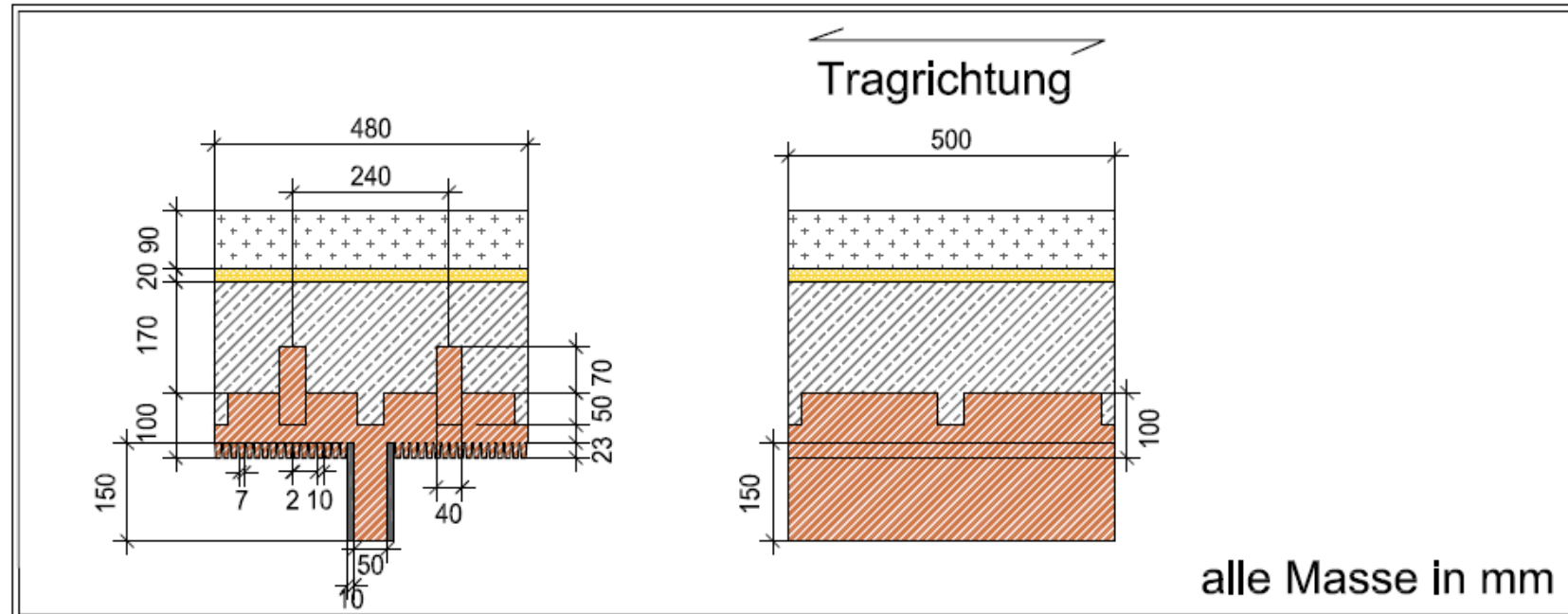
Anlage 1: profilierte Decken

Anlage 1.1: Profilierte Decke



Anlage 1.2: Profilierte Decke mit schallabsorbierenden Kassetten (h = 150 mm)

Profilierte Decke mit schallabsorbierenden Kassetten (h=150 mm)



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche

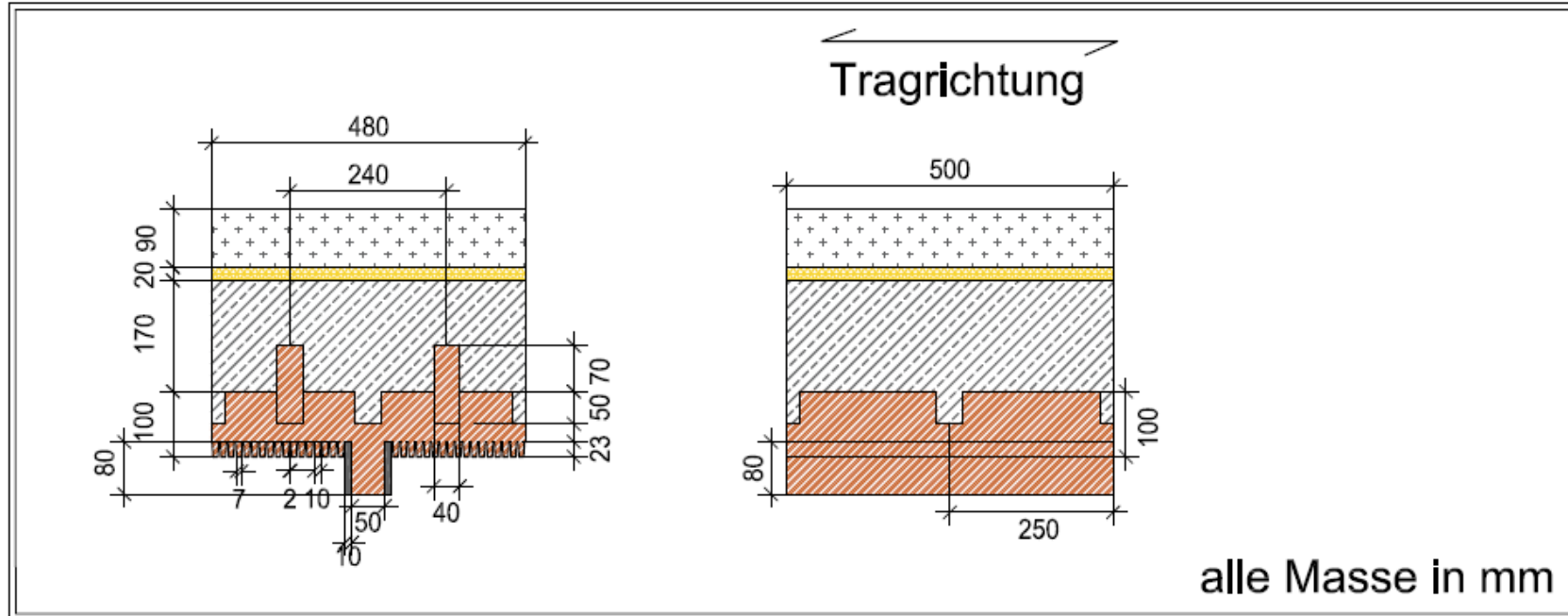


Polyurethanschaum

Biel, 04.07.18

Anlage 1.3: Profilierte Decke mit schallabsorbierenden Kassetten (h = 80 mm)

Profilierte Decke mit schallabsorbierenden Kassetten (h=80 mm)



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche

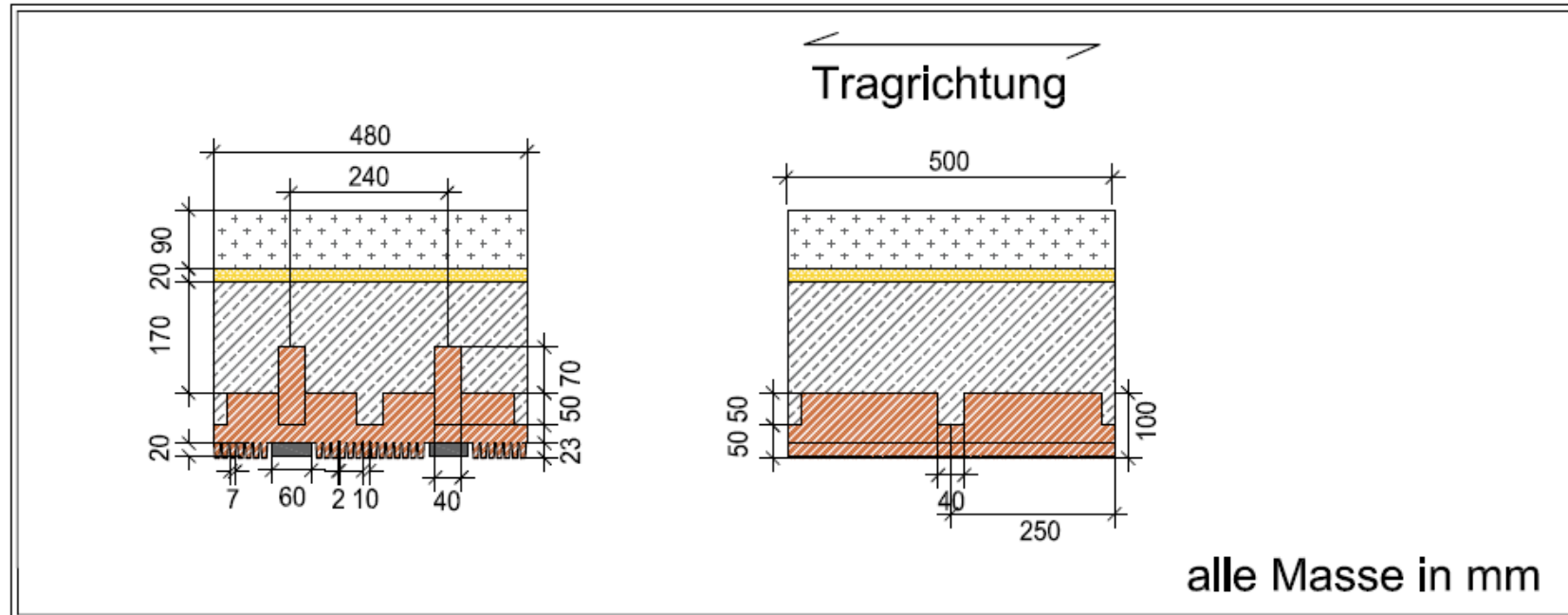


Polyurethanschaum

Biel, 04.07.18

Anlage 1.4: Profilierte Decke mit Streifen aus Polyurethanschaum 20 x 60 mm

Profilierte Decke mit Streifen aus Polyurethanschaum 20 x 60 mm



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche

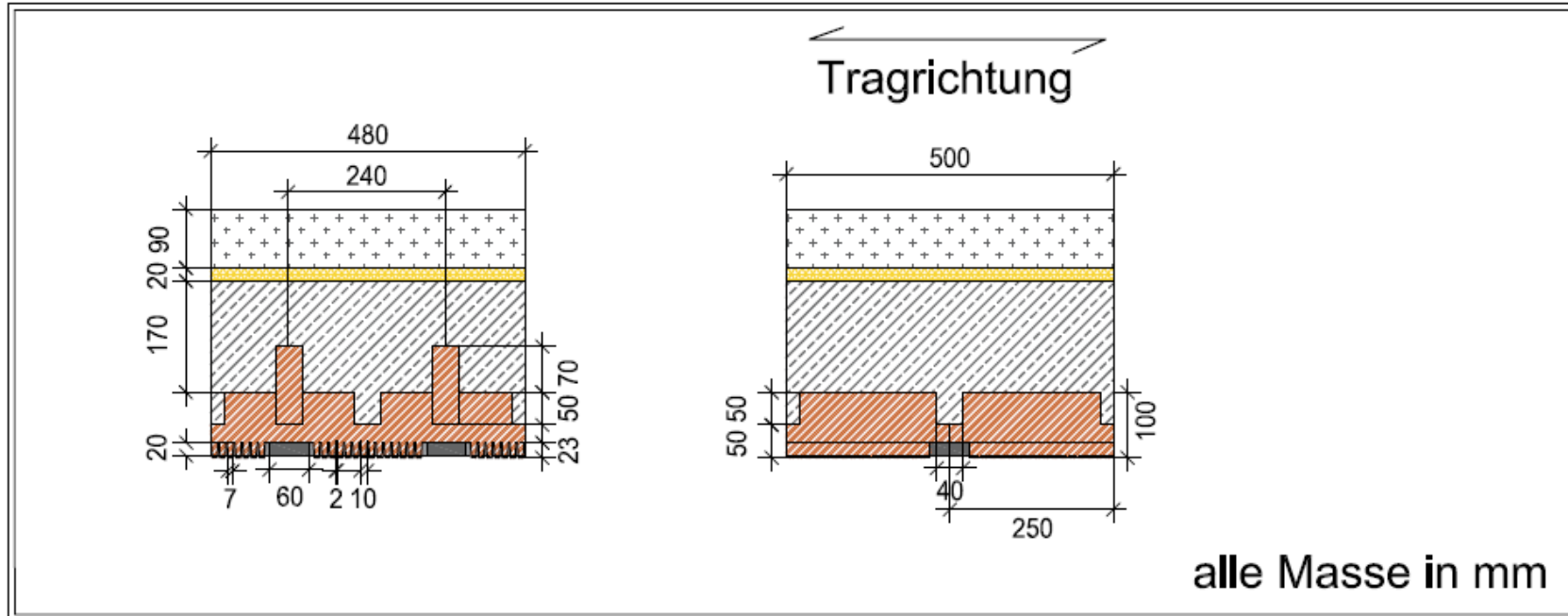


Polyurethanschaum

Biel, 09.08.18

Anlage 1.5: Profilierte Decke mit einem Doppelkreuz aus Polyurethanschaum 20 x 60 mm

Profilierte Decke mit einem Doppelkreuz aus Polyurethanschaum 20 x 60 mm



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche

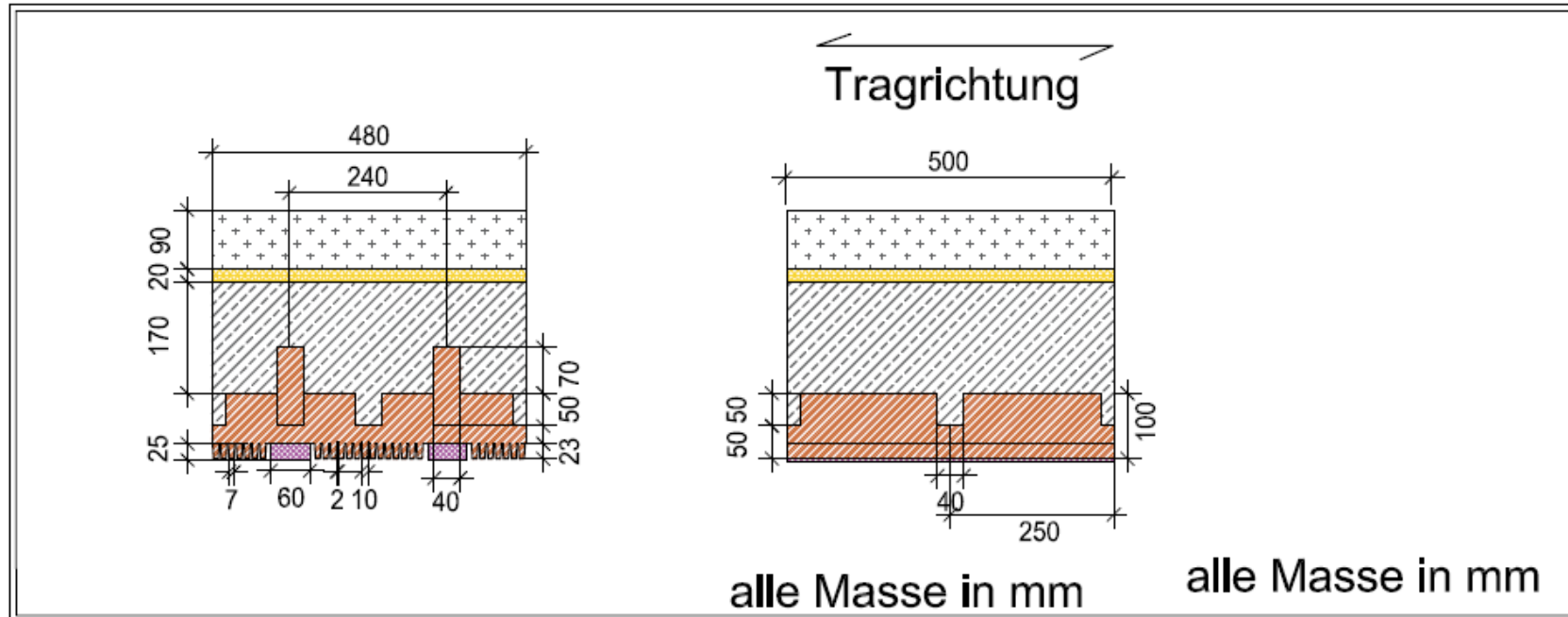


Polyurethanschaum

Biel, 09.08.18

Anlage 1.6: Profilierte Decke mit Streifen aus Heraklith A2-M 25 x 60 mm

Profilierte Decke mit Streifen aus Heraklith A2-M 25 x 60 mm



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche

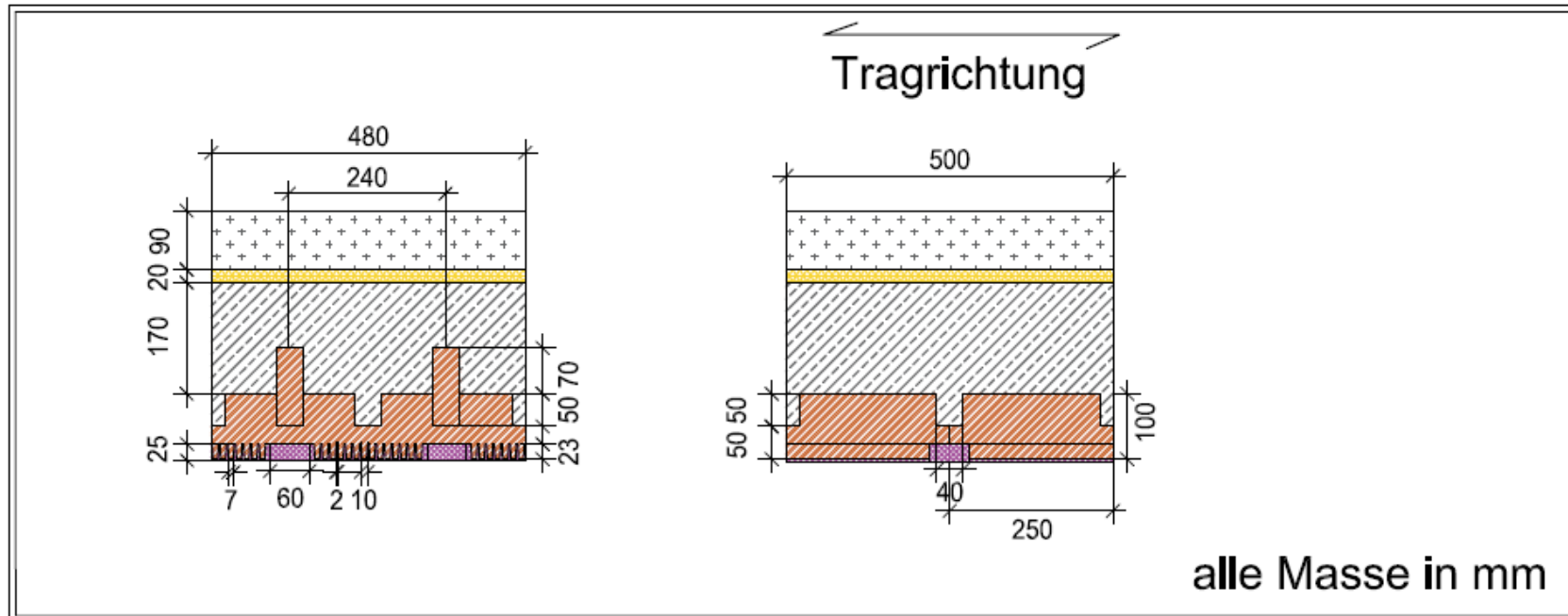


Heraklith A2-M

Biel, 09.08.18

Anlage 1.7: Profilierte Decke mit einem Doppelkreuz aus Heraklith A2-M 25 x 60 mm

Profilierte Decke mit einem Doppelkreuz aus Heraklith A2-M 25 x 60 mm



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche

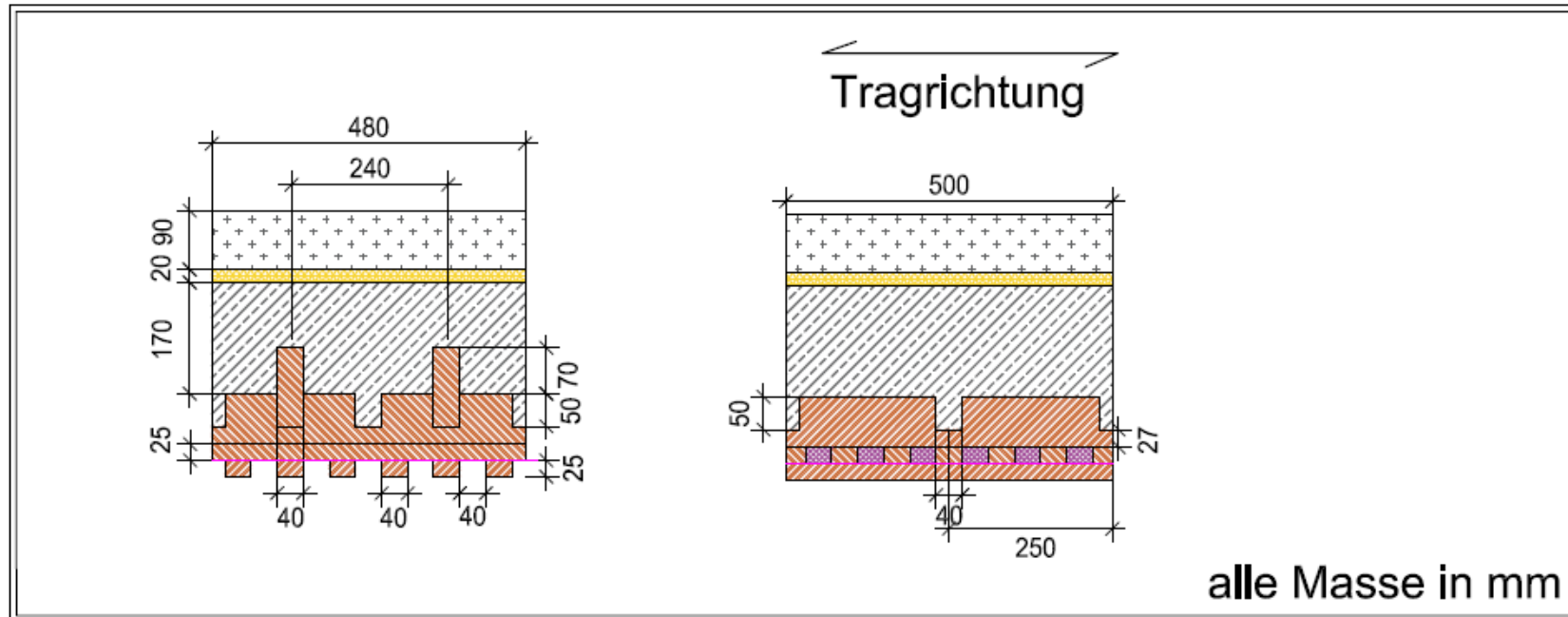


Heraklith A2-M

Biel, 09.08.18

Anlage 1.8: Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit Streifen aus Heraklith A2-M 25 x 40 mm

Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit Streifen aus Heraklith A2-M 25 x 40 mm



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche



Heraklith A2-M

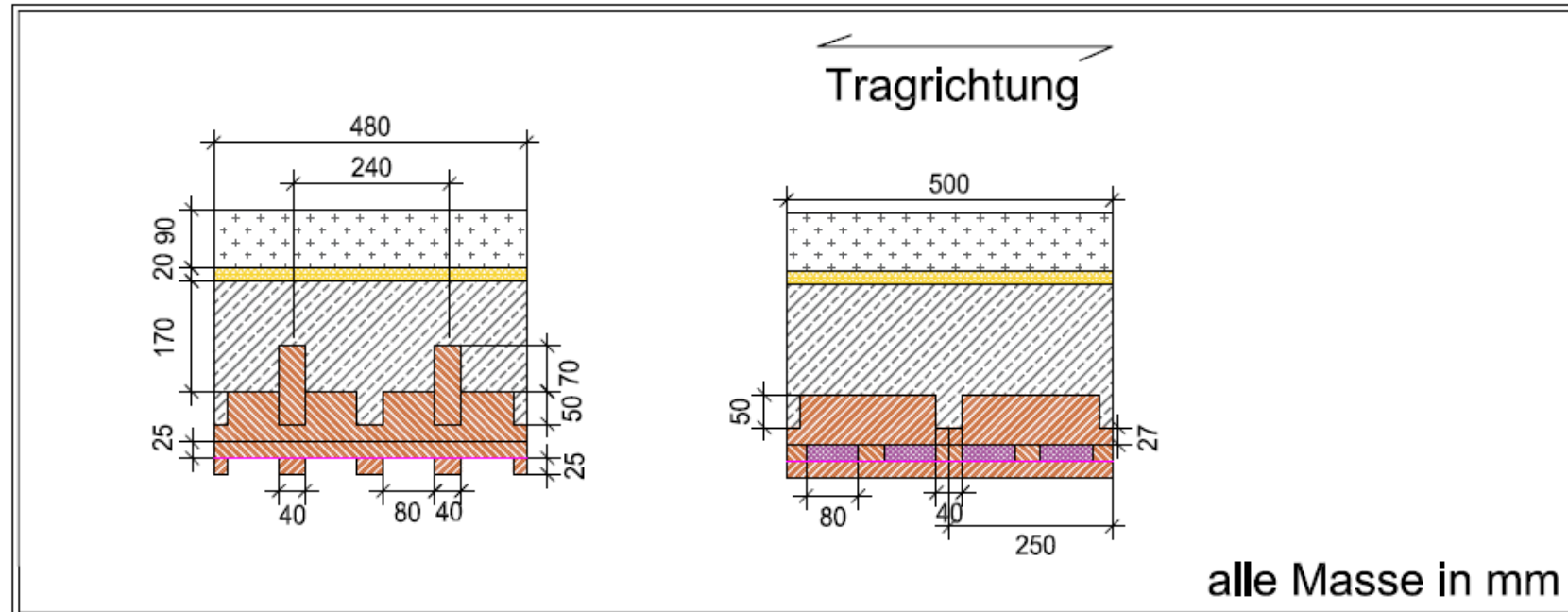


Vlies als Rieselschutz

Biel, 04.07.18

Anlage 1.9: Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit Streifen aus Heraklith A2-M 25 x 80 mm

Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit Streifen aus Heraklith A2- M25 x 80 mm



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche



Heraklith A2-M

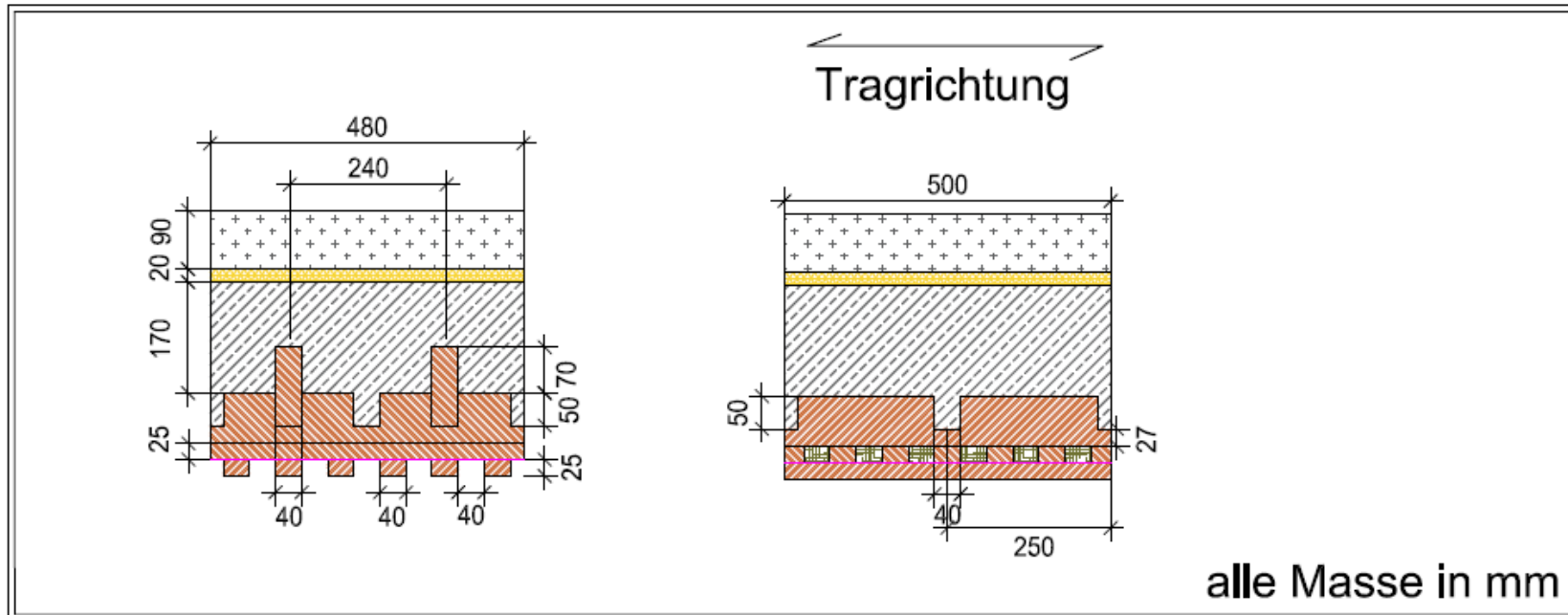








Vlies als Rieselschutz

Biel, 04.07.18

Anlage 1.10: Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit Streifen aus Buchenspäne 25 x 40 mm

Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit Streifen aus Buchenspäne 25 x 40 mm

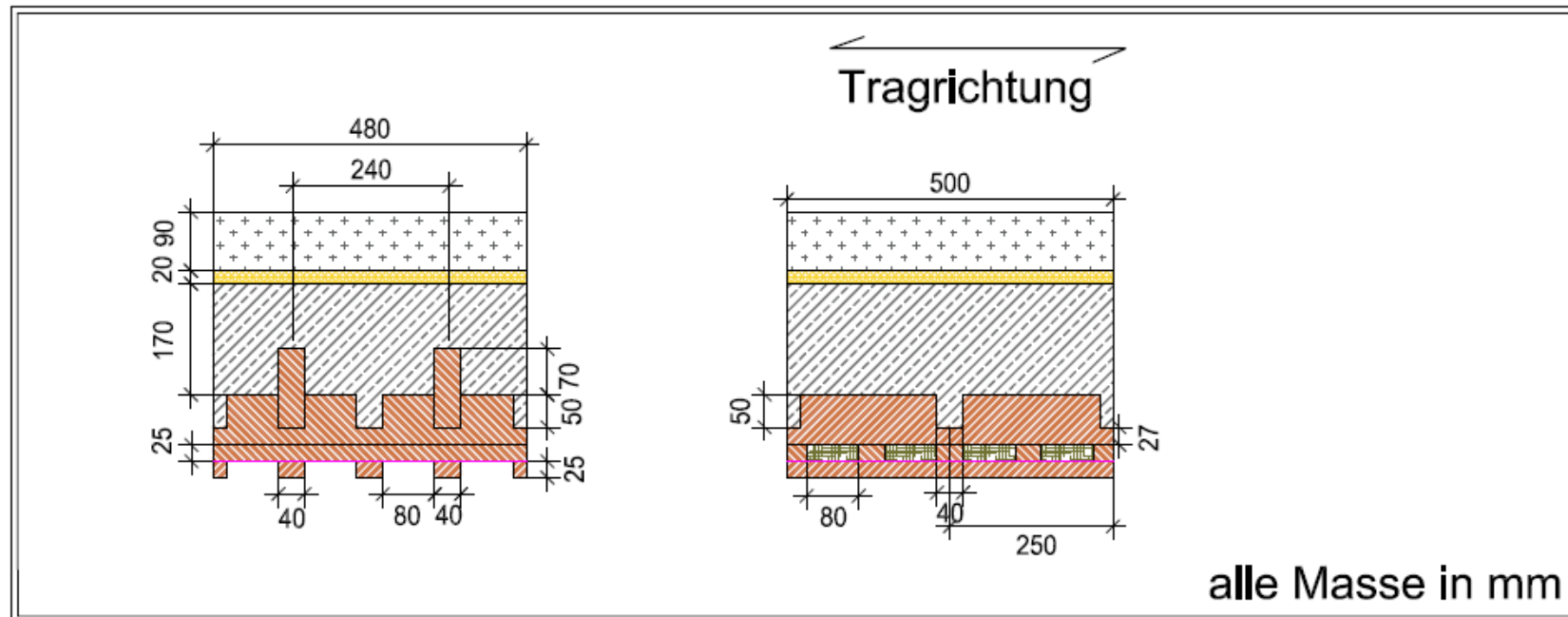


- | | | | |
|---|--------------------|---|------------------------|
|  | Unterlagsboden |  | Buche |
|  | Überbeton |  | Buchenspäne |
|  | Trittschalldämmung |  | Vlies als Rieselschutz |

Biel, 04.07.18

Anlage 1.11: Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit Streifen aus Buchenspäne 25 x 80 mm

Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit Streifen aus Buchenspäne 25 x 80 mm



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche



Buchenspäne

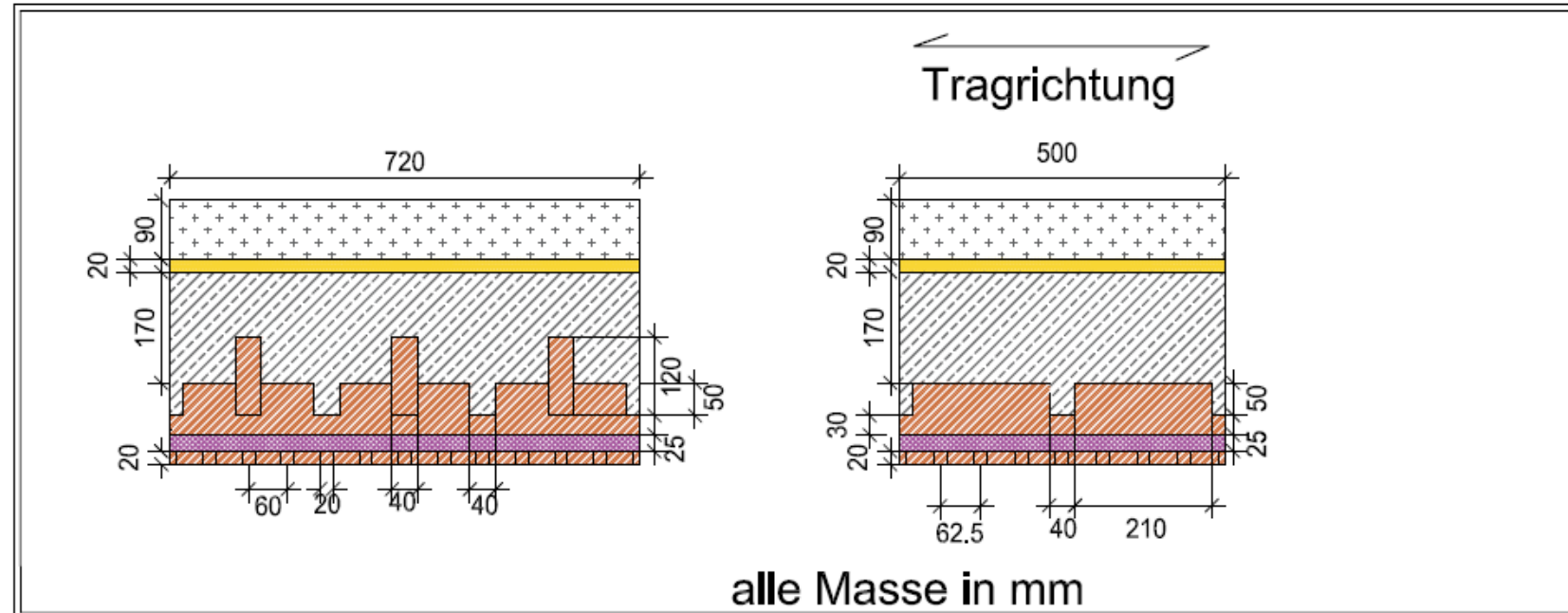


Vlies als Rieselschutz

Biel, 04.07.18

Anlage 1.12: Holzdecke mit schallabsorbierender abgehängter Decke mit Löchern $\varnothing = 20$ mm

Holzdecke mit Schallabsorptionsplatte mit Löchern $\varnothing = 20$ mm



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche



Heraklith A2-M

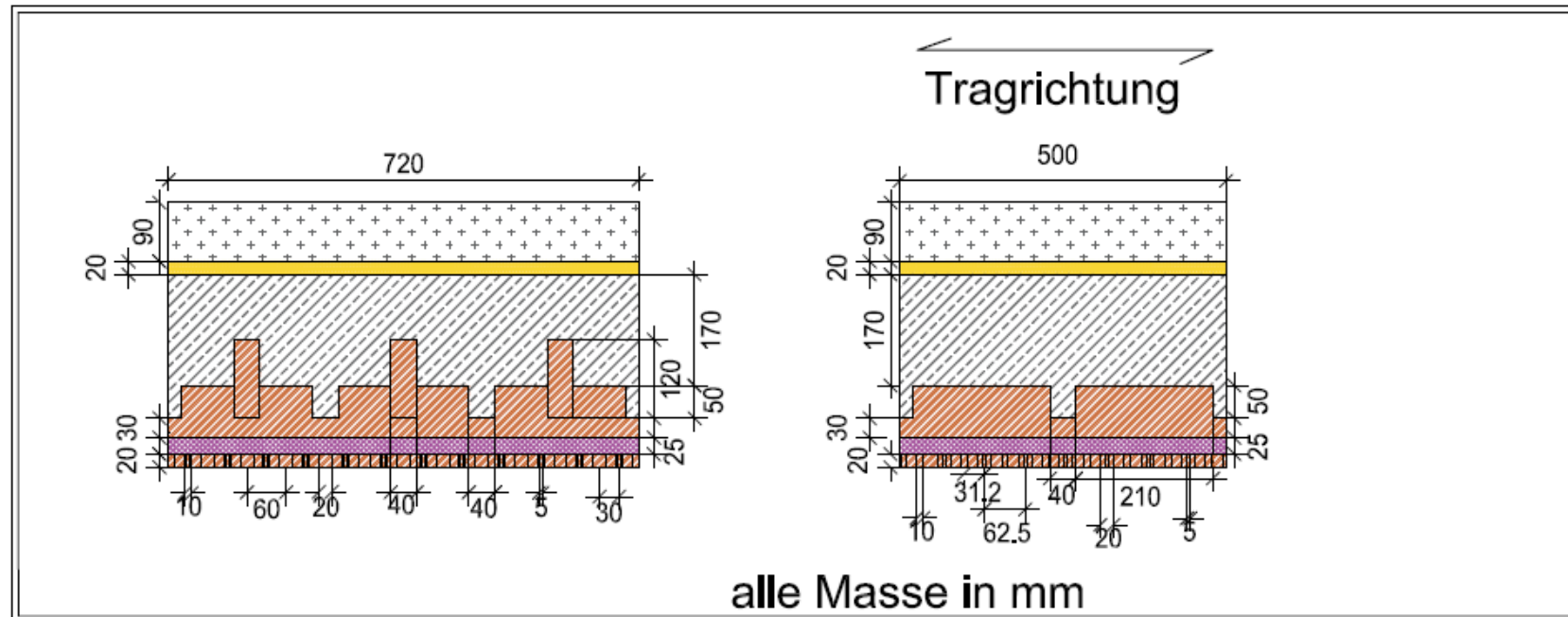


Bucheplatte mit Löcher $\varnothing = 20$ mm

Biel, 09.08.18

Anlage 1.13: Holzdecke mit schallabsorbierender abgehängter Decke mit Löchern $\varnothing = 20, 10$ und 5 mm

Holzdecke mit Schallabsorptionsplatte mit Löchern $\varnothing = 20, 10$ und 5 mm



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche



Heraklith A2-M

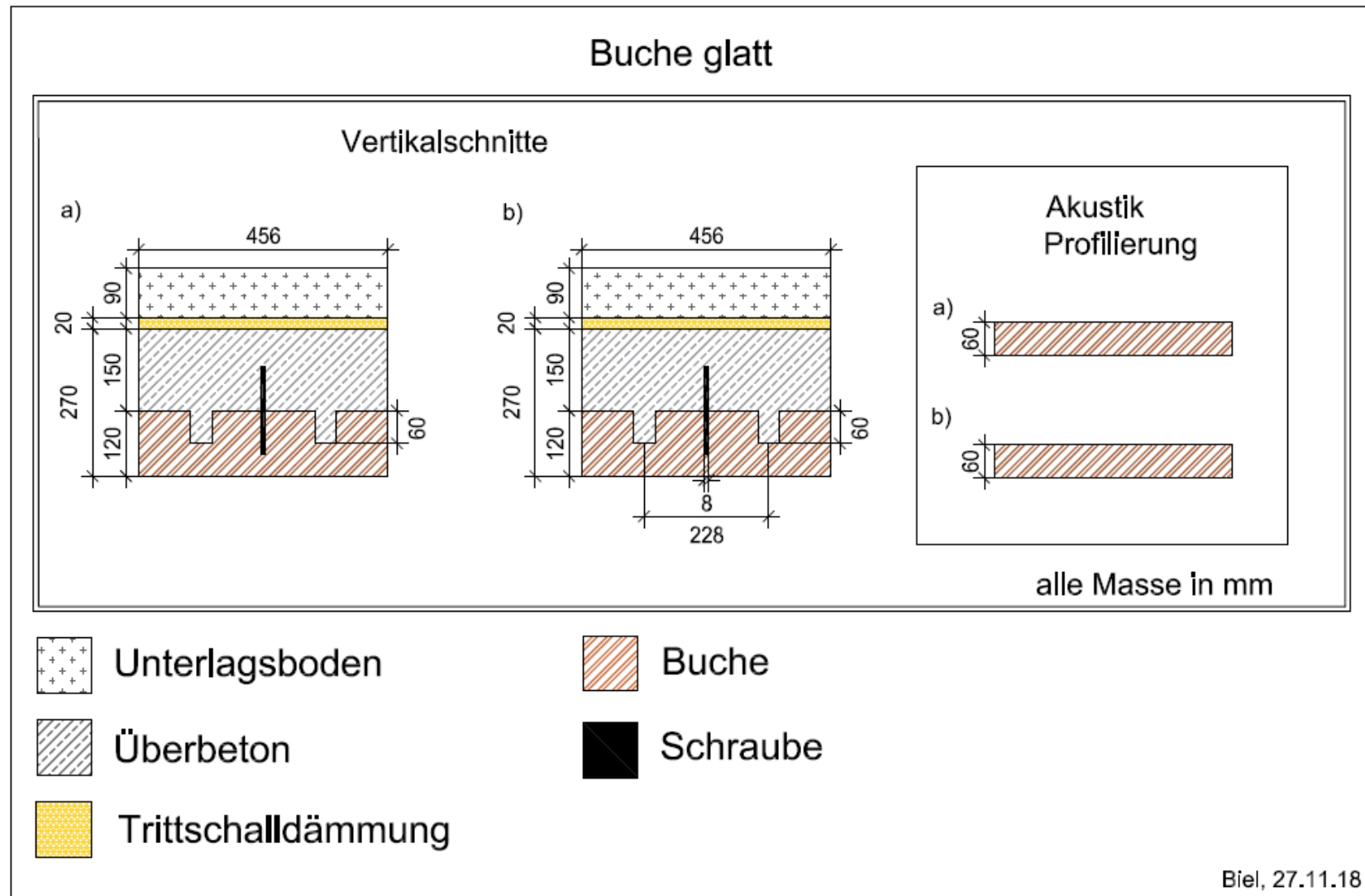


Bucheplatte mit Löchern $\varnothing = 20$ mm;
10 mm; 5 mm

Biel, 09.08.18

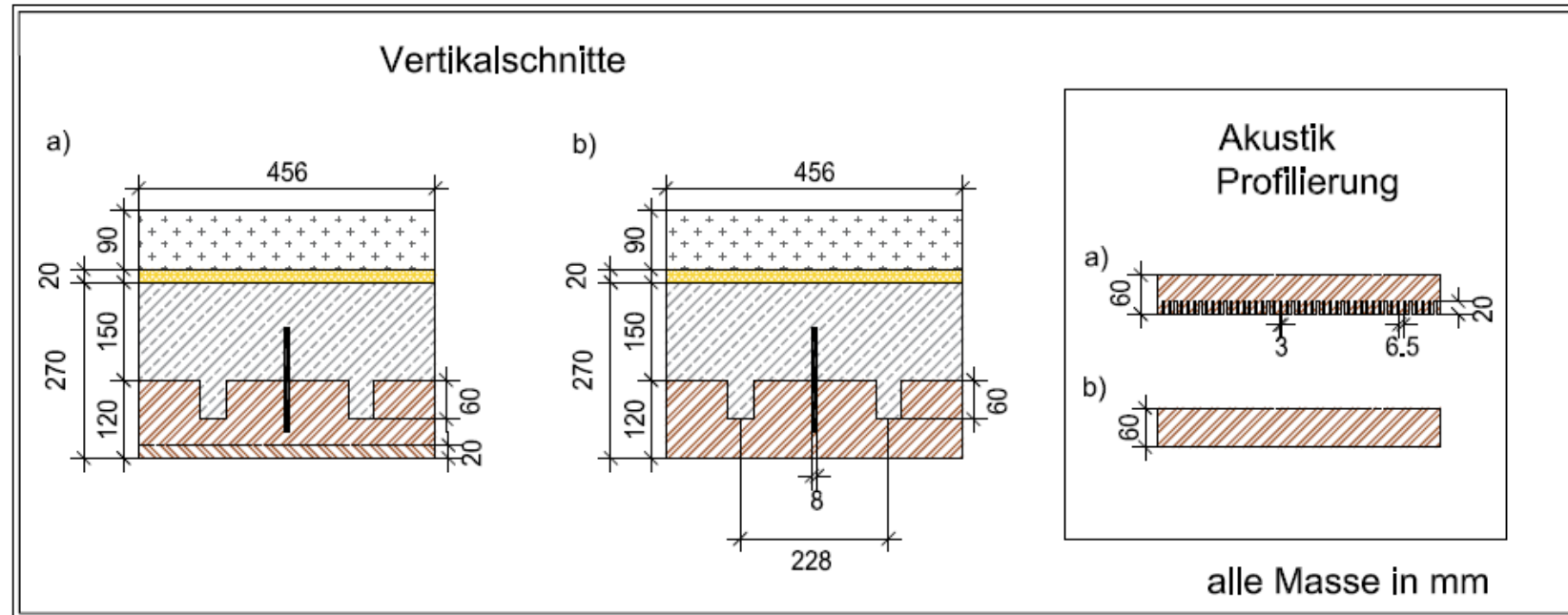
Anlage 2: Decken für Schallabsorption

Anlage 2.1: Buche glatt



Anlage 2.2: Profilierung mit linearen Nuten

Profilierte Holzdecke mit linearen Nuten



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche



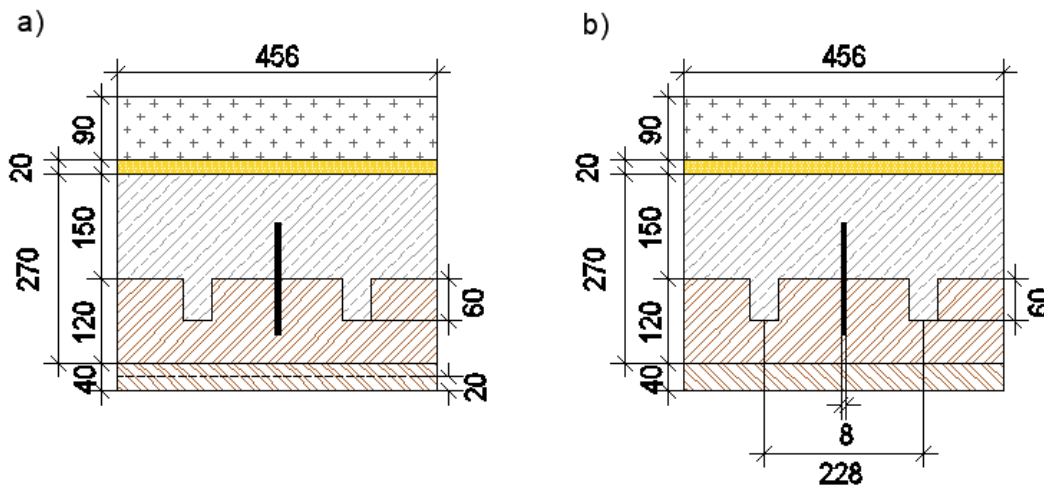
Schraube

Biel, 27.11.18

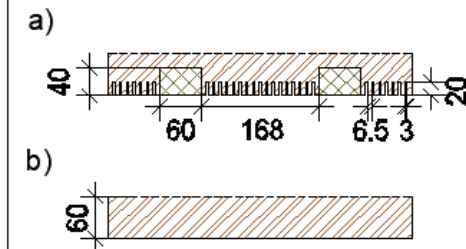
Anlage 2.3: Profilierte Holzdecke mit Streifen aus Pavatherm-COMBI

Profilierte Holzdecke mit Streifen aus Pavatherm-COMBI

Vertikalschnitte



Akustik Profilierung



alle Masse in mm



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche



Schraube



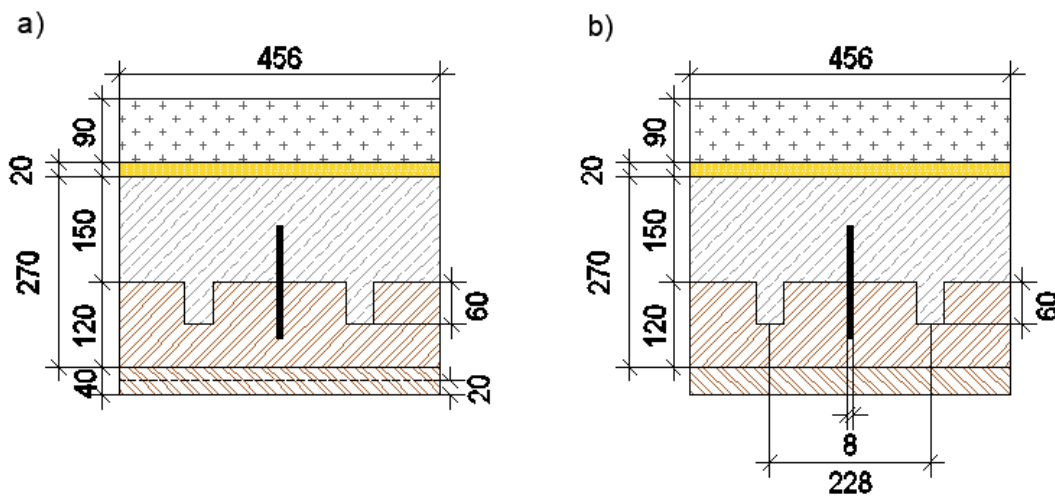
Pavatherm- COMBI (Holzfaserplatte)

Biel, 08.04.19

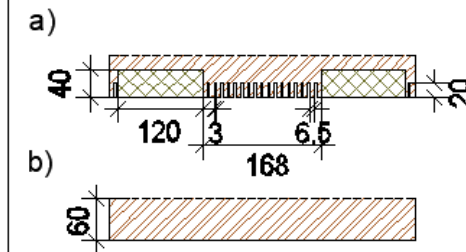
Anlage 2.4: Profilierte Holzdecke mit breiten Streifen aus Pavatherm-COMBI

Profilierte Holzdecke mit breiten Streifen aus Pavatherm-COMBI

Vertikalschnitte



Akustik Profilierung



alle Masse in mm



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche



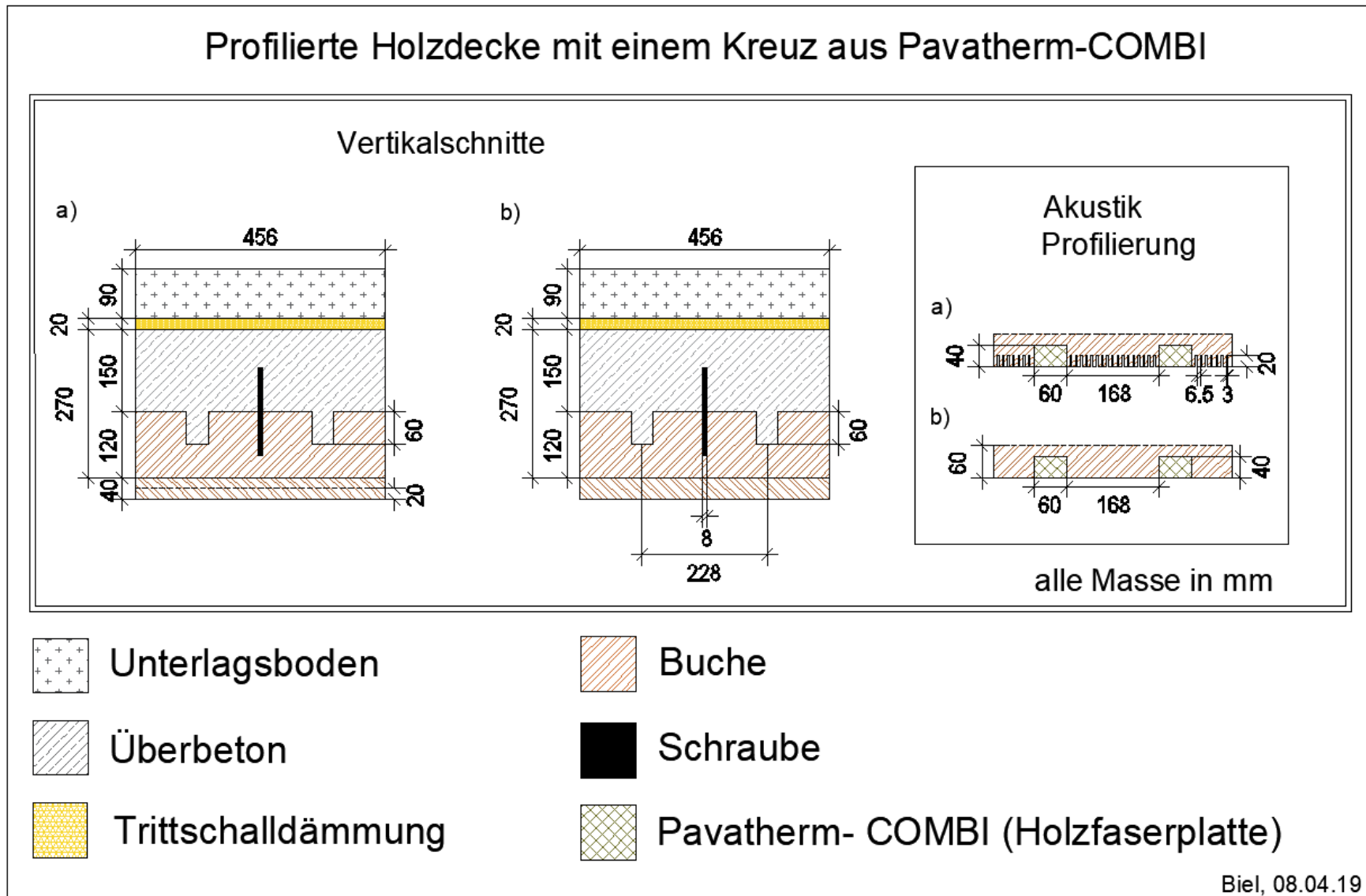
Schraube



Pavatherm- COMBI (Holzfaserplatte)

Biel, 08.04.19

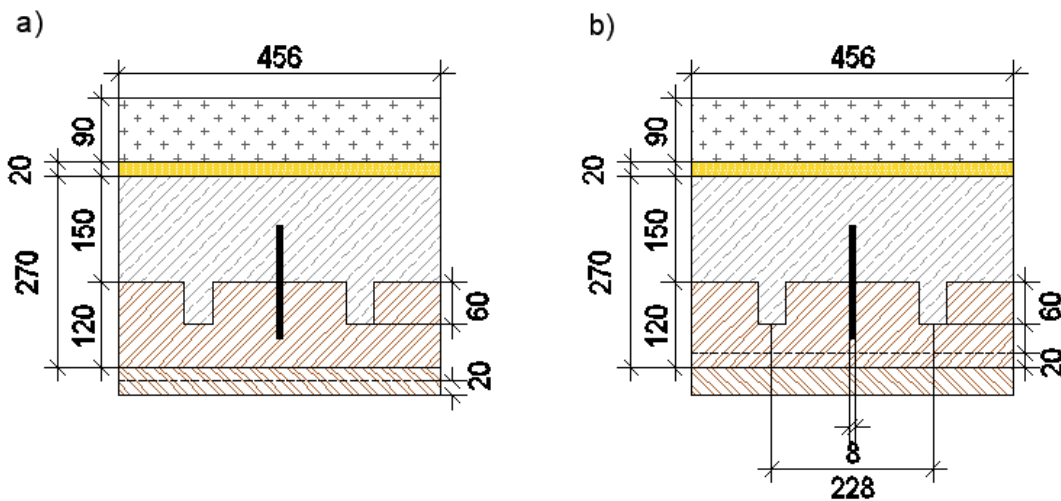
Anlage 2.5: Profilierte Holzdecke mit einem Kreuz aus Pavatherm-COMBI



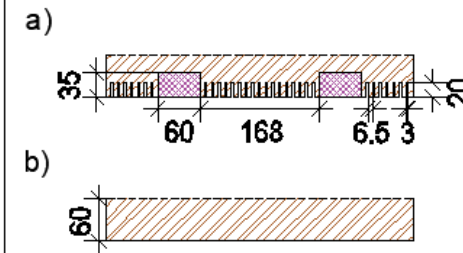
Anlage 2.6: Profilierte Holzdecke mit Streifen aus Heraklith A2-M

Profilierte Holzdecke mit Streifen aus Heraklith A2-M

Vertikalschnitte



Akustik Profilierung



alle Masse in mm



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche



Schraube

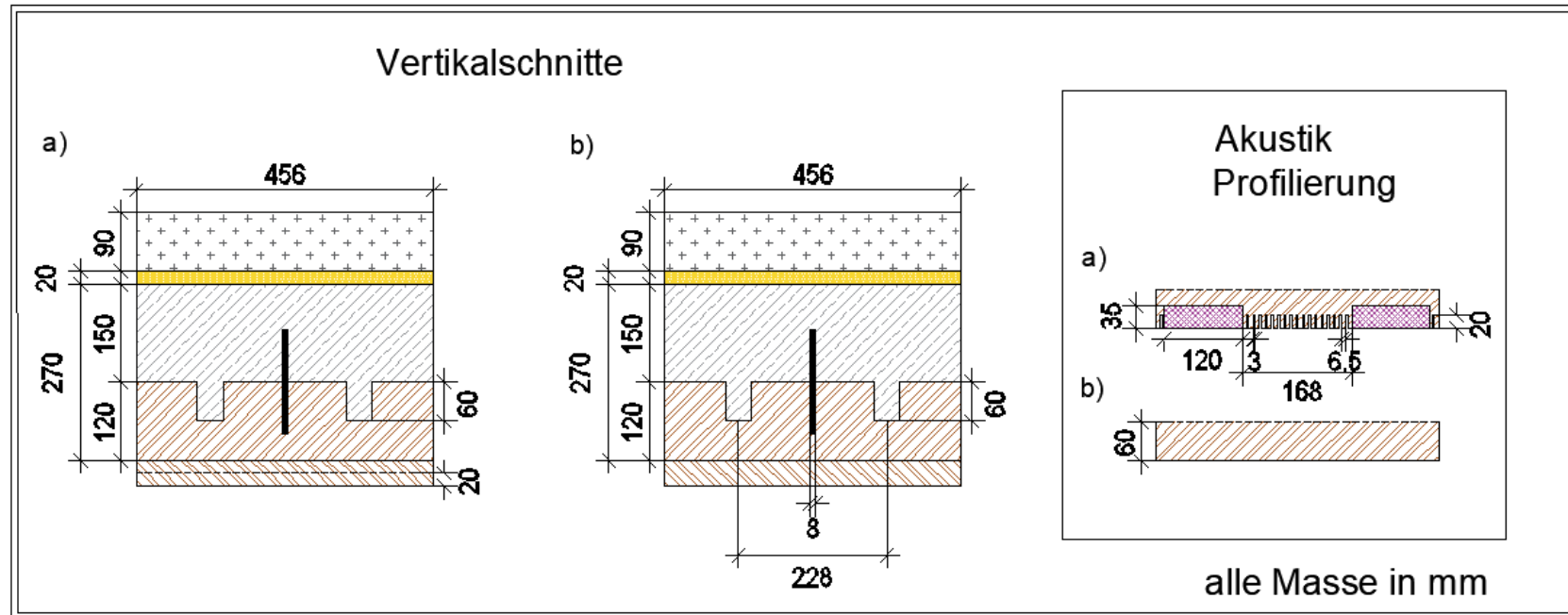


Heraklith A2-M

Biel, 08.04.19

Anlage 2.7: Profilierte Holzdecke mit breiten Streifen aus Heraklith A2-M

Profilierte Holzdecke mit breiten Streifen aus Heraklith A2-M



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche



Schraube



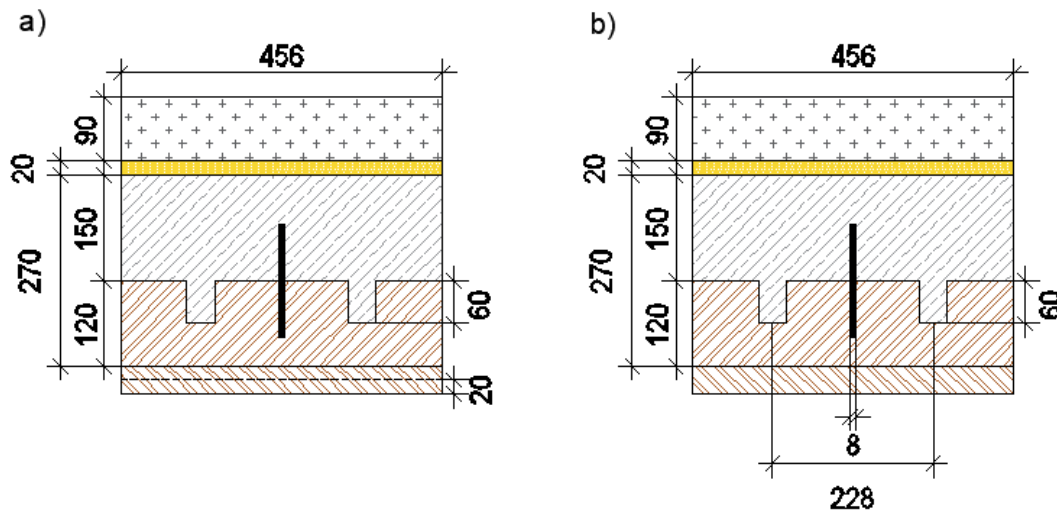
Heraklith A2-M

Biel, 08.04.19

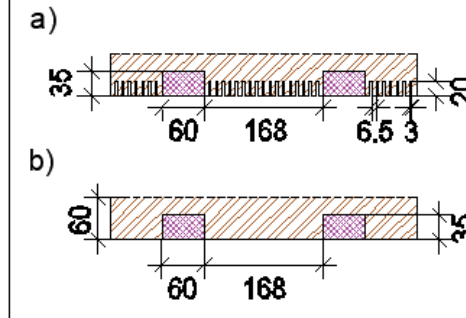
Anlage 2.8: Profilierte Holzdecke mit einem Kreuz aus Heraklith A2-M

Profilierte Holzdecke mit einem Kreuz aus Heraklith A2-M

Vertikalschnitte



Akustik Proflierung



alle Masse in mm



Unterlagsboden



Überbeton



Trittschalldämmung



Buche



Schraube



Heraklith A2-M

Biel, 08.04.19

Anlage 3: Datenblätter

Anlage 3.1: Pavatherm-COMBI



PRODUKTE

Dach

Suche



PAVATHERM-COMBI

Holzfaserdämmplatte für Kombinationen

PAVATHERM-COMBI ist eine multifunktional einsetzbare Dämmplatte für Dach und Wand mit profilierter Kantenausführung. Dadurch ist sie drehbar und direkt auf den Sparren verlegbar. Vor Witterungseinflüssen schützen.

Dämmsysteme auf dem Sparren: PAVATHERM-COMBI kann mit ISOROOF / ISOLAIR und PAVATHERM-PLUS zu effizienten Dämmsystemen kombiniert werden. PAVATHERM-COMBI in der ersten Lage verlegen und dann mit Unterdachplatten, PAVATEX ADB oder PAVATEX UDB abdecken.

Dämmsysteme für hinterlüftete Fassaden: PAVATHERM-COMBI kann bei hinterlüfteten Fassaden als Dämmung eingesetzt werden und darf max. 60 Tage frei bewittert werden. Bei einer offenen Fassadenbekleidung schützt die PAVATEX FBA die Konstruktion dauerhaft vor Witterungseinflüssen.

Dämmsysteme unter dem Sparren: PAVATHERM-COMBI Untersparrendämmplatten im Verband verlegen und mit Dämmstoffnägeln an Sparren fixieren. Als verputzbare Variante: Rechtwinklig zur Sparrenachse Unterkonstruktion 40/60 mm (Achsabstand $a \approx 34,5$ cm) anbringen. PAVATHERM-COMBI vollständig parallel zur Sparrenachse anbringen.

Vorteile

- Multifunktionale Allroundplatte für Dach- und Wand
- Wirtschaftliche Zusatzdämmung für Kombinationen mit PAVATEX-Unterdeckplatten bzw. Abdeckbahnen
- Direktverlegung auf den Sparren bzw. der Unterkonstruktion möglich

Lagerung

Trocken und vor Beschädigung geschützt lagern. Ausschließlich in trockenem Zustand verarbeiten. Maximal 4 Paletten übereinander stapeln.

Zertifizierte Auszeichnungen



PAVATEX-Systemgarantie

Die leistungsstarken Haft- und Klebekomponenten der PAVATEX-Systemlösungen sorgen für die dauerhafte, sichere Systemdichtheit bei modernen, multifunktionalen Gebäudehüllen – jetzt auch garantiert durch die neue PAVATEX-Gewährleistung. Sie bietet im Schadensfall umfangreiche Service-Leistungen und erhöht so einmal mehr die Sicherheit für Planer, Verarbeiter und Bauherren.

Lieferform

Dicke (mm)	Stück/ Palette	Deckmass (cm)	Palette netto (qm)	Format (cm)	Palette brutto (qm)	Palette (kg)	Kanten-ausführung	Herstellung Werk
60	36	178 x 56	35,9	180 x 58	37,6	375	Symmetrisch profiliert	Golbey
80	28	178 x 56	27,9	180 x 58	29,2	387	Symmetrisch profiliert	Golbey

In zwei Stapeln auf einer teilbaren Palette

Technische Werte

Rohdichte ρ_{ho} [kg/m³]	145
Wärmeleitfähigkeit (EN 13171) λ_{D_D} [W/mK]	0.041
Spez. Wärmekapazität c [J/(kgK)]	2100
Dampfdiffusionswiderstandszahl μ	3
Brandverhalten (EN 13501-1)	Klasse E
Druckspannung bei 10% Stauchung [kPa]	100
Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene [kPa]	10
Abfallschlüssel nach Europäischem Abfallkatalog (EAK)	030105; 170201; 170604
Bezeichnungsschlüssel WF-EN13171-T5-CS(10Y)100-TR10-WS1,0-MU3-AFr60	<
W° Keymark	036-03.203

Typ: PAVATHERM-COMBI

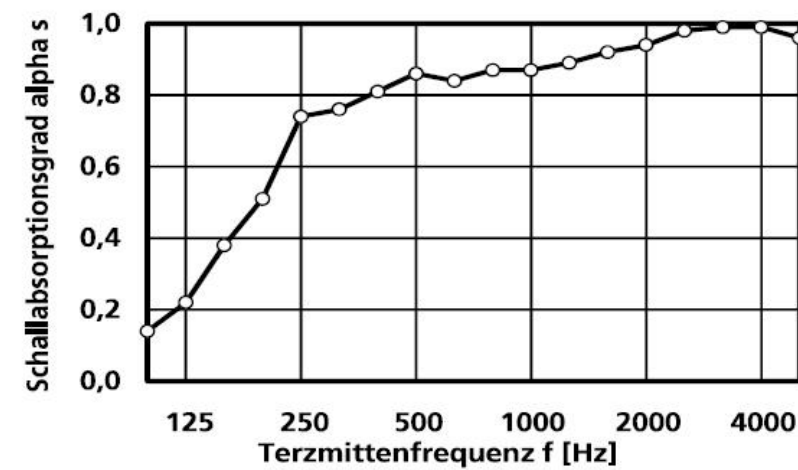
Dicke: 40 mm

Anordnung: 2 x 7 Platten direkt auf dem Hallraumboden

Prüffläche: 14,0 m²

Rand umlaufend abgedeckt

f [Hz]	α_s [-]
100	0,14
125	0,22
160	0,38
200	0,51
250	0,74
315	0,76
400	0,81
500	0,86
630	0,84
800	0,87
1000	0,87
1250	0,89
1600	0,92
2000	0,94
2500	0,98
3150	0,99
4000	0,99
5000	0,96



Anlage 1.4: Heraklith A2-M

Heraklith® A2-M

Holzwoleplatte gemäß DIN EN 13168:2015
WW-EN 13168-L1-W1-T1-S1-P1-CS(10/Y)150 CI3

**Produktbeschreibung**

Mineralisch gebundene Holzwoleplatte, druck- und biegefest, wärme- und schalldämmend, nichtbrennbar.

Anwendungsbereich

Universell einsetzbare Dämmplatte als Putzträger, für Wärme-, Schall- und Brandschutz..

Schallabsorbierende Bekleidung in nicht überbauten Tiefgaragen (Tropfwasserschutz)

Anwendungskurzzeichen nach DIN 4108-10: DI-dm, WI-dm, (WH und WAP für kleinformige Anwendungen)

Verarbeitung

Bitte beachten Sie die jeweiligen Verarbeitungsrichtlinien. Darüber hinaus gelten die einschlägigen Normen und die anerkannten Regeln der Technik.

Lieferprogramm

Dicke	mm	25	35	50
Gewicht	kg/m ²	10,5 ± 10%	12,8 ± 10%	19,0 ± 10%
Länge	mm	2000 (1985) ¹		
Breite	mm	600 (585) ¹		

Weitere Dicken auf Anfrage. Lieferform: palettiert. Stufenfalz bei Dicke 50 mm möglich.

¹ Nutzlänge bzw. -breite bei Ausführungen mit umlaufendem Stufenfalz.

Technische Daten

Eigenschaft	Zeichen	Beschreibung / Daten			Einheit	Norm
Brandverhalten	—	Euroklasse A2, s1 d0			(-C)	DIN EN 13501-1
Nennwert / Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	λ_D / λ_B	0,085 / 0,090			(W/mK)	DIN EN 13168
Dicke	d	25	35	50		
Bemessungswert des Wärmedurchlasswiderstands	R	0,28	0,39	0,56	(m ² K/W)	DIN EN 13168
Druckspannung bei 10% Stauchung	CS	≥ 200	≥ 200	≥ 150	(kPa)	DIN EN 13168
Biegefestigkeit	σ_b	≥ 1000	≥ 700	≥ 500	(kPa)	DIN EN 12089 Prüfverfahren A
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	μ	2/5			—	DIN 4108-4
Spezifische Wärmekapazität	c_p	2,1			kJ/(kgK)	Prüfzeugnis

Die Angaben dieses Schriftstückes entsprechen unserem Wissenstand und unserer Erfahrungen zum Zeitpunkt der Drucklegung (siehe Druckvermerk). Sofern nicht ausdrücklich vereinbart, stellen sie jedoch keine Zusicherung im Rechtssinne dar. Der Wissens- und Erfahrungsstand entwickelt sich ständig weiter. Bitte achten Sie darauf, stets die aktuelle Auflage dieses Schriftstückes zu verwenden. Die Beschreibung der Produktverwendungen kann besondere Bedingungen und Verhältnisse bei Einzelfällen nicht berücksichtigen. Prüfen Sie deshalb unsere Produkte auf ihre Eignung für den konkreten Verwendungszweck.

Stand: 08.10.2018 JD

Heraklith® ist eine registrierte Marke von

KNAUF INSULATION



www.blauer-angel.de/132

Knauf Insulation GmbH
Heraklithstraße 8
D-84359 Simbach am Inn
Telefon +49 8571 40-0
Telefax +49 8571 40-241
www.knaufinsulation.de

Knauf Gips KG ATE	Schallabsorptionsgrad nach DIN EN ISO 354 gemessen im Hallraum	KNAUF																																																									
<p>Aufbau des Prüfgegenstandes</p> <p>35 mm Heraklith A2-M nichtbrennbare Holzwolle-Platte ca. 16,0 kg/m² Platten aufliegend auf Hallraumboden Stirnseiten mit 40 mm Holzrahmen abgedeckt Prüfaufbau ISO 354 Typ A</p>																																																											
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 15%;">mit Prüfobjekt</td> <td style="width: 15%;">Temperatur 19,6 °C</td> <td style="width: 15%;">Relative Luftfeuchte 54,6 %</td> <td style="width: 15%;">Luftdruck 98,3 kPa</td> <td style="width: 15%;">Hallraumvolumen 198,3 m³</td> </tr> <tr> <td>leer</td> <td>20,2 °C</td> <td>48,7 %</td> <td>98,3 kPa</td> <td>Prüffläche 12,0 m²</td> </tr> </table>			mit Prüfobjekt	Temperatur 19,6 °C	Relative Luftfeuchte 54,6 %	Luftdruck 98,3 kPa	Hallraumvolumen 198,3 m ³	leer	20,2 °C	48,7 %	98,3 kPa	Prüffläche 12,0 m ²																																															
mit Prüfobjekt	Temperatur 19,6 °C	Relative Luftfeuchte 54,6 %	Luftdruck 98,3 kPa	Hallraumvolumen 198,3 m ³																																																							
leer	20,2 °C	48,7 %	98,3 kPa	Prüffläche 12,0 m ²																																																							
<table border="1" style="width: 30%; border-collapse: collapse; float: left;"> <thead> <tr> <th>f [Hz]</th> <th>α_s</th> <th>α_p ¹⁾</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>100</td><td>0,05</td><td></td></tr> <tr><td>125</td><td>0,08</td><td>0,05</td></tr> <tr><td>160</td><td>0,09</td><td></td></tr> <tr><td>200</td><td>0,11</td><td></td></tr> <tr><td>250</td><td>0,12</td><td>0,15</td></tr> <tr><td>315</td><td>0,15</td><td></td></tr> <tr><td>400</td><td>0,19</td><td></td></tr> <tr><td>500</td><td>0,26</td><td>0,25</td></tr> <tr><td>630</td><td>0,31</td><td></td></tr> <tr><td>800</td><td>0,40</td><td></td></tr> <tr><td>1000</td><td>0,52</td><td>0,55</td></tr> <tr><td>1250</td><td>0,68</td><td></td></tr> <tr><td>1600</td><td>0,78</td><td></td></tr> <tr><td>2000</td><td>0,68</td><td>0,65</td></tr> <tr><td>2500</td><td>0,56</td><td></td></tr> <tr><td>3150</td><td>0,46</td><td></td></tr> <tr><td>4000</td><td>0,49</td><td>0,55</td></tr> <tr><td>5000</td><td>0,68</td><td></td></tr> </tbody> </table> <div style="float: right; text-align: center;"> <p style="font-size: small;">Absorptionsgrad α</p> <p style="font-size: small;">Frequenz [Hz]</p> <p style="font-size: small;">—○— α_s —■— α_p - - - - - Bezugskurve</p> </div>			f [Hz]	α_s	α_p ¹⁾	100	0,05		125	0,08	0,05	160	0,09		200	0,11		250	0,12	0,15	315	0,15		400	0,19		500	0,26	0,25	630	0,31		800	0,40		1000	0,52	0,55	1250	0,68		1600	0,78		2000	0,68	0,65	2500	0,56		3150	0,46		4000	0,49	0,55	5000	0,68	
f [Hz]	α_s	α_p ¹⁾																																																									
100	0,05																																																										
125	0,08	0,05																																																									
160	0,09																																																										
200	0,11																																																										
250	0,12	0,15																																																									
315	0,15																																																										
400	0,19																																																										
500	0,26	0,25																																																									
630	0,31																																																										
800	0,40																																																										
1000	0,52	0,55																																																									
1250	0,68																																																										
1600	0,78																																																										
2000	0,68	0,65																																																									
2500	0,56																																																										
3150	0,46																																																										
4000	0,49	0,55																																																									
5000	0,68																																																										

Anlage 4: Berechnungen Schallabsorption

Anlage 4.1 Buche glatt

Berechnung des bewerteten Schallabsorptionsgrades nach EN ISO 11654, Ausgabe Juli 1997

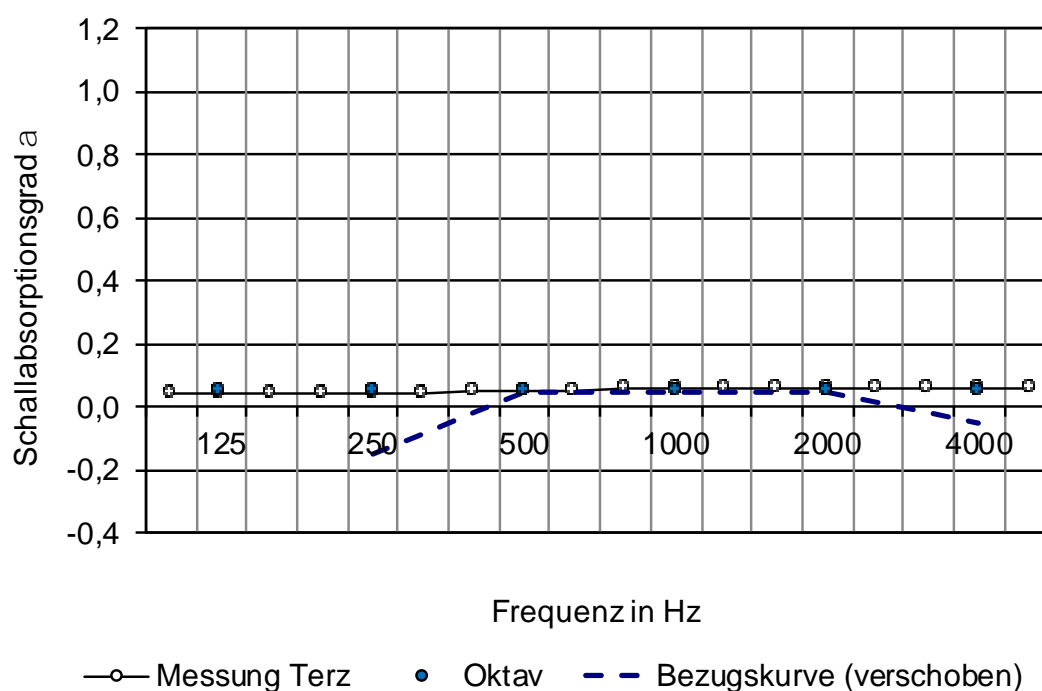
Objekt: Deckenunterseite HBV mit Buche

Projektnummer:

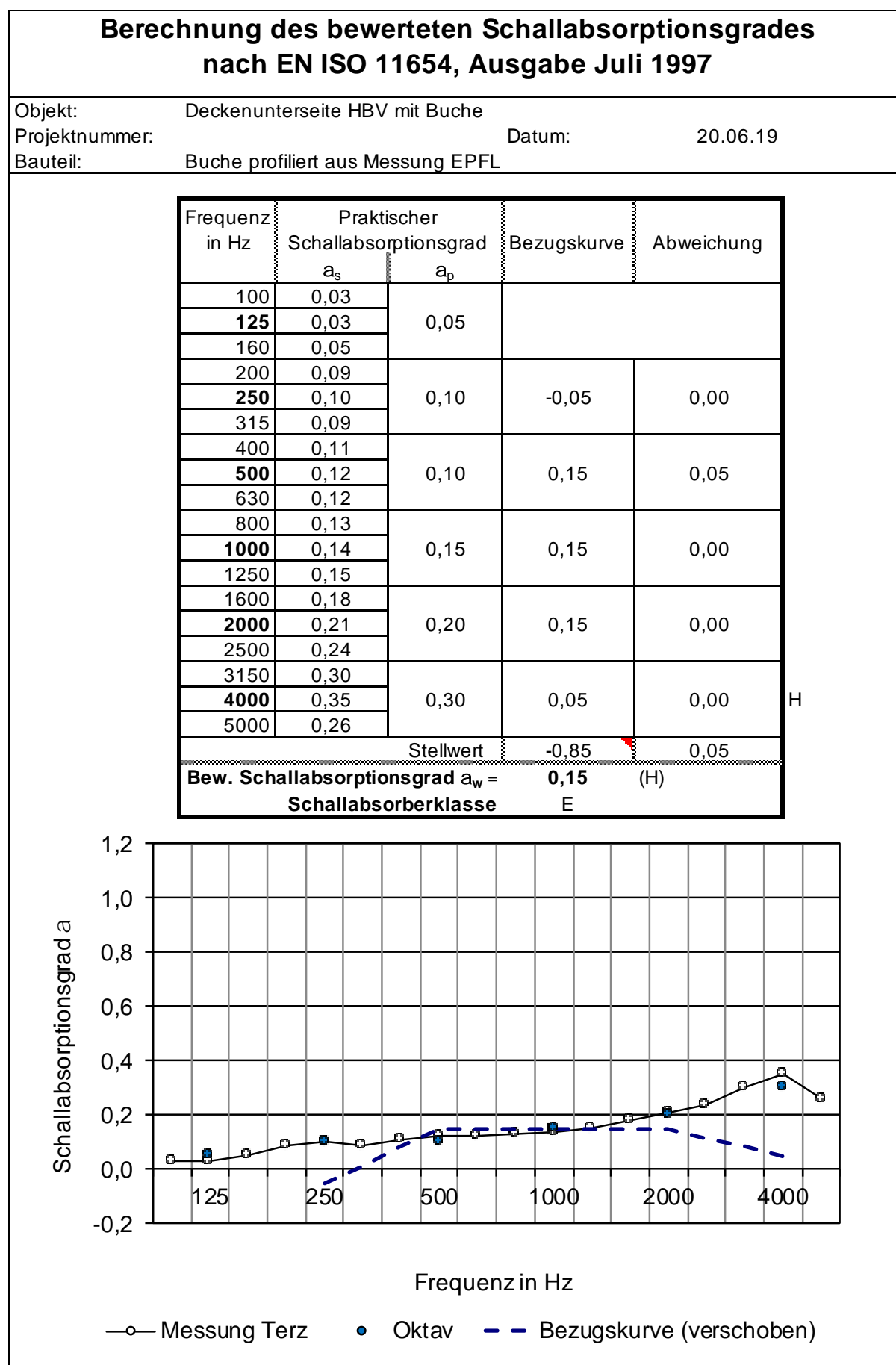
Datum: 04.06.19

Bauteil: Buche glatt (Parkettfussboden aus Fasold Bauphys. Entwurfslehre, Bd. 5, 1975)

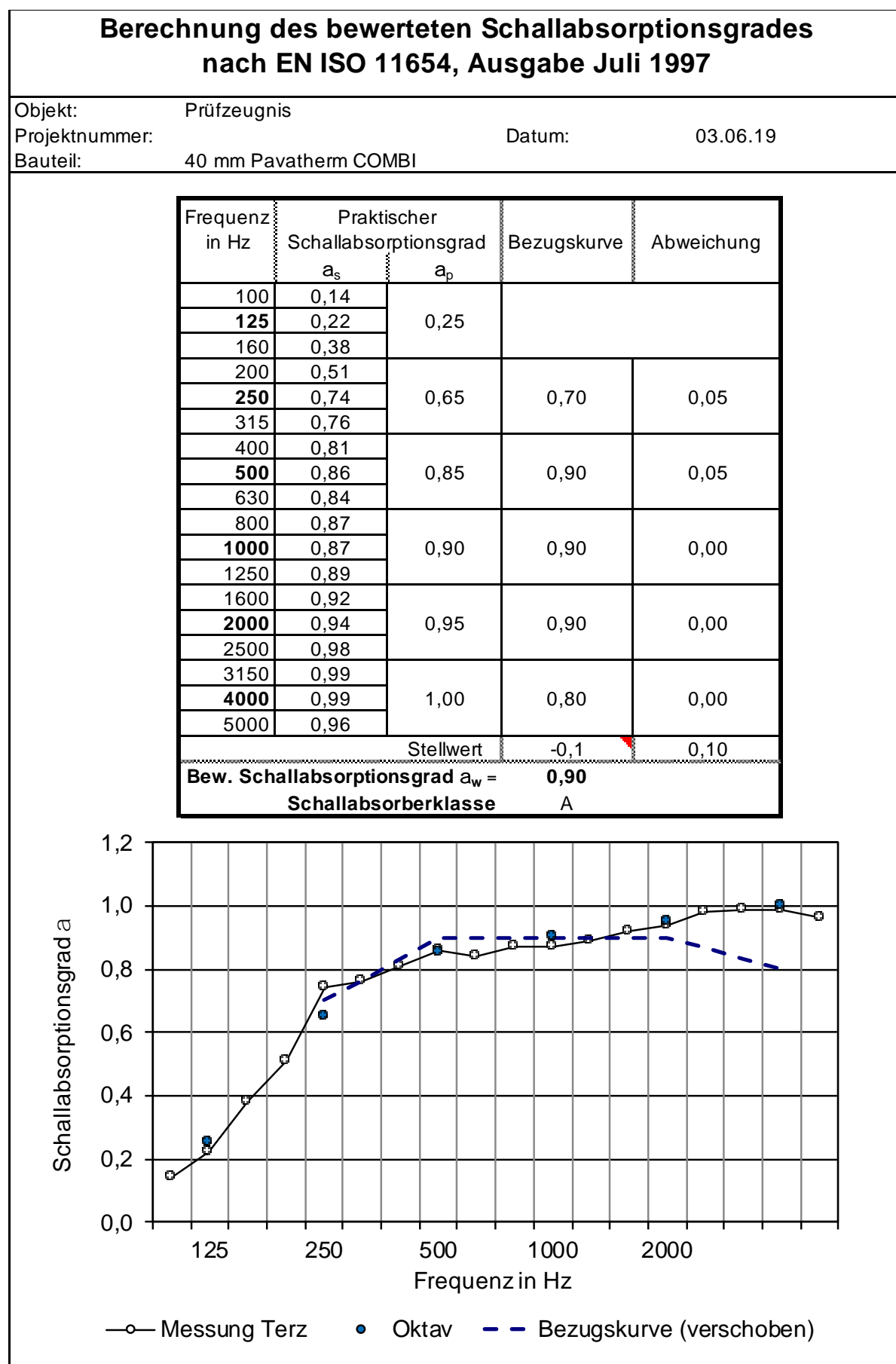
Frequenz in Hz	Praktischer Schallabsorptionsgrad		Bezugskurve	Abweichung
	a _s	a _p		
100	0,04	0,05		
125	0,04			
160	0,04			
200	0,04	0,05	-0,15	0,00
250	0,04			
315	0,04			
400	0,05	0,05	0,05	0,00
500	0,05			
630	0,05			
800	0,06	0,05	0,05	0,00
1000	0,06			
1250	0,06			
1600	0,06	0,05	0,05	0,00
2000	0,06			
2500	0,06			
3150	0,06	0,05	-0,05	0,00
4000	0,06			
5000	0,06			
Stellwert			-0,95	0,00
Bew. Schallabsorptionsgrad a _w =			0,05	
Schallabsorberklasse			keine	



Anlage 4.2 Buche profiliert



Anlage 4.3: Pavatherm COMBI

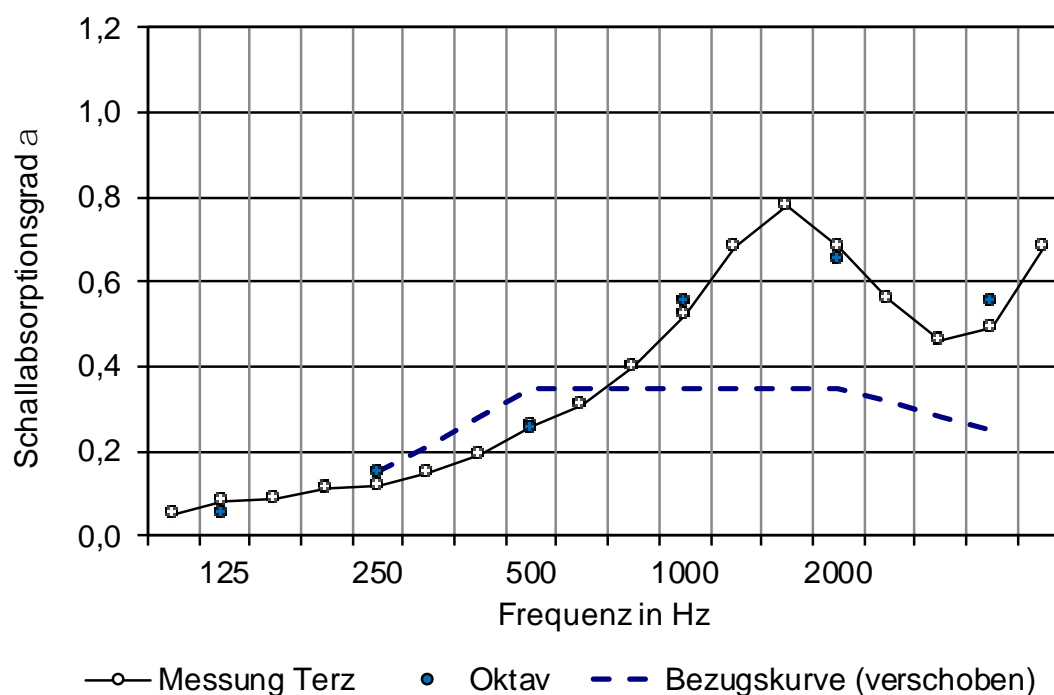


Anlage 4.4: Heraklith A2-M

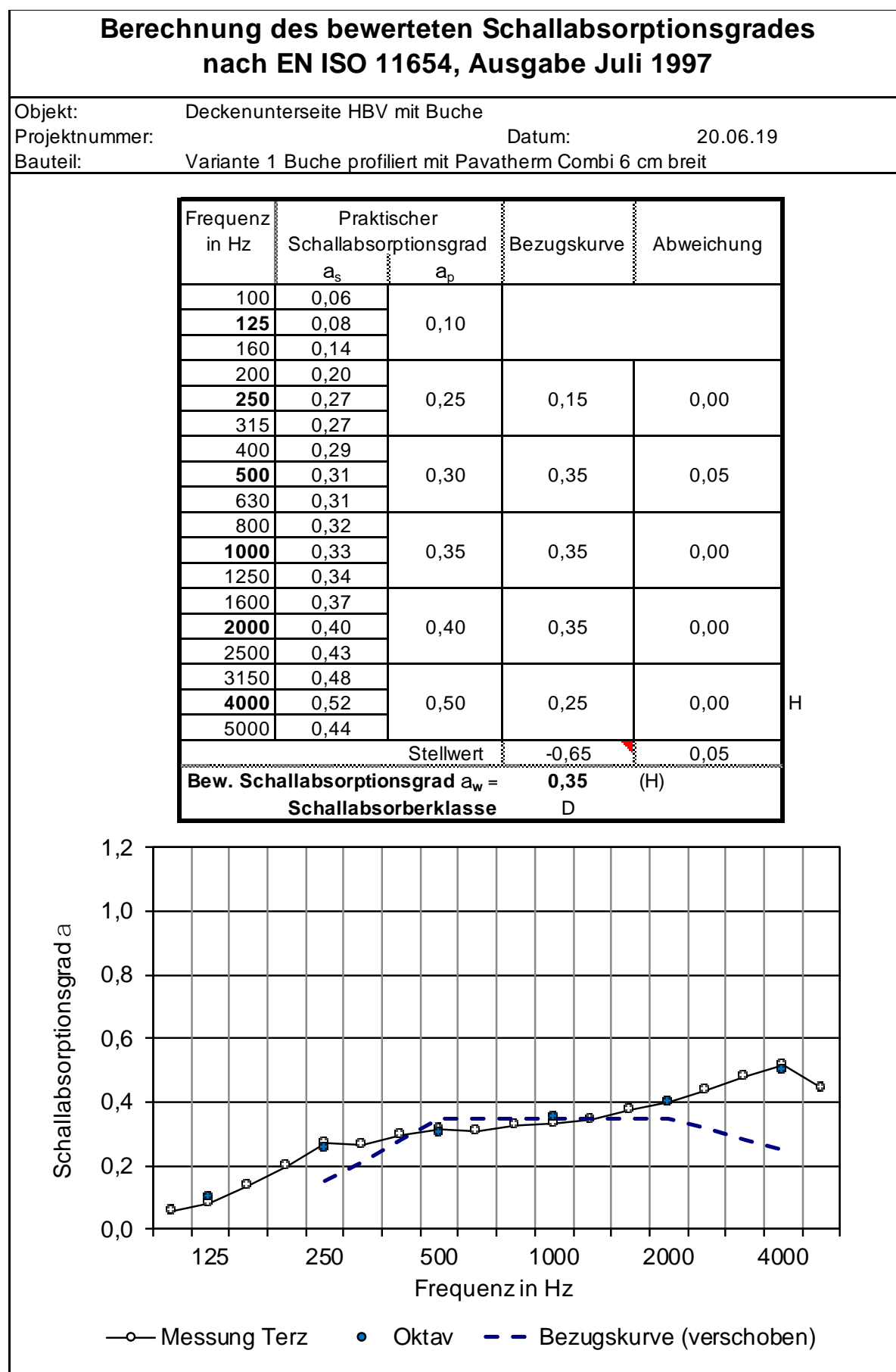
Berechnung des bewerteten Schallabsorptionsgrades nach EN ISO 11654, Ausgabe Juli 1997

Objekt: Prüfzeugnis
 Projektnummer: Datum: 03.06.19
 Bauteil: 35 mm Heraklith A2-M

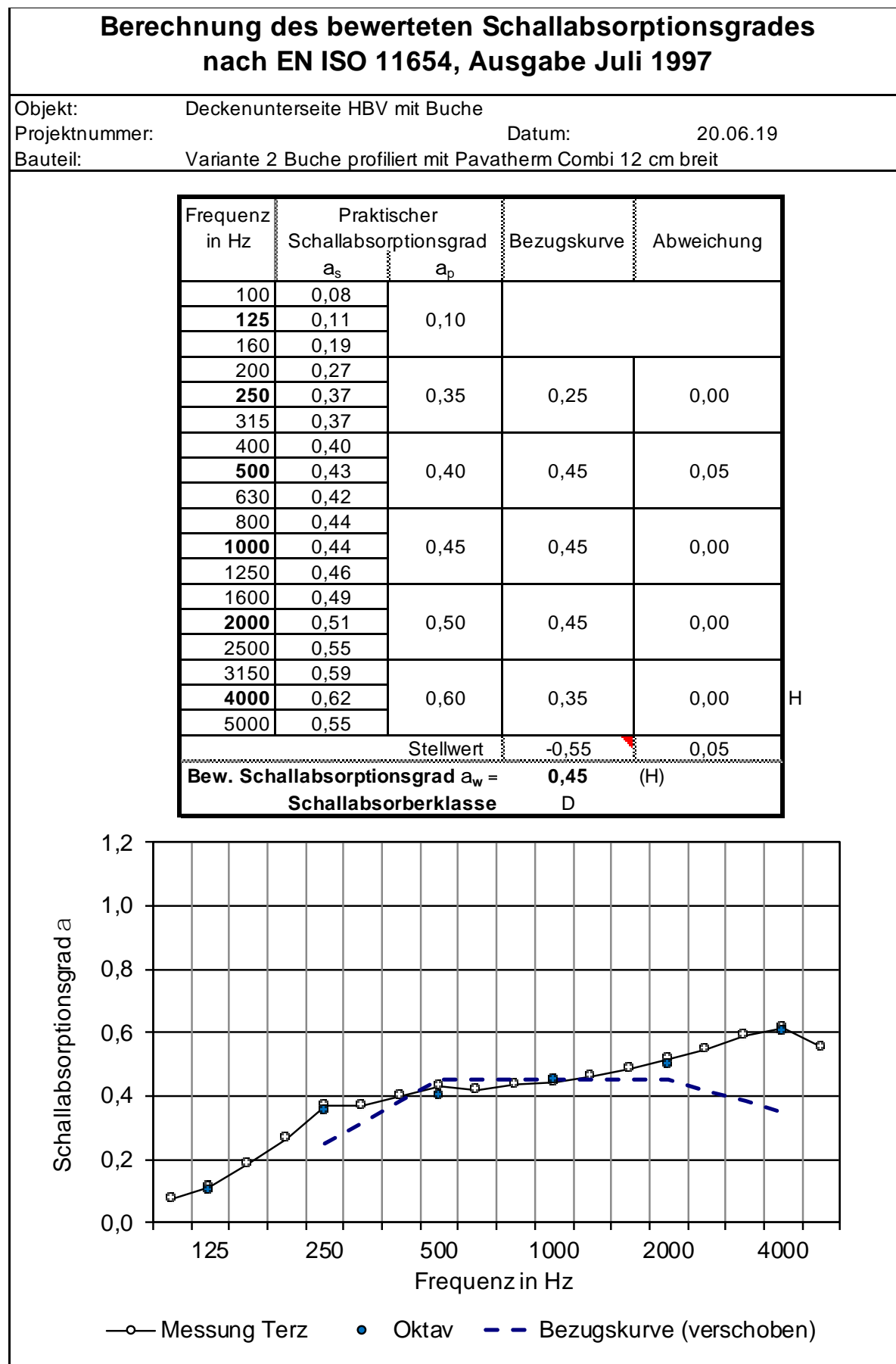
Frequenz in Hz	Praktischer Schallabsorptionsgrad		Bezugskurve	Abweichung
	a _s	a _p		
100	0,05	0,05		
125	0,08			
160	0,09			
200	0,11	0,15	0,15	0,00
250	0,12			
315	0,15			
400	0,19	0,25	0,35	0,10
500	0,26			
630	0,31			
800	0,40	0,55	0,35	0,00
1000	0,52			
1250	0,68			
1600	0,78	0,65	0,35	0,00
2000	0,68			
2500	0,56			
3150	0,46	0,55	0,25	0,00
4000	0,49			
5000	0,68			
Stellwert			-0,65	0,10
Bew. Schallabsorptionsgrad a _w =			0,35	(H)
Schallabsorberklasse			D	



Anlage 4.5: Variante 1



Anlage 4.6: Variante 2

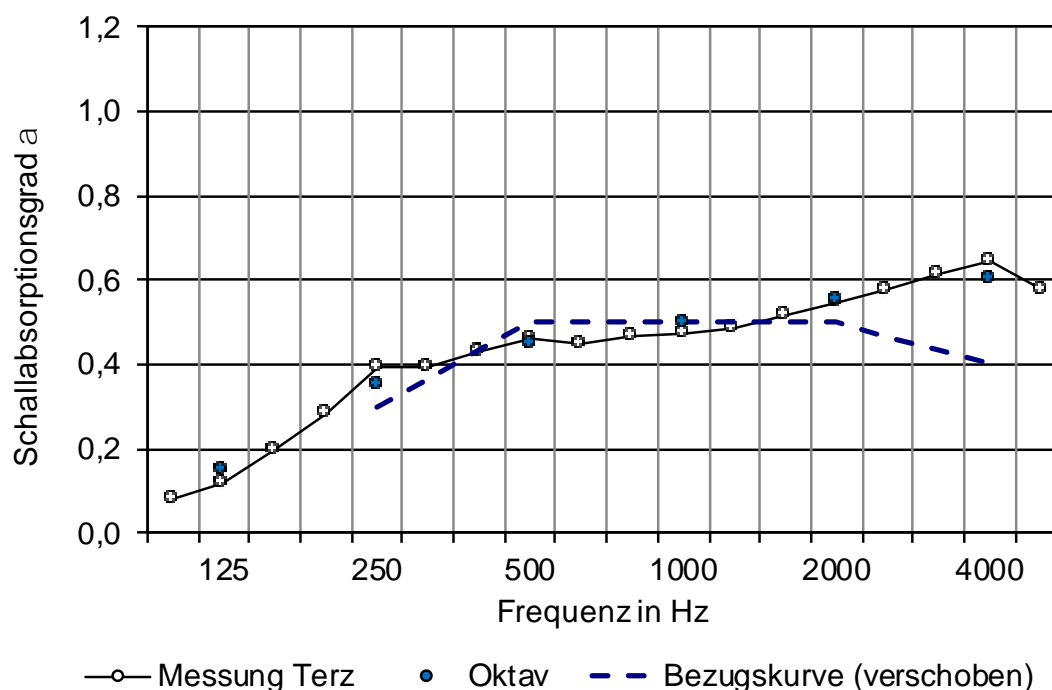


Anlage 4.7: Variante 3

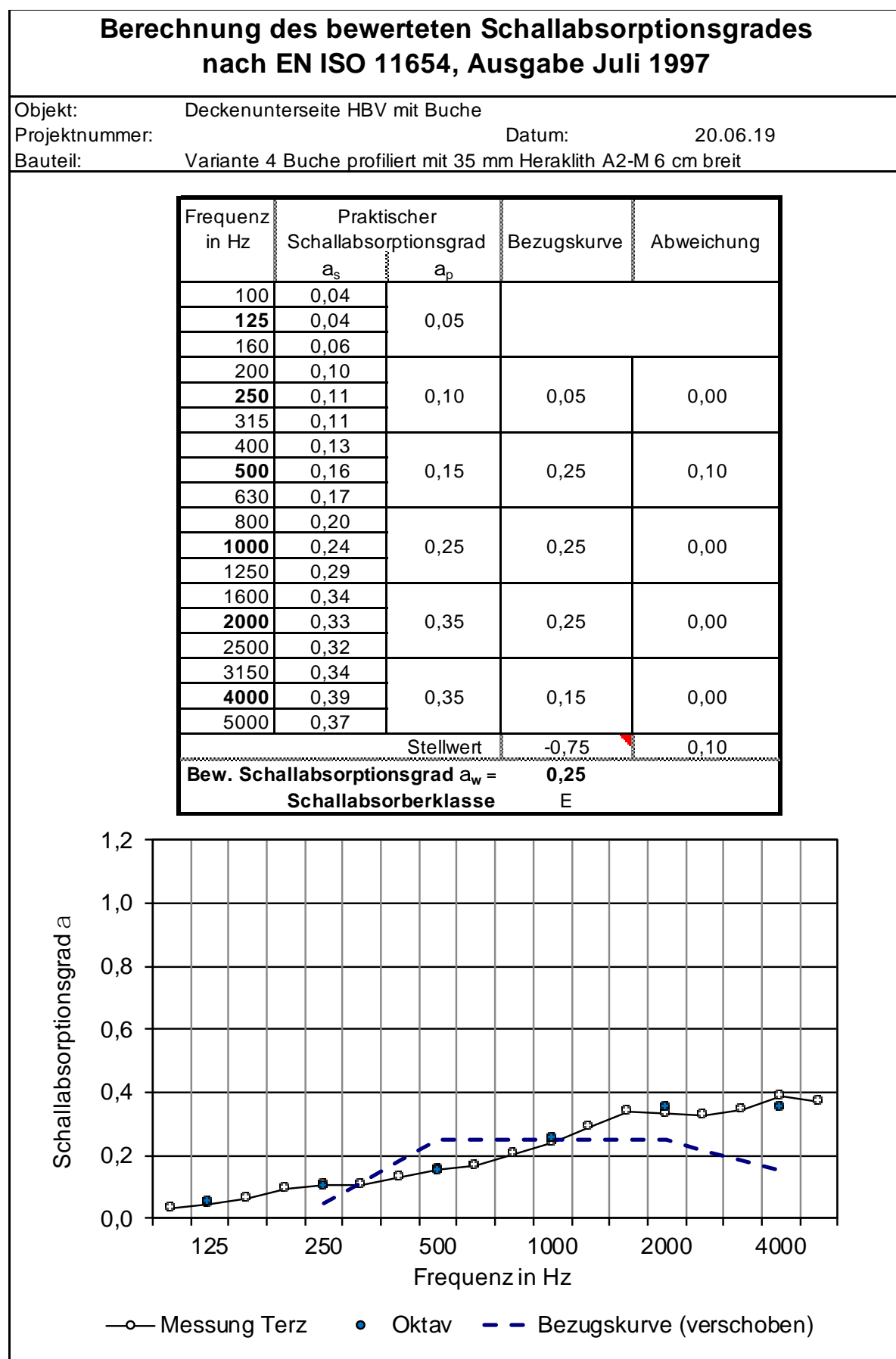
Berechnung des bewerteten Schallabsorptionsgrades nach EN ISO 11654, Ausgabe Juli 1997

Objekt: Deckenunterseite HBV mit Buche
 Projektnummer: Datum: 04.06.19
 Bauteil: Variante 3 Buche profiliert mit Pavatherm Combi 6 cm gekreuzt

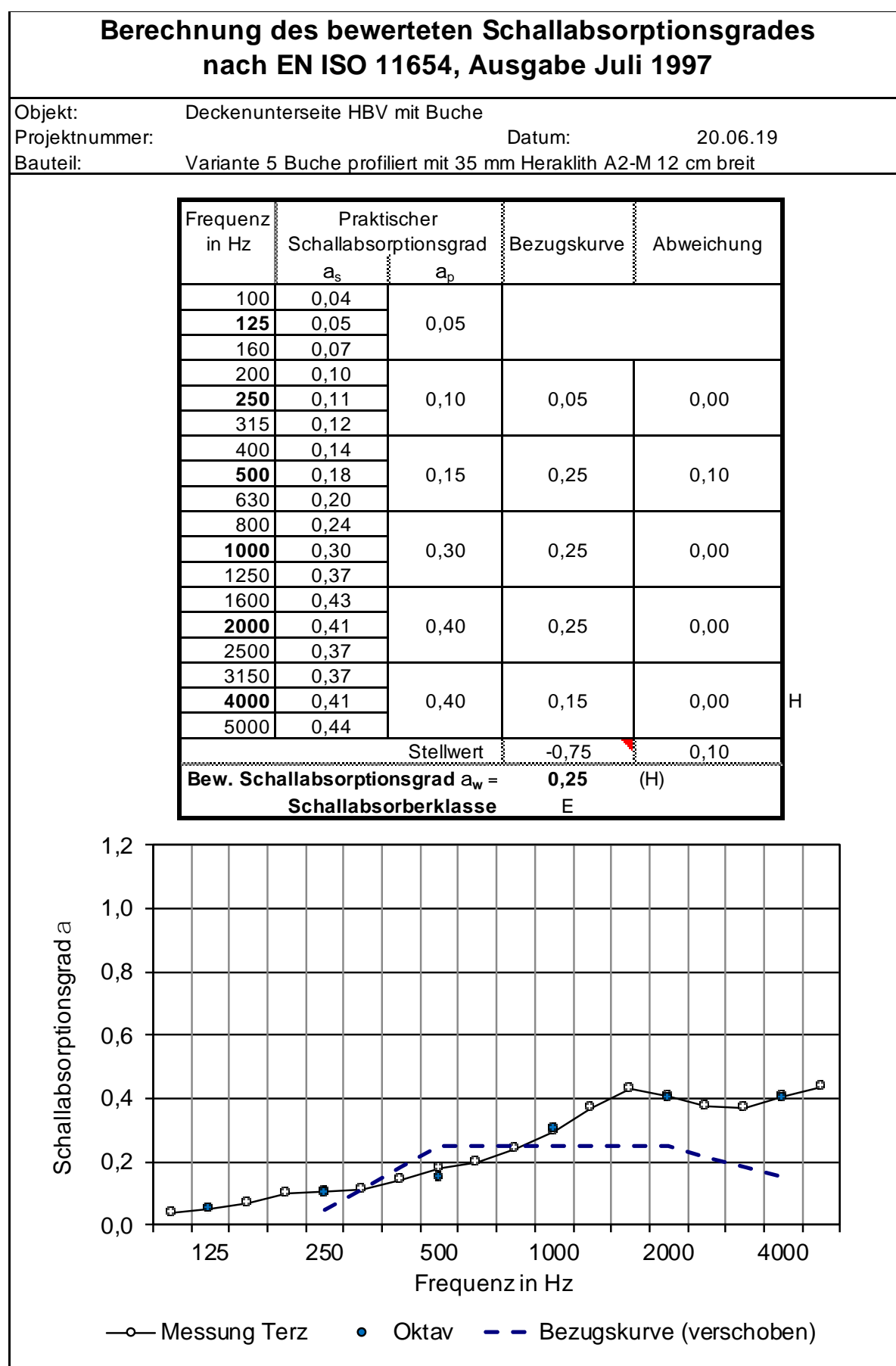
Frequenz in Hz	Praktischer Schallabsorptionsgrad		Bezugskurve	Abweichung
	a _s	a _p		
100	0,08	0,15		
125	0,12			
160	0,20			
200	0,28	0,35	0,30	0,00
250	0,39			
315	0,40			
400	0,43	0,45	0,50	0,05
500	0,46			
630	0,45			
800	0,47	0,50	0,50	0,00
1000	0,47			
1250	0,49			
1600	0,52	0,55	0,50	0,00
2000	0,54			
2500	0,58			
3150	0,62	0,60	0,40	0,00
4000	0,64			
5000	0,58			
Stellwert			-0,5	0,05
Bew. Schallabsorptionsgrad a _w =			0,50	
Schallabsorberklasse			D	



Anlage 4.8: Variante 4



Anlage 4.9: Variante 5

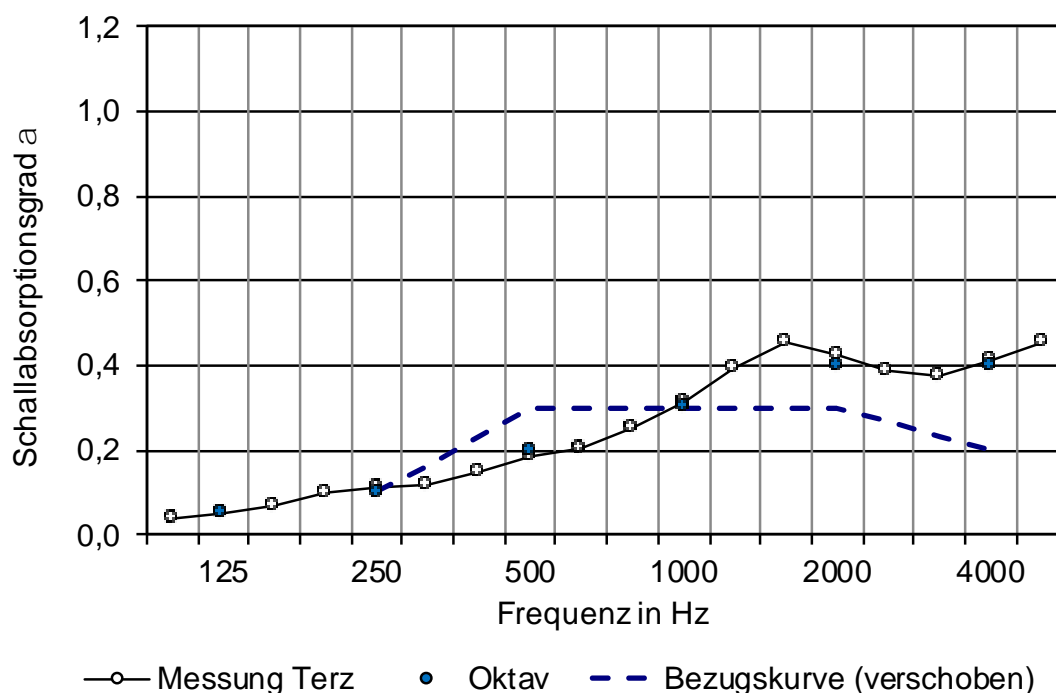


Anlage 4.10: Variante 6

Berechnung des bewerteten Schallabsorptionsgrades nach EN ISO 11654, Ausgabe Juli 1997

Objekt: Deckenunterseite HBV mit Buche
 Projektnummer: Datum: 04.06.19
 Bauteil: Variante 6 Buche profiliert mit 35 mm Heraklith A2-M 6 cm breit gekreuzt

Frequenz in Hz	Praktischer Schallabsorptionsgrad		Bezugskurve	Abweichung
	a _s	a _p		
100	0,04	0,05		
125	0,05			
160	0,07			
200	0,10	0,10	0,10	0,00
250	0,11			
315	0,12			
400	0,15	0,20	0,30	0,10
500	0,18			
630	0,21			
800	0,25	0,30	0,30	0,00
1000	0,31			
1250	0,39			
1600	0,45	0,40	0,30	0,00
2000	0,42			
2500	0,39			
3150	0,37	0,40	0,20	0,00
4000	0,41			
5000	0,45			
Stellwert			-0,7	0,10
Bew. Schallabsorptionsgrad a _w =			0,30	
Schallabsorberklasse			D	



Anlage 5: Luftschalldämmung Ergebnisse

Anlage 5.1: Schalldämm-Mass der Geschossdecke von A nach B

Schalldämm-Mass nach ISO 10140-2

Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand

Auftraggeber: BAFU

Prüfdatum: 18.03.2019

Hersteller: Fagus Suisse und Häring

Aufbau des Prüfgegenstandes: HBV-Decke: 150 mm Beton + 81 mm Baubuche, gedübelt,
Elementbreite 115 cm, 5 Elemente
Elemente mit Klebeband abgedichtet

Luftdruck: 950.0 kPa

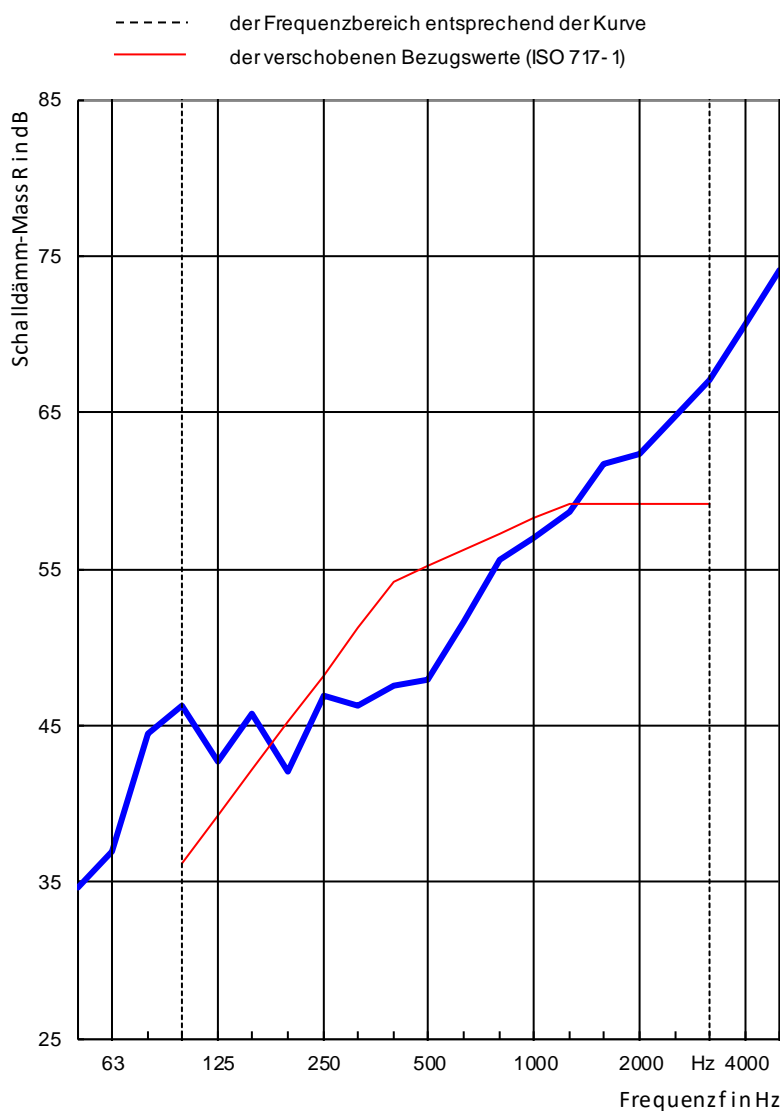
Lufttemperatur: 15.9 °C

Relative Luftfeuchtigkeit: 58.0 %

Flächenbezogene Masse:

Fläche der Prüföffnung: 24.07 m²Senderraum Volumen: 93.9 m³Empfangsraum Volumen: 88.8 m³

Frequenz f [Hz]	R Terz [dB]
50	34.6
63	36.9
80	44.5
100	46.3
125	42.7
160	45.8
200	42.1
250	46.9
315	46.3
400	47.5
500	47.9
630	51.6
800	55.6
1000	57.0
1250	58.7
1600	61.7
2000	62.4
2500	64.8
3150	67.1
4000	70.6
5000	74.1



Bewertung nach ISO 717-1

 $R_w(C; C_{tr}) = 55.2$ (-1 ; -4) dBDie Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen,
die in Terzbändern gewonnen wurden. $C_{50-3150} = -1$ dB $C_{50-5000} = 0$ dB $C_{100-5000} = 0$ dB $C_{tr,50-3150} = -5$ dB $C_{tr,50-5000} = -5$ dB $C_{tr,100-5000} = -4$ dB

Name des Prüfinstitut: BFH

Nr. des Prüfberichtes: BFH_03_AB

Datum: 18.03.2019

Unterschrift: Amabel Melián Hernández

Anlage 5.2: Schalldämm-Mass der Geschossdecke von B nach A

Schalldämm-Mass nach ISO 10140-2

Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand

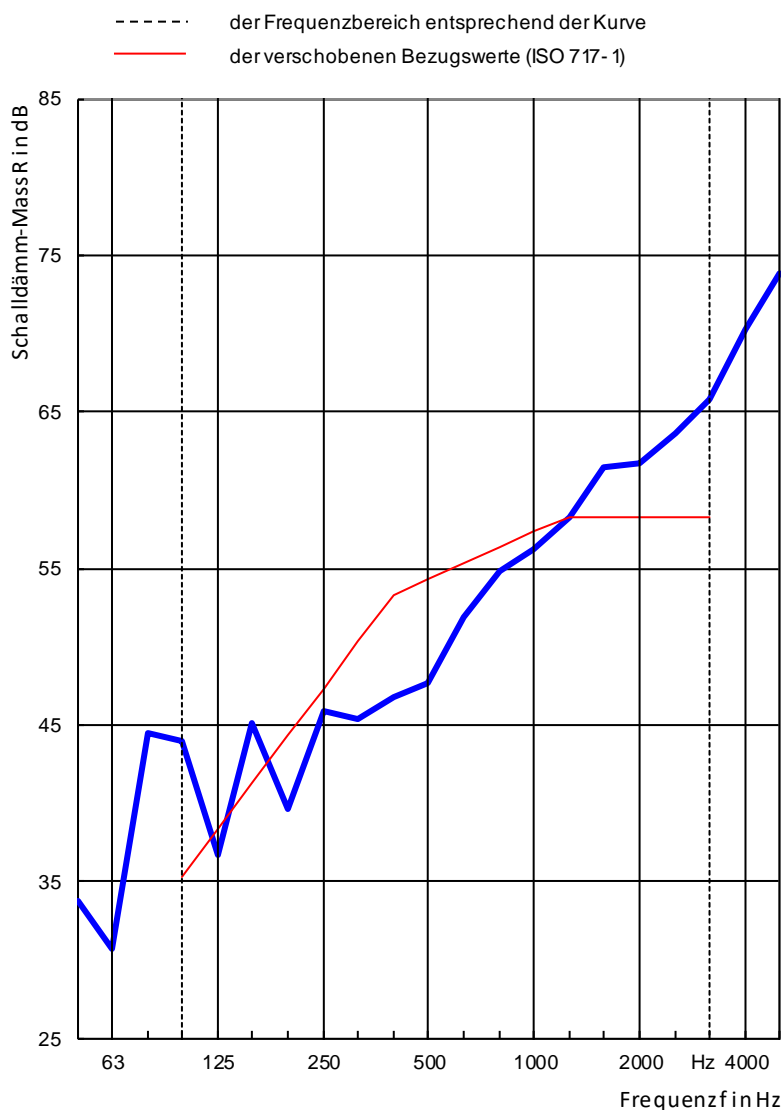
Auftraggeber: BAFU
 Hersteller: Fagus Suisse und Häring
 Prüfdatum: 18.03.2019

Aufbau des Prüfgegenstandes: HBV-Decke: 150 mm Beton + 81 mm Baubuche, gedübelt,
 Elementbreite 115 cm, 5 Elemente
 Elemente mit Klebeband abgedichtet

Luftdruck: 950.0 kPa
 Lufttemperatur: 16.2 °C
 Relative Luftfeuchtigkeit: 58.0 %

Flächenbezogene Masse:
 Fläche der Prüföffnung: 24.07 m²
 Senderraum Volumen: 88.8 m³
 Empfangsraum Volumen: 93.9 m³

Frequenz f [Hz]	R Terz [dB]
50	33.7
63	30.7
80	44.5
100	43.9
125	36.7
160	45.1
200	39.6
250	45.9
315	45.3
400	46.8
500	47.7
630	51.9
800	54.8
1000	56.2
1250	58.2
1600	61.4
2000	61.7
2500	63.6
3150	65.8
4000	70.2
5000	73.8



Bewertung nach ISO 717-1

 $R_w(C; C_{tr}) = 54.3$ (-1 ; -5) dBDie Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen,
die in Terzbändern gewonnen wurden. $C_{50-3150} = -2$ dB $C_{50-5000} = -1$ dB $C_{100-5000} = 0$ dB $C_{tr,50-3150} = -6$ dB $C_{tr,50-5000} = -6$ dB $C_{tr,100-5000} = -5$ dB

Name des Prüfinstitut: BFH

Nr. des Prüfberichtes: BFH_03_BA

Datum: 18.03.2019

Unterschrift: Amabel Melián Hernández

Anlage 5.3: Schalldämm-Mass der Geschossdecke mit Unterlagsboden von A nach B

Schalldämm-Mass nach ISO 10140-2

Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand

Auftraggeber: BAFU Prüfdatum: 12.03.2019

Hersteller: Fagus Suisse und Häring

Aufbau des Prüfgegenstandes: Betonplatte 70mm
 Trittschalldämmung 25 mm Mineralfaser Isover PS81
 HBV-Decke: 150 mm Beton + 81mm Baubuche, gedübelt,
 Elementbreite 115 cm, 5 Elemente
 Elemente mit Klebeband abgedichte

Luftdruck: 970.0 kPa

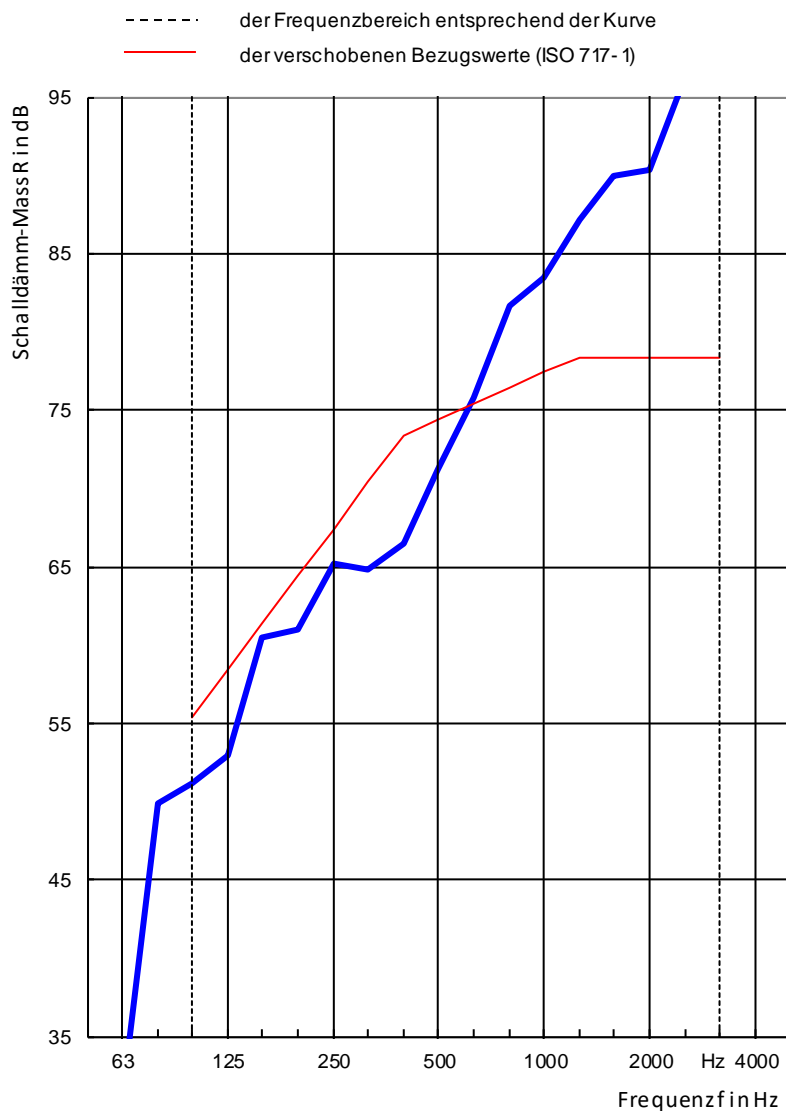
Lufttemperatur: 13.2 °C

Relative Luftfeuchtigkeit: 55.0 %

Flächenbezogene Masse:

Fläche der Prüföffnung: 24.07 m²Senderraum Volumen: 91.5 m³Empfangsraum Volumen: 88.8 m³

Frequenz f [Hz]	R Terz [dB]
50	31.0
63	30.9
80	49.9
100	51.1
125	52.9
160	60.5
200	61.0
250	65.2
315	64.8
400	66.5
500	71.2
630	75.8
800	81.6
1000	83.5
1250	87.2
1600	90.0
2000	90.3
2500	96.4
3150	100.4
4000	98.6
5000	95.9



Bewertung nach ISO 717-1

 $R_w(C; C_{tr}) = 74.4$ (-2 ; -7) dB

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden.

 $C_{50-3150} = -9$ dB $C_{50-5000} = -8$ dB $C_{100-5000} = -1$ dB $C_{tr,50-3150} = -22$ dB $C_{tr,50-5000} = -22$ dB $C_{tr,100-5000} = -7$ dB

Name des Prüfinstitut: BFH

Nr. des Prüfberichtes: BFH_01_AB

Datum: 12.03.2019

Unterschrift: Amabel Melián Hernández

Anlage 5.4: Schalldämm-Mass der Geschossdecke mit Unterlagsboden von B nach A

Schalldämm-Mass nach ISO 10140-2

Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand

Auftraggeber: BAFU

Prüfdatum: 12.03.2019

Hersteller: Fagus Suisse und Häring

Aufbau des Prüfgegenstandes: Betonplatte 70 mm
 Trittschalldämmung 25 mm Mineralfaser Isover PS81
 HBV-Decke: 150 mm Beton + 81 mm Baubuche, gedübelt,
 Elementbreite 115 cm, 5 Elemente
 Elemente mit Klebeband abgedichte

Luftdruck: 970.0 kPa

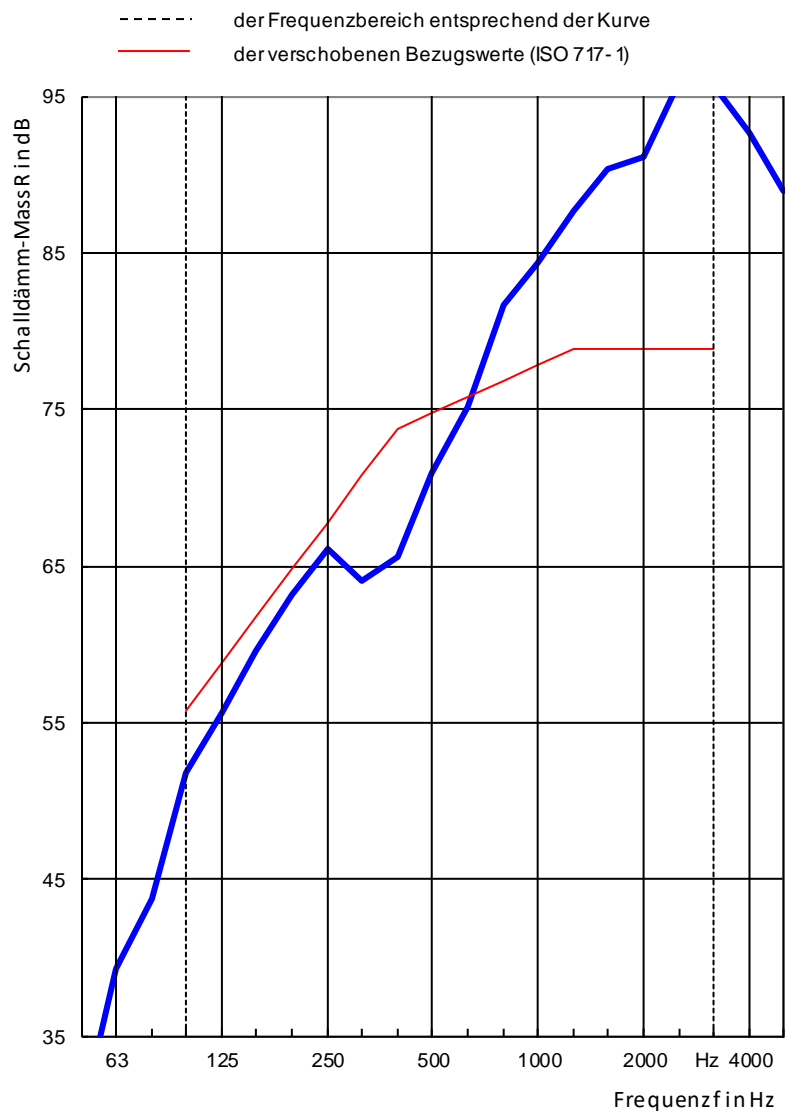
Lufttemperatur: 13.2 °C

Relative Luftfeuchtigkeit: 55.0 %

Flächenbezogene Masse:

Fläche der Prüföffnung: 24.07 m²Senderraum Volumen: 88.8 m³Empfangsraum Volumen: 91.5 m³

Frequenz f [Hz]	R Terz [dB]
50	30.0
63	39.3
80	43.8
100	51.8
125	55.6
160	59.6
200	63.2
250	66.1
315	64.1
400	65.6
500	71.0
630	75.2
800	81.7
1000	84.4
1250	87.6
1600	90.3
2000	91.1
2500	96.0
3150	95.7
4000	92.7
5000	88.9



Bewertung nach ISO 717-1

 $R_w(C; C_{tr}) = 74.8 \text{ (} -1 \text{ ; } -6 \text{) dB}$

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden.

 $C_{50-3150} = -7 \text{ dB}$ $C_{50-5000} = -6 \text{ dB}$ $C_{100-5000} = -1 \text{ dB}$ $C_{tr,50-3150} = -20 \text{ dB}$ $C_{tr,50-5000} = -20 \text{ dB}$ $C_{tr,100-5000} = -7 \text{ dB}$

Name des Prüfinstitut: BFH

Nr. des Prüfberichtes: BFH_01_BA

Datum: 12.03.2019

Unterschrift: Amabel Melián Hernández

Anlage 6: Trittschalldämmung Ergebnisse

Anlage 6.1: Trittschalldämmung der Geschossdecke.

Norm-Trittschallpegel nach ISO 10140-3

Messung der Trittschalldämmung von Decken in Prüfständen

Auftraggeber: BAFU

Prüfdatum: 18.03.2019

Hersteller: Fagus Suisse und Häring

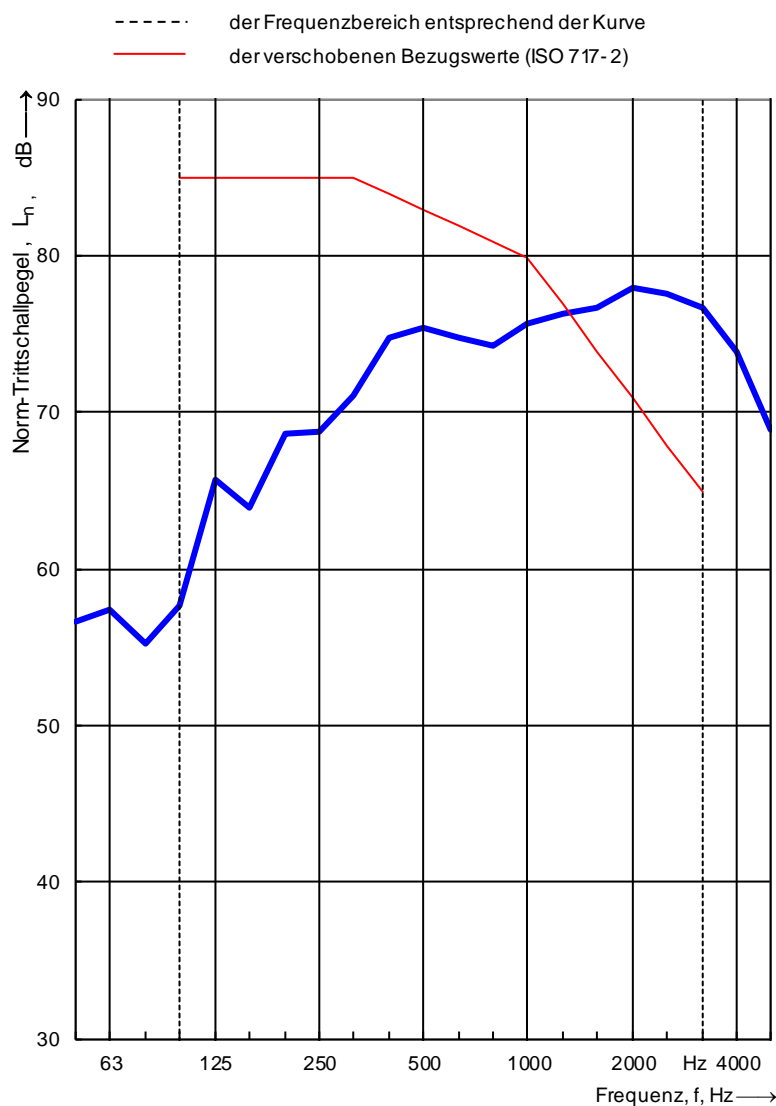
Aufbau des Prüfgegenstandes: HBV-Decke: 150 mm Beton + 81 mm Baubuche, gedübelt,
Elementbreite 115 cm, 5 Elemente
Elemente mit Klebeband abgedichtet

Temperatur: 16.2 °C

Luftfeuchte: 58.0 %

Senderraum Volumen: 93.9 m³Empfangsraum Volumen: 88.8 m³

Frequenz f [Hz]	L _n Terz [dB]
50	56.6
63	57.4
80	55.2
100	57.6
125	65.7
160	63.9
200	68.6
250	68.7
315	71.0
400	74.8
500	75.4
630	74.7
800	74.2
1000	75.6
1250	76.3
1600	76.6
2000	77.9
2500	77.6
3150	76.6
4000	73.8
5000	68.9



Bewertung nach ISO 717-2

L_{rw}(C_i) = 82.7 (- 12) dBC₁₅₀₋₂₅₀₀ = - 12 dB

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen,
die in Terzbändern gewonnen wurden.

Name des Prüfinstitut: BFH

Nr. des Prüfberichtes: BFH_03_TS

Datum: 18.03.2019

Unterschrift: Amabel Melián Hernández

Anlage 6.2: Trittschalldämmung der Geschossdecke mit Unterlagsboden.

Norm-Trittschallpegel nach ISO 10140-3

Messung der Trittschalldämmung von Decken in Prüfständen

Auftraggeber: BAFU Prüfdatum: 12.03.2019

Hersteller: Fagus Suisse und Häring

Aufbau des Prüfgegenstandes: Betonplatte 70mm
 Trittschalldämmung 25 mm Mineralfaser Isover PS81
 HBV-Decke: 150 mm Beton + 81 mm Baubuche, gedübelt,
 Elementbreite 115 cm, 5 Elemente
 Elemente mit Klebeband abgedichte

Temperatur: 13.2 °C

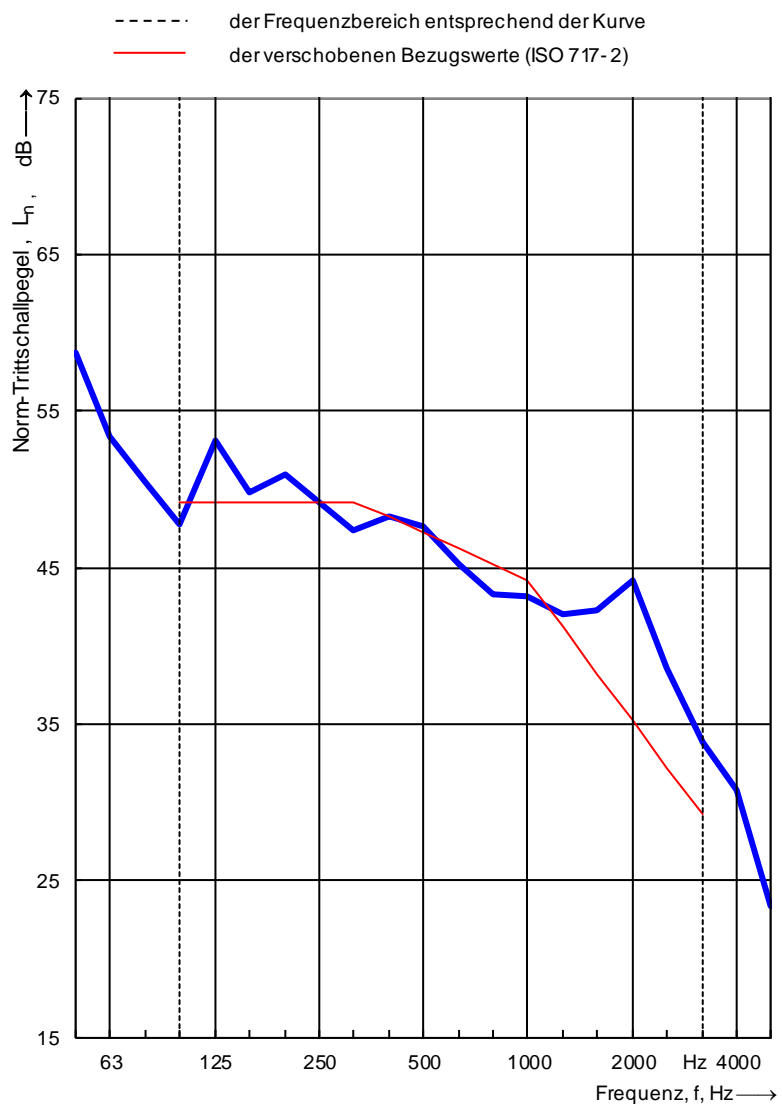
Luftfeuchte: 55.0 %

Flächenbezogene Masse:

Abbindzeit:

Senderraum Volumen: 91.5 m³Empfangsraum Volumen: 88.8 m³

Frequenz f [Hz]	L _n Terz [dB]
50	58.7
63	53.3
80	50.4
100	47.7
125	53.1
160	49.8
200	51.0
250	49.2
315	47.3
400	48.2
500	47.6
630	45.2
800	43.3
1000	43.2
1250	42.0
1600	42.2
2000	44.2
2500	38.5
3150	33.8
4000	30.8
5000	23.4



Bewertung nach ISO 717-2

L_{rw} (C₁) = 47.2 (-4) dBC₁₅₀₋₂₅₀₀ = 0 dB

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen,
 die in Terzbändern gewonnen wurden.

Name des Prüfinstitut: BFH

Nr. des Prüfberichtes: BFH_01_TS

Datum: 12.03.2019

Unterschrift: Amabel Melián Hernández



Entwicklung und Optimierung einer Holzbetonverbunddecke mit Buche für Büro- und Wohngebäude

Bauteilkatalog

Bericht Nr.	R.008730-10-72FE-BT01
Projekt Nr.	R.008730-10-72FE-01
Klassifizierung	Öffentlich
Datum	26. Juni 2019
Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt – BAFU Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Claire-Lise Suter Thalmann
Projektnummer BAFU	2017.08
Adresse der Forschungsstelle	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur Kompetenzbereich Bauphysik und Energie Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel Tel / Fax +41 (0)32 344 0 341 / 391 www.ahb.bfh.ch
Verfasser	Prof. Dr. Christoph Geyer / Amabel Melián Hernández 
Projektverantwortlicher	Prof. Dr. Christoph Geyer 
Institutsleiter	Prof. Andreas Müller 

Inhaltsverzeichnis

Bauteilkatalog	1
1 Einleitung	3
1.1 Deckensysteme für die wirksame Wärmekapazität	3
1.2 Deckensysteme für die Schallabsorption	5
2 Definitionen	6
2.1 Wirksame Wärmekapazität, κ	6
2.2 Schallabsorptionsgrad, α	8
2.3 Bewerteter Schallabsorptionsgrad nach EN ISO 11654	8
3 Eigenschaften der Materialien	9
3.1 Materialien für die wirksame Wärmekapazität	9
3.2 Materialien für die Schallabsorption	11
4 Ergebnisse	12
5 Literaturverzeichnis	17
6 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	17

1 Einleitung

In diesem Bauteilkatalog werden die bauphysikalischen Eigenschaften der verschiedenen Varianten der untersuchten Deckensysteme für die Holzbetonverbunddecke mit Buche zusammengestellt.

1.1 Deckensysteme für die wirksame Wärmekapazität

Die dynamische Wärmekapazität der Deckenunterseite der Holzbetonverbunddecke mit Buche wird durch verschiedene Profilierungen der Deckenunterseite verbessert. Hierfür werden folgende Profilierungen untersucht:

- Profilierte Decke (mit konischen Nuten)
- Variante A: Profilierte Decke mit schallabsorbierenden Kassetten, Steghöhe 150 mm
- Variante B: Profilierte Decke mit schallabsorbierenden Kassetten, Steghöhe 80 mm
- Variante C: Profilierte Decke mit Streifen aus schallabsorbierendem Polyurethanschaum, Dicke x Breite = 20 x 60 mm
- Variante D: Profilierte Decke mit gekreuzten Streifen aus schallabsorbierendem Polyurethanschaum, Dicke x Breite = 20 x 60 mm
- Variante E: Profilierte Decke mit Streifen aus schallabsorbierendem Heraklith A2-M, Dicke x Breite = 25 x 60 mm
- Variante F: Profilierte Decke mit gekreuzten Streifen aus schallabsorbierendem Heraklith A2-M, Dicke x Breite = 25 x 60 mm
- Variante G: Holzdecke mit Latten und Streifen aus Heraklith A2-M, Dicke x Breite = 25 x 40 mm
- Variante H: Holzdecke mit Latten und breiten Streifen aus Heraklith A2-M, Dicke x Breite = 25 x 80 mm
- Variante I: Holzdecke mit Latten mit Streifen aus Buchenspänen, Dicke x Breite = 25 x 40 mm
- Variante J: Holzdecke mit Latten mit breiten Streifen aus Buchenspänen, Dicke x Breite = 25 x 80 mm
- Variante K: Abgehängte Decke mit Lochplatte aus Buche mit Löchern $\varnothing = 20$ mm
- Variante L: Abgehängte Decke mit Lochplatte aus Buche mit Löchern $\varnothing = 20, 10$ und 5 mm

Die Deckensysteme, welche für die Untersuchung der dynamischen Wärmekapazität verwandt wurden, sind in Tab. 3 zusammengestellt.

Für diese Varianten der Deckenunterseite wird die wirksame Wärmekapazität, κ nach EN ISO 13786 [1] angegeben.

1.2 Deckensysteme für die Schallabsorption

Die Schallabsorption der Deckenunterseite der Holzbetonverbunddecke mit Buche wird durch verschiedene Profilierungen der Deckenunterseite verbessert. Hierfür werden folgende Profilierungen untersucht:

- Buche glatt: die glatte Deckenunterseite aus Buche
- Profilierte Decke: in der Deckenunterseite wird eine lineare Profilierung eingearbeitet.
- Variante 1: Profilierte Holzdecke mit einem Streifen schallabsorbierendem Pavatherm-COMBI: Dieser Deckenaufbau stellt eine Kombination der profilierten Decke und Aussparungen dar, die mit schallabsorbierendem Material ausgefüllt werden ($h \times b = 40 \times 60 \text{ mm}$).
- Variante 2: Profilierte Holzdecke mit einem Streifen mit doppelter Fläche schallabsorbierendem Pavatherm-COMBI ($h \times b = 40 \times 120 \text{ mm}$).
- Variante 3: Profilierte Holzdecke mit doppelter schallabsorbierenden Pavatherm-COMBI: Dies ist die gleiche Konstruktion wie zuvor, aber mit einem Kreuz aus schallabsorbierendem Material Pavatherm-COMBI ($h \times b = 40 \times 60 \text{ mm}$).
- Variante 4: Profilierte Holzdecke mit einem Streifen aus schallabsorbierendem Heraklith A2-M ($h \times b = 40 \times 60 \text{ mm}$).
- Variante 5: Profilierte Holzdecke mit einem Streifen mit doppelter Fläche schallabsorbierendem Heraklith A2-M: ($h \times b = 40 \times 120 \text{ mm}$).
- Variante 6: Profilierte Holzdecke mit einem Kreuz aus schallabsorbierenden Heraklith A2-M ($h \times b = 40 \times 60 \text{ mm}$).

Für diese Deckensysteme werden folgende bauphysikalische Parameter angegeben:

- der Wärmedurchgangswiderstand R_T
- der Wärmedurchgangskoeffizient U
- die wirksame Wärmekapazität κ
- die praktischen Schallabsorptionsgrade in den Oktaven nach EN ISO 11564 [2] α_p
- der bewertete Schallabsorptionsgrad nach EN ISO 11564 α_w
- die Formindikatoren nach EN ISO 11564
- die Schallabsorberklasse nach EN ISO 11564

In Tab. 4 werden die Varianten der Holzbetonverbunddecke mit Buche zusammengefasst, für welche die Schallabsorptionsgrade der Deckenunterseite gemessen oder berechnet wurden.

2 Definitionen

2.1 Wirksame Wärmekapazität, κ

Die Wärmekapazität oder Wärmespeicherfähigkeit eines Bauteils bezeichnet seine Fähigkeit, Energie in Form von Wärme aufzunehmen bzw. abzugeben. Die Wärmekapazität ist definiert als die Energie ΔQ , welche benötigt wird, um die Temperatur eines Bauteils um eine Temperaturdifferenz $\Delta \Theta$ zu erwärmen. Die Wärmekapazität κ ist dann als das Verhältnis von ΔQ und $\Delta \Theta$ definiert.

$$\kappa = \frac{\Delta Q}{\Delta \Theta} \quad \text{Formel 1}$$

Allerdings gilt diese Gleichung nur im stationären Zustand, d. h. wenn dem Bauteil genügend Zeit verbleibt, sich an die neuen Temperaturbedingungen anzupassen.

Bei sich zeitlich schnell ändernden Temperaturrandbedingungen steht allerdings für die Wärmespeicherung nicht die gesamte Wärmekapazität eines Körpers, sondern nur die Wärmekapazität der oberflächennahen Körperschichten zur Verfügung. Der Anteil der Wärmekapazität des Körpers, der dann für die Wärmespeicherfähigkeit zur Verfügung steht, wird als wirksame Wärmekapazität oder dynamische Wärmespeicherfähigkeit bezeichnet.

Da in der Realität auch in Räumen, besonders im Sommer, keine stationären, sondern dynamische Temperaturrandbedingungen in Räumen vorliegen, muss zur Berechnung der Wärmespeicherfähigkeit von Gebäuden die dynamische Wärmekapazität zur Berechnung der Speicherfähigkeit eines Raumes verwandt werden. Zu deren Ermittlung wird zunächst die wirksame Wärmespeicherfähigkeit der einzelnen Bauteile berechnet. Die wirksame Wärmekapazität des Raumes ergibt sich dann als Summe der wirksamen Wärmespeicherfähigkeiten der einzelnen raumbegrenzenden Bauteile.

Zur Berechnung der wirksamen Wärmekapazität für sinusförmige Temperaturrandbedingungen zur Verfügung stellt in der Norm EN ISO 13786 *Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen – Dynamisch-thermische Kenngrößen – Berechnungsverfahren*, Ausgabe April 2008 ein analytisches Verfahren. Die Berechnung der dynamischen Wärmekapazität nach EN ISO 13786 ist allerdings auf homogene, ebene Bauteile beschränkt. Für die zeitliche Temperaturschwankung der Luft wird eine Sinusfunktion, welche um einen Mittelwert schwingt, angenommen.

Die dynamischen d. h. zeitabhängigen wärmeschutztechnischen Grössen des Bauteils werden in einer komplexen Matrix, Z_{ij} , zusammengefasst. Diese Matrix bestimmt die Weiterleitung der Temperatur- und Wärmestromdichteschwankung auf die gegenüberliegende Seite des Bauteils. Sie wird schliesslich mit folgendem Ansatz berechnet:

$$\begin{pmatrix} \Theta_e \\ q_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Theta_i \\ q_i \end{pmatrix} \quad \text{Formel 2}$$

Hierbei bezeichnet

- $\Theta_{e \text{ oder } i}$ die Temperatur an der Vorderseite, i, oder an der Rückseite des Bauteils, e.
- $q_{e \text{ oder } i}$ die Wärmestromdichte an der Vorderseite, i, oder an der Rückseite des Bauteils, e.

Aus dieser Gleichung kann mit geeigneten Randbedingungen die dynamische oder wirksame Wärmekapazität berechnet werden. Für Aussenbauteile, an denen raumseitig eine Temperaturschwankung der Raumluft anliegt, ist die wirksame Wärmekapazität κ auf der Raumseite gegeben als

$$\kappa = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_l}{\hat{\Theta}_l} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{11}}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 3}$$

Hier bezeichnet

- $\hat{\Theta}_{e \text{ oder } i}$ die Amplitude der Temperatur an der Vorderseite, i, oder an der Rückseite des Bauteils, e.
- $\hat{q}_{e \text{ oder } i}$ die Amplitude der Wärmestromdichte an der Vorderseite, i, oder an der Rückseite des Bauteils, e.

Für Innenbauteile, die an beiden Oberflächen einer Temperaturschwankung der Raumluft ausgesetzt sind, ergibt sich die wirksame Wärmekapazität der beiden Oberflächen

$$\kappa_1 = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_l}{\hat{\Theta}_l} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 4}$$

$$\kappa_2 = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_e}{\hat{\Theta}_e} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{22} - 1}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 5}$$

2.2 Schallabsorptionsgrad, α

Fällt eine Schallwelle auf eine Oberfläche, so wird ein Teil der Schallenergie reflektiert und ein Teil absorbiert. Der Schallabsorptionsgrad α gibt den prozentualen Anteil der auffallenden Schallenergie an, der an der Oberfläche absorbiert wird.

$$\alpha = \frac{W_{abs}}{W_1} \quad \text{Formel 6}$$

Hierbei ist

- W_{abs} die absorbierte Leistung in W
- W_1 die auftreffende Leistung in W

Daher kann der Schallabsorptionsgrad Werte zwischen 0 (alles wird reflektiert) und 1 (alles wird absorbiert) annehmen. Oberflächen mit einem Schallabsorptionsgrad von 1 werden als schallabsorbierend, Oberflächen mit einem Schallabsorptionsgrad in der Nähe von 0 als schallhart bezeichnet.

Der Schallabsorptionsgrad α ist frequenzabhängig.

2.3 Bewerteter Schallabsorptionsgrad nach EN ISO 11654

Um die Schallabsorption der Deckenunterseite mit nur einer Zahl ausdrücken zu können, wird für jede Variante der bewertete Schallabsorptionsgrad α_w nach EN ISO 11654 *Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden-Bewertung der Schallabsorption*, Ausgabe Juli 1997 gebildet.

Gemäß dieser Norm wird zunächst aus den in den Terzintervallen gemessenen Schallabsorptionsgraden, α_s , der praktische Schallabsorptionsgrad in der zugehörigen Oktave, α_p , berechnet. Die so berechneten Schallabsorptionsgrade werden dann mit einer Bezugskurve, welche ebenfalls in der Norm definiert wird, verglichen. Diese Bezugskurve wird so lange in Schritten von 0,05 in Richtung der Messwerte verschoben, bis die Summe der ungünstigen Abweichungen kleiner oder gleich 0,1 ist. Der bewertete Schallabsorptionsgrad α_w ist als Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz definiert.

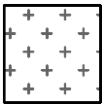

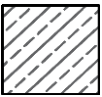


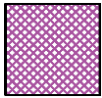
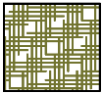

Darüber hinaus werden auch Formindikatoren definiert, welche anzeigen, in welchem Bereich die Überschreitung der Bezugskurve durch die Messwerte auftritt: L wird für Überschreitungen bei tiefen Frequenzen, M für Überschreitungen bei mittleren Frequenzen und H für Überschreitungen bei hohen Frequenzen verwendet.

3 Eigenschaften der Materialien

3.1 Materialien für die wirksame Wärmekapazität

Die Tab 1. zeigt die Eigenschaften der benutzten Materialien für die Berechnungen der wirksamen Wärmekapazität.




Tabelle 1: Eigenschaften der Materialien für die Berechnungen der wirksamen Wärmekapazität.

Material	Rohdichte, ρ kg/m ³	Wärmeleitfähigkeit, λ W/(m·K)	Spezifische Wärmekapazität, c_p J/(kg·K)	volumetrische Wärmekapazität, VHC MJ/(m ³ ·K)
 Unterlagsboden	2200	1.400	1008	2.2
 Trittschalldämmung	80	0.033	1030	0.1
 Überbeton	2400	2.500	1008	2.4
 Buche	720	R=0.12 T=0.092 L=0.257	2021	1.5
 Polyurethanschaum	30	0.025	1500	0.05
 Heraklith A2-M	440	0.081	2100	0.9
 Buchenspäne	500	0.04	1000	0.5
 Pavatherm-COMBI	145	0.041	2100	0.3

3.2 Materialien für die Schallabsorption

Die Tab 2. zeigt die akustischen Eigenschaften der benutzten Materialien bzw. der Oberflächen für die Berechnungen der Schallabsorption.

Tabelle 2: Akustische Eigenschaften der Materialien bzw. Oberflächen für die Berechnungen der Schallabsorption.

Material	Schallabsorption, α																	
	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz
 Buche	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
	0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05		
 Profilierte Buche	0.03	0.03	0.05	0.09	0.10	0.09	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.18	0.21	0.24	0.30	0.35	0.26
	0.05			0.10			0.10			0.15			0.20			0.30		
 Heraklith A2-M	0.05	0.08	0.09	0.11	0.12	0.15	0.19	0.26	0.31	0.40	0.52	0.68	0.78	0.68	0.56	0.46	0.49	0.68
	0.05			0.15			0.25			0.55			0.65			0.55		
 Pavatherm-COMBI	0.14	0.22	0.38	0.51	0.74	0.76	0.81	0.86	0.84	0.87	0.87	0.89	0.92	0.94	0.98	0.99	0.99	0.96
	0.25			0.65			0.85			0.90			0.95			1.00		

4 Ergebnisse

Tabelle 3: Deckensysteme für die wirksame Wärmekapazität

				Wirksame Wärmekapazität, K kJ/(m²K)
Holzbetonverbunddecke			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 170 mm Überbeton - 100 mm Buche 	33
Profilierte Decke			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 170 mm Überbeton - 100 mm Buche mit 20 mm Profilierung 	58
Profilierte Decke mit schallabsorbierenden Kassetten (h = 150 mm)			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 170 mm Überbeton - 100 mm Buche mit 20 mm Profilierung - 150 mm schallabsorbierende Kassetten 	71
Profilierte Decke mit schallabsorbierenden Kassetten (h = 80 mm)			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 170 mm Überbeton - 100 mm Buche mit 20 mm Profilierung - 80 mm schallabsorbierende Kassetten 	60
Profilierte Decke mit Streifen aus Polyurethanschaum 20 x 60 mm			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 170 mm Überbeton - 100 mm Buche mit: <ul style="list-style-type: none"> - 20 mm Profilierung - 20 x 60 mm Polyurethanschaum 	45

Tabelle 3 Fortsetzung 1

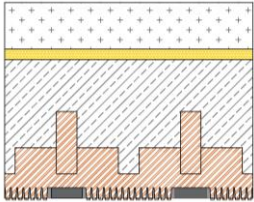
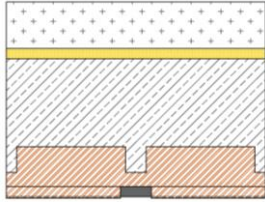
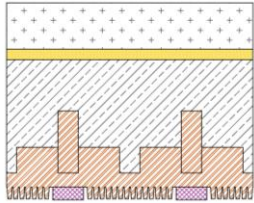
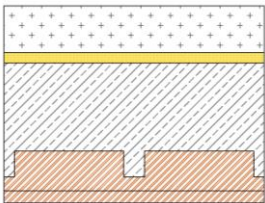
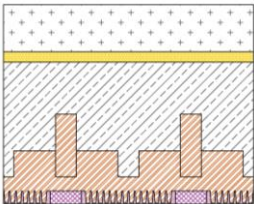
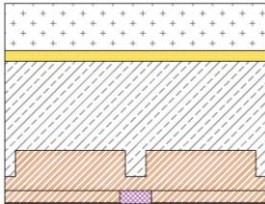
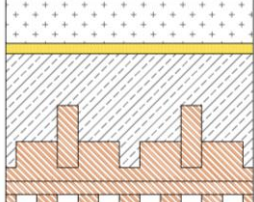
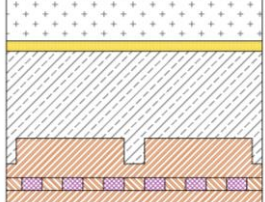
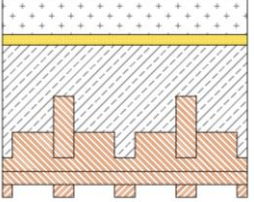
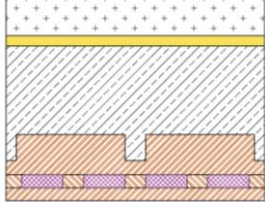
				Wirksame Wärmekapazität, K kJ/(m ² K)
Profilierte Decke mit einem Doppelkreuz aus Polyurethanschaum 20 x 60 mm			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 170 mm Überbeton - 100 mm Buche mit: <ul style="list-style-type: none"> - 20 mm Profilierung - 20 x 60 mm Polyurethanschaum Streife gekreuzt 	42
Profilierte Decke mit Streifen aus Heraklith A2-M 25 x 60 mm			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 170 mm Überbeton - 100 mm Buche mit: <ul style="list-style-type: none"> - 20 mm Profilierung - 25 x 60 mm Heraklith A2-M 	50
Profilierte Decke mit einem Doppelkreuz aus Heraklith A2-M 25 x 60 mm			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 170 mm Überbeton - 100 mm Buche mit: <ul style="list-style-type: none"> - 20 mm Profilierung - 25 x 60 mm Heraklith A2-M Streife gekreuzt 	48
Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit Streifen aus Heraklith A2-M 25 x 40 mm			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 170 mm Überbeton - 100 mm Buche mit Latten und Heraklith A2-M 25 x 40 mm 	41
Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit Streifen aus Heraklith A2- M 25 x 80 mm			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 170 mm Überbeton - 100 mm Buche mit Latten und 25 x 80 mm Heraklith A2-M 	36

Tabelle 3 Fortsetzung 2

				Wirksame Wärmekapazität, K kJ/(m ² K)
Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit Streifen aus Buchenspäne 25 x 40 mm			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 170 mm Überbeton - 100 mm Buche mit Latten und 25 x 40 mm Buchenspäne 	45
Holzdecke mit gekreuzten Latten und mit Streifen aus Buchenspäne 25 x 80 mm			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 170 mm Überbeton - 100 mm Buche mit Latten und 25 x 80 mm Buchenspäne 	36
Holzdecke mit Schallabsorptionsplatte mit Löchern ø= 20 mm			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 170 mm Überbeton - 100 mm Buche - 25 mm Heraklioth A2-M - 20 mm Buchenplatte mit Löchern ø= 20 mm 	38
Holzdecke mit Schallabsorptionsplatte mit Löchern ø= 20, 10 und 5 mm			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 170 mm Überbeton - 100 mm Buche - 25 mm Heraklioth A2-M - 20 mm Buchenplatte mit Löchern ø= 20, 10 und 5 mm 	40

Tabelle 4: Deckensysteme für die Schallabsorption

				Wirksame Wärmekapazität, K kJ/(m ² K)	Schallabsorptionsgrad, α_p						Schallabsorptionsgrad, α_w (-)	Schallabsorberklasse (-)
					125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz		
Buche glatt			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 150 mm Überbeton - 120 mm Buche 	36	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	-
Profilierung mit linearen Nuten			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 150 mm Überbeton - 120 mm Buche mit 20 mm Profilierung 	56	0.05	0.10	0.10	0.15	0.20	0.30	0.15 (H)	E
Profilierte Holzdecke mit Streifen aus Pavatherm-COMBI			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 150 mm Überbeton - 160 mm Buche mit: <ul style="list-style-type: none"> - 20 mm Profilierung - 40 mm Pavatherm-COMBI (b= 60 mm; d= 228 mm) 	45	0.10	0.25	0.30	0.35	0.40	0.50	0.35 (H)	D
Profilierte Holzdecke mit breiten Streifen aus Pavatherm-COMBI			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 150 mm Überbeton - 160 mm Buche mit: <ul style="list-style-type: none"> - 20 mm Profilierung - 40 mm Pavatherm-COMBI (b= 120 mm; d= 288 mm) 	38	0.10	0.35	0.40	0.45	0.50	0.60	0.45 (H)	D

Tabelle 3 Fortsetzung 1

				Wirksame Wärmekapazität, k kJ/(m ² K)	Schallabsorptionsgrad, α_p						Schallabsorptionsgrad, α_w (-)	Schallabsorberklasse (-)
					125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz		
Profilierte Holzdecke mit einem Kreuz aus Pavatherm-COMBI			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 150 mm Überbeton - 160 mm Buche mit: <ul style="list-style-type: none"> - 20 mm Profilierung - 40 mm Pavatherm-COMBI (b= 60 mm; d= 228 mm) gekreuzten Streifen 	37	0.15	0.35	0.45	0.50	0.55	0.60	0.50	D
Profilierte Holzdecke mit Streifen aus Heraklith A2-M			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 150 mm Überbeton - 160 mm Buche mit: <ul style="list-style-type: none"> - 20 mm Profilierung - 35 mm Heraklith A2-M (b= 60 mm; d= 228 mm) 	49	0.05	0.10	0.15	0.25	0.35	0.35	0.25	E
Profilierte Holzdecke mit breitem Streifen aus Heraklith A2-M			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 150 mm Überbeton - 160 mm Buche mit: <ul style="list-style-type: none"> - 20 mm Profilierung - 35 mm Heraklith A2-M (b= 120 mm; d= 288 mm) 	44	0.05	0.10	0.15	0.30	0.40	0.40	0.25 (H)	E
Profilierte Holzdecke mit einem Kreuz aus Heraklith A2-M			<ul style="list-style-type: none"> - 90 mm Unterlagsboden - 20 mm Trittschalldämmung - 150 mm Überbeton - 160 mm Buche mit: <ul style="list-style-type: none"> - 20 mm Profilierung - 35 mm Heraklith A2-M (b= 60 mm; d= 228 mm) gekreuzten Streifen 	45	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.40	0.30	D

5 Literaturverzeichnis

[2] EN ISO 13786 *Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen – Dynamisch-thermische Kenngrössen – Berechnungsverfahren*, Ausgabe April 2008

[3] EN ISO 11654 *Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden-Bewertung der Schallabsorption*, Ausgabe Juli 1997

6 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt. Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Institutsleiters für Holzbau, Tragwerke und Architektur und des Projektverantwortlichen gültig.

EXPERTISE REPORT:

Measurement of acoustic absorption
coefficient after ISO 354

Assessment of 2 wooden samples
provided by Berner Fachhochschule

Dr. Lissek Hervé, Thach Pham Vu
04/04/2019

Introduction

The Berner Fachhochschule (BFH) has mandated the Acoustic Group at EPFL to perform an acoustic expertise of 2 samples of wooden panels, as described in Figure 1. Each sample presents a total surface

$$S = 3.598 \text{ m} \times 2.945 \text{ m} = 10.60 \text{ m}^2$$

on the floor, and present 2 different profiles to the acoustic field (with or without wood-fiber filling).

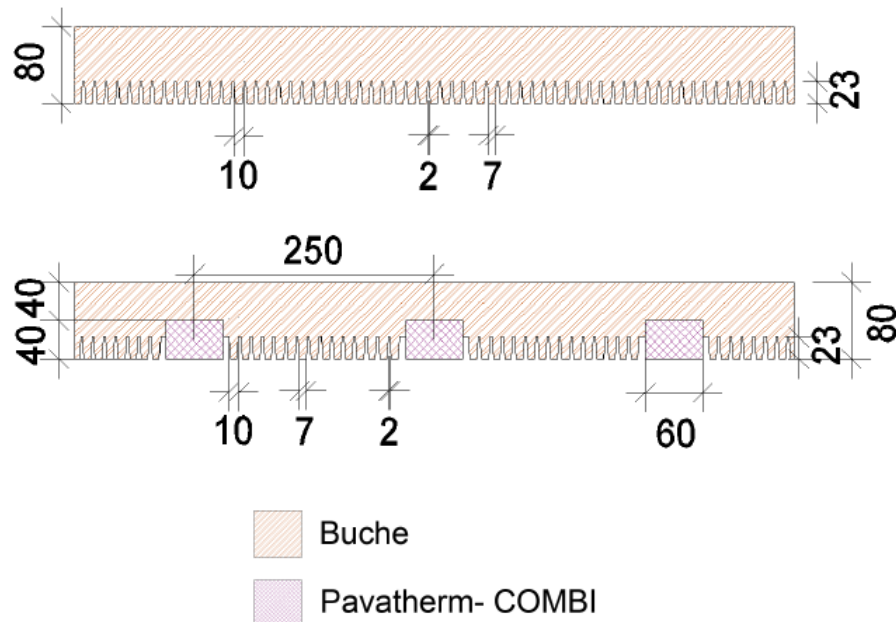


Figure 1: sketch (cut view) of the wooden samples tested in the EPFL reverberant chamber

The expertise consists in the assessment of the acoustic absorption coefficient in a reverberant chamber, according to ISO 354 standard [1]. The EPFL reverberant chamber has a volume

$$V_0 = 215.6 \text{ m}^3$$

and a total wall surface

$$S_0 = 226.9 \text{ m}^2,$$

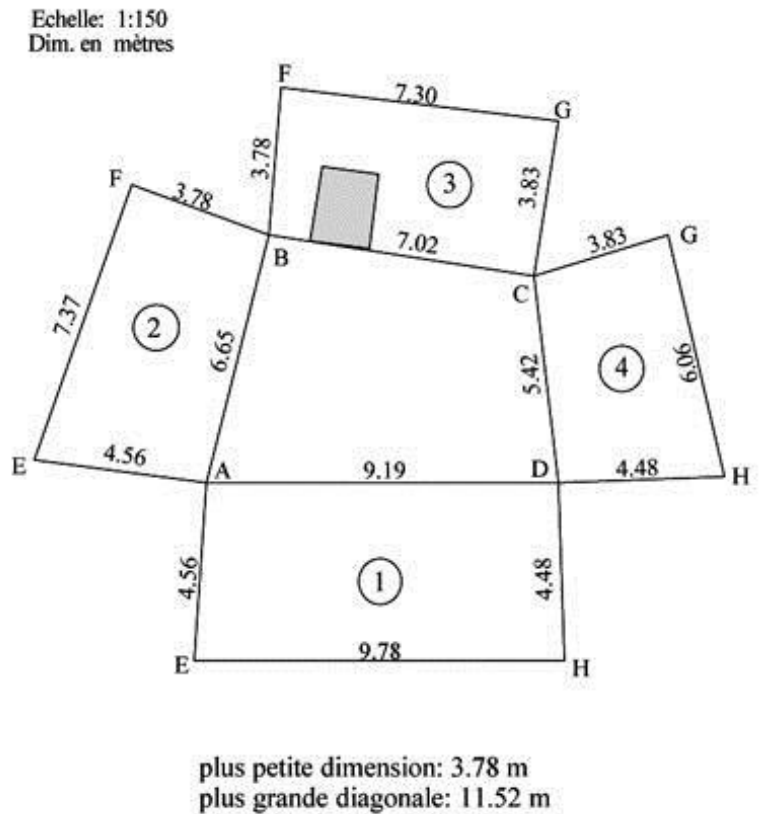
and is described on Figure 2.

Measurement method

The chosen method is based on the measurement of the reverberation time in the reverberant chamber excited with an interrupted broadband noise. The hardware comprises:

- 10 Beyerdynamic M10 1N(C) microphones already installed in the reverberant chamber
- 1 B&K Type 4224 powered sound source with external generator selection
- 01dB Symphonie acquisition+generation card and a laptop
- 01dB dBbati32 software suite

The measurements are performed at 6 microphones positions and with 2 sound sources positions, resulting in 12 microphone/source combinations. For each combination, the measurements are repeated 3 times in order to process the averaged reverberation times, resulting in 36 measurements per sample.



Volume: 215.6 m³
Surface totale: 226.9 m²

Sol: 48.0 m²
Plafond: 56.2 m²
Paroi1: 42.8 m²
Paroi2: 29.0 m²
Paroi3: 27.2 m²
Paroi4: 23.7 m²

Figure 2: EPFL reverberation chamber (left: picture; right: sketch)

The 36 averaged reverberation times are first measured with each of the samples successively, and then in the empty reverberant chamber. The averaged reverberation times are then computed for each case:

- T_0 for the empty room
- T_1 for sample 1 (without wood-fiber inserts)
- T_2 for sample 12 (with wood-fiber inserts)

These averaged reverberation times are then used to process the equivalent absorption area in the 3 tested cases (subscript i), as:

$$A_i = \frac{55.3 V_0}{c_i T_i} - 4 V_0 m_1,$$

where c_i is the sound celerity (depending on temperature), V is the reverberation chamber volume, and m_i is a power attenuation coefficient specified in ISO 9613-1 [2], as a function of temperature and humidity.

Then the Sabine absorption coefficient of sample i α_{Si} is processed after:

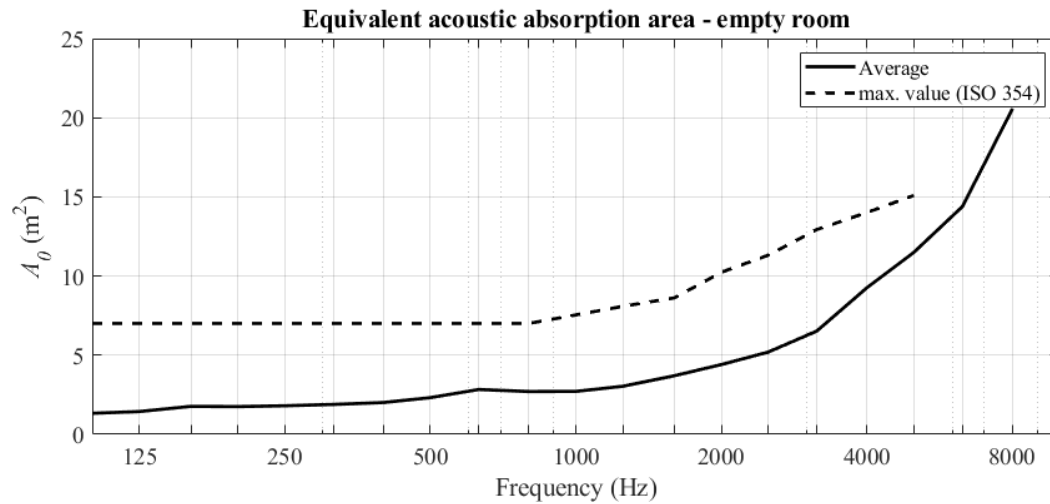
$$\alpha_{Si} = \frac{55.3 V_0}{S} \left(\frac{1}{c_i T_i} - \frac{1}{c_0 T_0} \right) - 4 V (m_2 - m_1) \approx \frac{55.3 V_0}{S c} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_0} \right)$$

if we assume the temperature and humidity does not vary during the whole measurements (which has been verified).

Specifications of the measurement

Standard ISO 354 specifies some operating conditions to perform the measurements that are summarized hereafter:

Specification of ISO 354	Compliance of the test conditions
6.1.1 Volume of reverberant room $> 200 \text{ m}^3$	OK
6.1.2 Longest diagonal of the room $< 1.9 V^{1/3}$	OK
6.1.4 Equivalent acoustic absorption area A_0 of the empty room should be less than the values in Table 1 (multiplied by $V/200$)	OK (up to 5 kHz) (see Table 1)
6.2.1 Sample size should be comprised between 10 and 12 m^2	OK
6.2.1 Sample dimensions: width/length between 0.7 and 1	OK (value=0.82)
6.3.2 Temperature higher than 15°C and humidity comprised between 30 and 90%.	OK (temperature between 20.1°C and 20.2°C , humidity between 40.7% and 43.7%)
6.3.2 Test specimen to reach equilibrium with respect to temperature and humidity in the room before test carried out.	OK
7.1.2 Microphones positions at least - 1.5m from each others, - 2 meters from the sound source, - 1m from any room surfaces (including the test specimen)	OK
7.1.3 Omnidirectional source, at 2 positions separated by at least 3 m	OK
7.1.4 At least 12 combinations of microphones and loudspeaker positions (min. 3 different microphones positions and min. 2 different loudspeaker positions)	OK



Frequency (HZ)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Max. equivalent sound absorption area (m2)	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01
Measured A_0 (m²)	1.33	1.44	1.77	1.75	1.81	1.89	2.01	2.32	2.83

Frequency (HZ)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Max. equivalent sound absorption area (m2)	7.01	7.55	8.09	8.62	10.24	11.32	12.94	14.01	15.09
Measured A_0 (m²)	2.71	2.72	3.04	3.71	4.41	5.20	6.53	9.27	11.50

Table 1: Maximum equivalent sound absorption areas adapted for room volume $V=215.6 \text{ m}^3$ and measured absorption area in the empty reverberant chamber

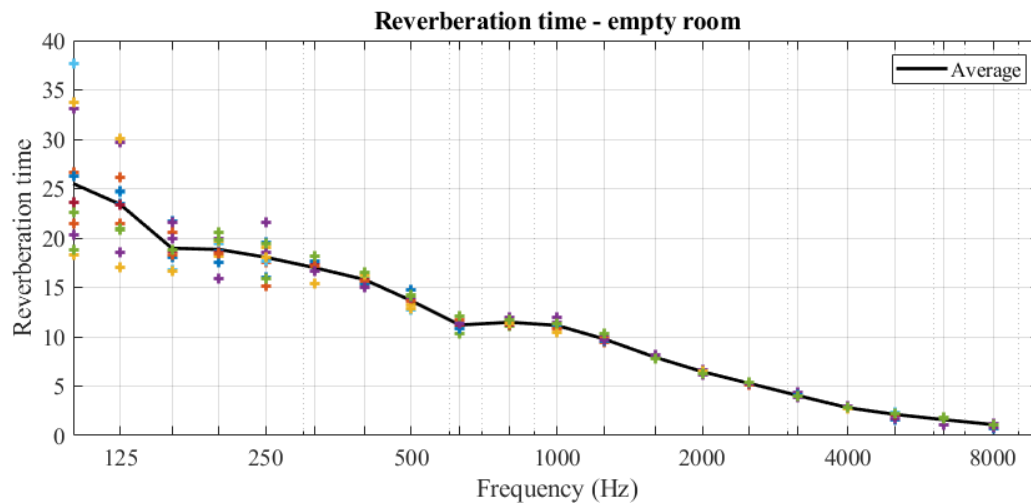
Since all the conditions are met for performing the measurements (at least under 5 kHz), we will then display in the following:

- The individual reverberation times measurements, at each microphone/source position and their average, for the 3 tested conditions
 - o empty room
 - o with Sample 1
 - o with sample 2
- The processed Sabine sound absorption coefficient after ISO 354

Measurement results

Reverberation times

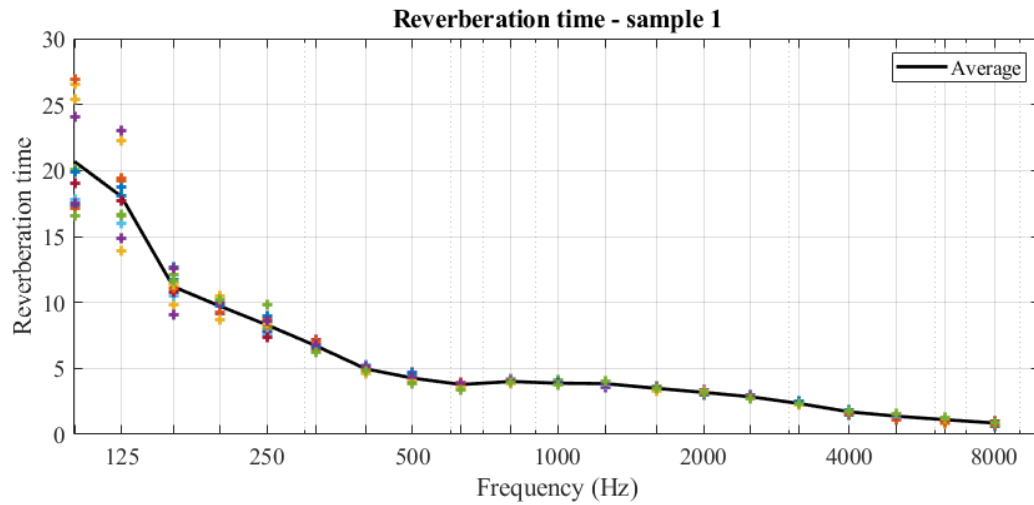
Empty room



Freq (Hz)	Mic1		Mic2		Mic4		Mic5		Mic6		Mic8		Average
	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	
100	23.58	26.70	18.30	33.16	22.63	37.61	23.55	26.30	21.41	33.79	20.30	18.77	25.51
125	23.51	26.09	17.06	29.71	20.83	24.57	23.38	24.80	21.48	30.01	18.55	20.92	23.41
160	21.69	20.56	17.99	21.57	18.65	16.75	18.62	18.05	18.25	16.71	19.94	18.75	18.96
200	18.66	19.48	18.21	19.89	20.53	19.45	18.51	17.56	18.43	19.65	15.90	19.84	18.84
250	19.59	17.52	19.06	18.59	19.44	17.66	18.09	16.07	15.17	18.03	21.53	15.85	18.05
315	17.70	15.36	17.22	17.25	16.68	17.53	17.30	17.65	17.11	15.43	16.70	18.12	17.00
400	15.92	15.09	15.45	16.36	15.83	16.21	15.76	15.40	15.65	16.31	15.04	16.51	15.79
500	14.73	13.21	13.22	13.67	14.21	12.77	13.78	13.61	13.64	12.86	14.04	14.09	13.65
630	11.18	11.13	11.09	10.89	10.28	11.41	11.18	10.86	11.69	11.29	11.30	12.04	11.19
800	11.48	11.64	11.38	11.58	11.09	11.23	11.16	11.50	11.54	11.29	12.02	11.66	11.46
1000	11.09	11.08	11.10	11.97	10.84	11.24	11.51	10.92	10.82	10.41	11.48	11.35	11.15
1250	9.83	9.48	9.93	10.24	9.53	9.59	9.73	9.52	9.81	9.72	9.67	10.37	9.79
1600	7.85	8.02	7.88	8.22	7.87	7.86	7.72	7.82	8.08	7.73	8.08	7.74	7.91
2000	6.41	6.56	6.53	6.69	6.56	6.33	6.58	6.47	6.51	6.46	6.15	6.30	6.46
2500	5.35	5.23	5.27	5.38	5.19	5.30	5.30	5.32	5.12	5.24	5.22	5.39	5.28
3150	4.19	4.02	4.01	4.36	3.85	4.09	4.13	4.08	3.94	4.02	3.86	4.01	4.05
4000	2.81	2.75	2.84	2.96	2.76	2.85	2.72	2.82	2.75	2.75	2.80	2.89	2.81
5000	1.60	2.24	2.28	1.66	2.29	2.31	2.15	2.21	2.21	2.23	2.26	2.23	2.14
6300	1.12	1.71	1.68	1.12	1.78	1.70	1.68	1.69	1.71	1.68	1.71	1.67	1.61
8000	0.73	1.16	1.21	0.78	1.11	1.18	1.21	1.17	1.20	1.12	1.21	1.11	1.10

Table 2: reverberation times measured in the empty room at the 12 microphones/sources positions, and their average

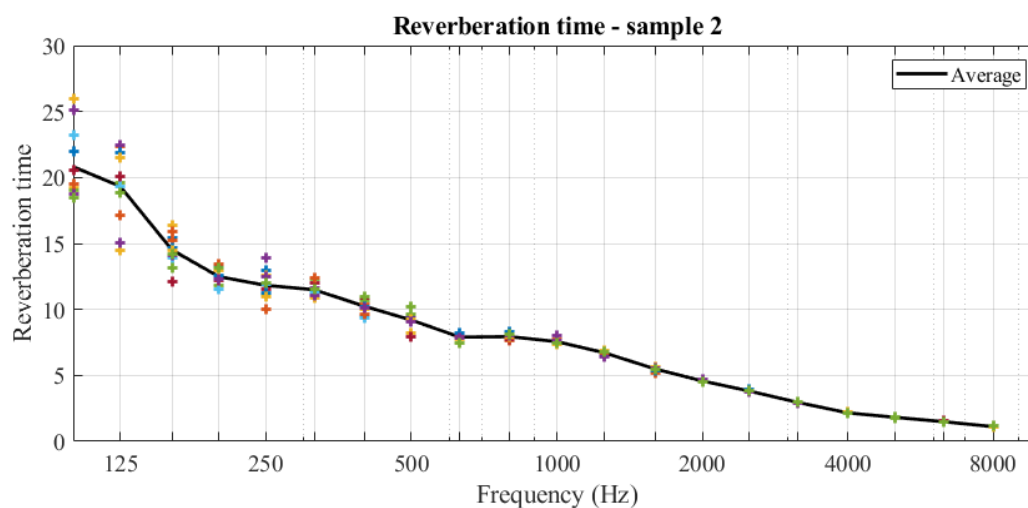
Sample 1



Freq (Hz)	Mic1		Mic2		Mic4		Mic5		Mic6		Mic8		Average
	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	
100	17.32	17.12	26.50	24.11	20.09	17.80	19.02	19.88	26.89	25.43	17.48	16.57	20.68
125	18.08	19.25	13.94	22.99	16.65	15.95	17.70	18.79	19.43	22.23	14.82	16.54	18.03
160	11.69	11.10	9.86	9.10	12.11	10.52	10.79	12.68	11.05	11.30	12.58	11.60	11.20
200	10.07	9.26	10.45	9.12	10.10	9.94	9.92	9.71	9.23	8.67	9.91	10.21	9.72
250	7.88	8.76	8.29	7.73	8.01	7.54	7.36	8.93	8.26	8.38	8.60	9.80	8.30
315	6.92	6.41	6.90	6.83	6.70	6.74	7.19	6.63	7.09	6.26	6.81	6.24	6.73
400	4.74	4.57	4.61	5.28	5.02	5.30	4.79	5.00	5.12	5.18	5.22	4.81	4.97
500	4.29	4.06	4.46	4.69	4.30	4.15	4.00	4.56	4.34	4.12	4.36	3.81	4.26
630	3.97	3.72	3.81	3.89	3.59	3.95	3.91	3.80	3.95	3.52	3.86	3.41	3.78
800	3.82	3.96	4.10	4.13	3.88	4.18	3.99	4.03	4.13	3.83	4.04	3.99	4.01
1000	3.92	3.83	3.95	3.78	4.17	3.91	3.78	3.97	3.80	3.82	3.81	3.77	3.88
1250	3.81	3.81	4.07	3.57	3.89	3.74	3.83	3.89	3.84	3.84	3.81	4.05	3.85
1600	3.54	3.38	3.56	3.41	3.62	3.44	3.46	3.52	3.59	3.30	3.53	3.49	3.49
2000	3.21	3.20	3.19	3.34	3.22	3.23	3.14	2.98	3.10	3.27	3.15	3.16	3.18
2500	2.84	2.79	2.81	2.80	2.81	2.88	2.91	3.02	2.92	2.83	2.84	2.71	2.85
3150	2.48	2.36	2.28	2.37	2.35	2.37	2.36	2.27	2.32	2.25	2.32	2.35	2.34
4000	1.83	1.78	1.69	1.76	1.76	1.60	1.80	1.47	1.53	1.76	1.75	1.75	1.71
5000	1.53	1.53	1.18	1.51	1.53	1.15	1.48	1.07	1.07	1.52	1.47	1.53	1.38
6300	1.23	1.27	0.85	1.20	1.20	0.89	1.25	0.86	0.89	1.22	1.24	1.26	1.11
8000	0.97	0.95	0.66	0.95	0.95	0.73	0.99	0.64	0.70	0.93	0.94	0.92	0.86

Table 3: reverberation times measured with Sample 1 at the 12 microphones/sources positions, and their average

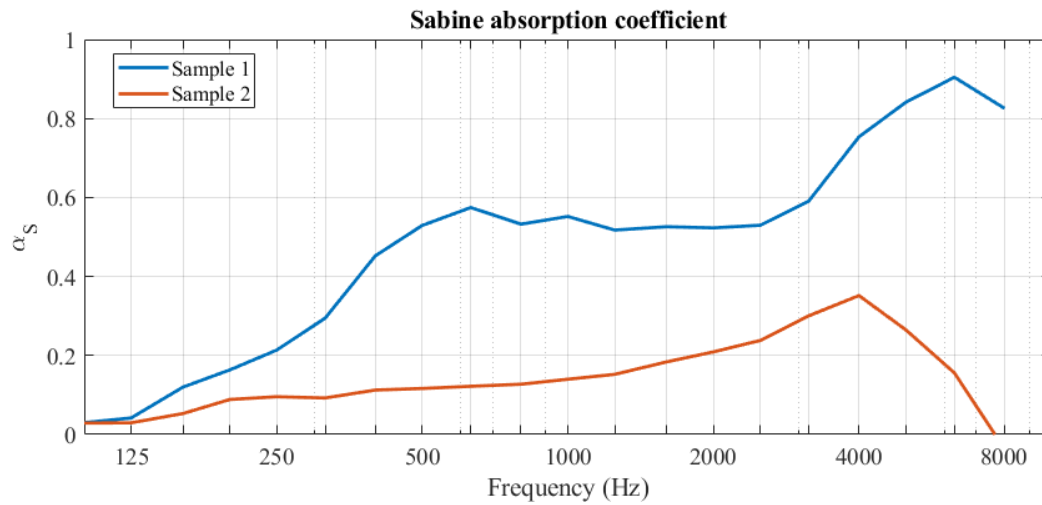
Sample 2



Freq (Hz)	Mic1		Mic2		Mic4		Mic5		Mic6		Mic8		Average
	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	
100	23.58	26.70	18.30	33.16	22.63	37.61	23.55	26.30	21.41	33.79	20.30	18.77	25.51
125	23.51	26.09	17.06	29.71	20.83	24.57	23.38	24.80	21.48	30.01	18.55	20.92	23.41
160	21.69	20.56	17.99	21.57	18.65	16.75	18.62	18.05	18.25	16.71	19.94	18.75	18.96
200	18.66	19.48	18.21	19.89	20.53	19.45	18.51	17.56	18.43	19.65	15.90	19.84	18.84
250	19.59	17.52	19.06	18.59	19.44	17.66	18.09	16.07	15.17	18.03	21.53	15.85	18.05
315	17.70	15.36	17.22	17.25	16.68	17.53	17.30	17.65	17.11	15.43	16.70	18.12	17.00
400	15.92	15.09	15.45	16.36	15.83	16.21	15.76	15.40	15.65	16.31	15.04	16.51	15.79
500	14.73	13.21	13.22	13.67	14.21	12.77	13.78	13.61	13.64	12.86	14.04	14.09	13.65
630	11.18	11.13	11.09	10.89	10.28	11.41	11.18	10.86	11.69	11.29	11.30	12.04	11.19
800	11.48	11.64	11.38	11.58	11.09	11.23	11.16	11.50	11.54	11.29	12.02	11.66	11.46
1000	11.09	11.08	11.10	11.97	10.84	11.24	11.51	10.92	10.82	10.41	11.48	11.35	11.15
1250	9.83	9.48	9.93	10.24	9.53	9.59	9.73	9.52	9.81	9.72	9.67	10.37	9.79
1600	7.85	8.02	7.88	8.22	7.87	7.86	7.72	7.82	8.08	7.73	8.08	7.74	7.91
2000	6.41	6.56	6.53	6.69	6.56	6.33	6.58	6.47	6.51	6.46	6.15	6.30	6.46
2500	5.35	5.23	5.27	5.38	5.19	5.30	5.30	5.32	5.12	5.24	5.22	5.39	5.28
3150	4.19	4.02	4.01	4.36	3.85	4.09	4.13	4.08	3.94	4.02	3.86	4.01	4.05
4000	2.81	2.75	2.84	2.96	2.76	2.85	2.72	2.82	2.75	2.75	2.80	2.89	2.81
5000	1.60	2.24	2.28	1.66	2.29	2.31	2.15	2.21	2.21	2.23	2.26	2.23	2.14
6300	1.12	1.71	1.68	1.12	1.78	1.70	1.68	1.69	1.71	1.68	1.71	1.67	1.61
8000	0.73	1.16	1.21	0.78	1.11	1.18	1.21	1.17	1.20	1.12	1.21	1.11	1.10

Table 4: reverberation times measured with Sample 2 at the 12 microphones/sources positions, and their average

Sabine absorption coefficients



Frequency (Hz)	Sample 1	Sample 2
100	0.03	0.03
125	0.04	0.03
160	0.12	0.05
200	0.16	0.09
250	0.21	0.10
315	0.29	0.09
400	0.45	0.11
500	0.53	0.12
630	0.57	0.12
800	0.53	0.13
1000	0.55	0.14
1250	0.52	0.15
1600	0.53	0.18
2000	0.52	0.21
2500	0.53	0.24
3150	0.59	0.30
4000	0.75	0.35
5000	0.84	0.26
6300	0.90	0.16
8000	0.83	-0.04 ¹

Table 5: Sabine absorption coefficients measured with the 2 wooden panel prototypes by BFH

¹ This negative value might be explained by the probable inadequacy of the measurement conditions above 5 kHz, according to ISO 354, §6.1.4

Bibliography

- [1] International Standard Organization, *ISO 354:2003*, Geneva, 2003.
- [2] International Standard Organization, *ISO 9613-1:1993*, Geneva, 1993.





Entwicklung und Optimierung einer HBV-Decke mit Buche für Büro- und Wohngebäude

Labormessungen der direkten Schallübertragung

Messbericht

Messung der Luftschalldämmung nach EN ISO 10140-2
Messung der Trittschalldämmung nach EN ISO 10140-3

Messbericht Nr.	R.008730-10-72FE-01- SS01
Auftrag Nr.	R.008730-10-72FE-01
Klassifizierung	Vertraulich
Datum	28.06.2019
Auftraggeber	Wald- und Holzforschungsfonds Bundesamt für Umwelt BAFU 3003 Bern
Adresse der Forschungsstelle	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur Kompetenzbereich Bauphysik und Energie Solithurnstrasse 102, CH-2504 Biel Tel / Fax +41 (0)32 344 0 341 / 391
Sachbearbeiter	Amabel Melián Hernández 
Projektverantwortlicher	Dr. Christoph Geyer 

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	3
2 Beschreibung des Prüfstands	3
3 Messverfahren	4
3.1 Messung der Nachhallzeit	4
3.2 Luftschalldämmung	5
3.2.1 Messverfahren nach EN ISO 10140-2	6
3.3 Trittschalldämmung	6
3.3.1 Messverfahren nach EN ISO 10140-3	6
3.4 Bestimmung der Einzahlangaben	7
3.4.1 Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Masses	7
3.4.2 Bestimmung des bewerteten Norm-Trittschallpegels	7
3.5 Fremdgeräuschkorrektur	8
3.6 Messgeräte	8
3.7 Aufbau der trennenden Geschossdecken	9
3.8 Schalldämmung der Holzbetonverbunddecke	9
3.8.1 Luftschallschutz der Geschossdecke	10
3.8.2 Trittschallschutz der Geschossdecke	10
3.9 Zusammenfassung der Messergebnisse der Direktschallübertragung	10
4 Literaturverzeichnis	11
5 Verzeichnisse	11
5.1 Tabellenverzeichnis	11
5.2 Abbildungsverzeichnis	11
6 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	12
<hr/>	
Anlage 1: Beschreibung der HBV-Decke	13
Anlage 2: Messergebnisse der Luftschalldämmung	16
Anlage 3: Messergebnisse der Trittschalldämmung	21

1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projekts *Entwicklung und Optimierung einer HBV mit Buche für Büro- und Wohngebäude* wird die direkte Schalldämmung einer Holzbetonverbunddecke aus Buche bestimmt.

2 Beschreibung des Prüfstands

Der Prüfstand befindet sich in der Leichtbauhalle auf dem Gelände der Eidgenössischen Material- und Prüfanstalt, EMPA, in Dübendorf. Er ist in Holzbauweise ausgeführt. Es erstreckt sich über zwei Stockwerke, dem oben liegenden Sende- (FRP-A) und dem darunter liegenden Empfangsraum (FRP-B), getrennt von einem Deckenelement. Der Empfangsraum besteht aus einer inneren und einer äusseren Schale, ausgeführt in massiven CLT Holztafeln, der Zwischenraum ist mit einer Dämmung ausgefüllt. Die inneren Raumabmessungen (L x B x H) sind 5.78 m x 4.62 m x 3.32 m, das daraus resultierende Volumen beträgt 88.7 m³. Der Senderraum ist einschalig ausgeführt und besteht ebenso aus einer massiven CLT Konstruktion. Das Raumvolumen von 91.9 m³ ergibt sich aus den inneren Abmessungen (L x B x H) des Raumes von 5.78 m x 4.62 m x 3.44 m.

Error! Reference source not found.Abbildung 1 stellt den Aufbau für die Messung der vertikalen Schallübertragung mit zwei Räumen übereinander dar.



Abbildung 1. Aufbau des Prüfstands in Dübendorf.

3 Messverfahren

3.1 Messung der Nachhallzeit

Die Bestimmung der Nachhallzeit erfolgt nach EN ISO 3382-2 [1] mit dem Verfahren der integrierten Impulsantwort.

Der Empfangsraum wird mit einem Dodekaeder-Lautsprecher angeregt. Für eine Lautsprecherposition werden die Abklingkurven an 6 Mikrofonpositionen bestimmt.

Danach wird eine weitere Lautsprecherposition gewählt und es werden wiederum die Abklingkurven an 6 Mikrofonpositionen aufgezeichnet.

Die äquivalente Schallabsorptionsfläche A im Empfangsraum wird nach folgender Gleichung aus der gemessenen Nachhallzeit bestimmt:

$$A = 0.16 \cdot \frac{V}{T}$$

Hier bezeichnet

- V das Volumen des Empfangsraums in m^3
- T die Nachhallzeit im Empfangsraum in s

Die nachfolgenden Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen die Messergebnisse der Nachhallzeitmessungen für die Räume A und B für alle Messungen. Raum A bezeichnet den oberen Raum, Raum B den unteren Raum.

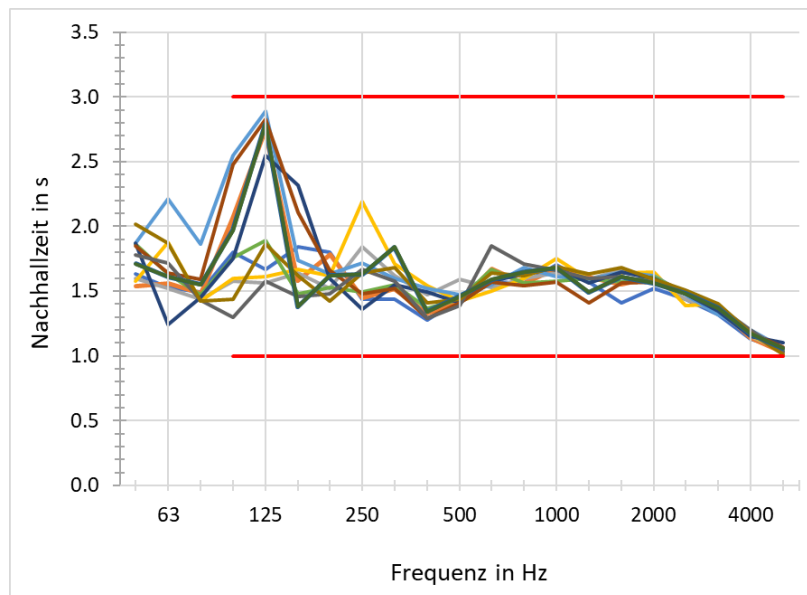


Abbildung 2. Gemessene Nachhallzeiten im Raum A. Die Anforderungen an die Nachhallzeit nach EN ISO 10140-5 sind ebenfalls als rote Linien eingetragen.

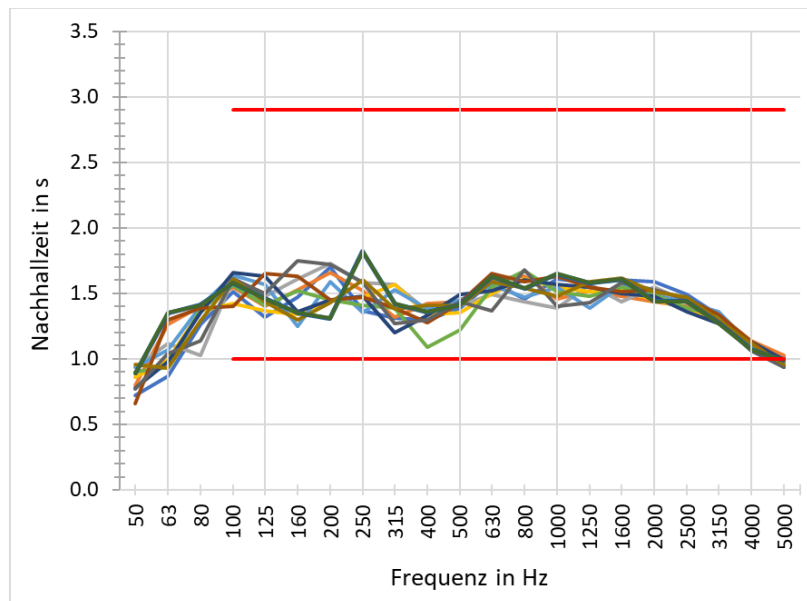


Abbildung 3. Gemessene Nachhallzeiten im Raum B. Die Anforderungen an die Nachhallzeit nach EN ISO 10140-5 sind ebenfalls als rote Linien eingetragen.

Im Diagramm sind ebenfalls die Anforderungen an die Nachhallzeit gemäss EN ISO 10140-5 [2] eingezeichnet. Für Frequenzen ≥ 100 Hz soll die Nachhallzeit folgende Anforderungen erfüllen:

$$1s < T < 2 \cdot \left(\frac{V}{50 \text{ m}^3} \right)^{\frac{2}{3}}$$

3.2 Luftschalldämmung

Zur Beschreibung der Luftschalldämmung zwischen den beiden Räumen wird das Schalldämm-Mass R verwendet. Dabei wird das zu untersuchende Bauteil mit einem Dodekaeder beschallt und die Schallpegeldifferenz zwischen Sende- und Empfangsraum gemessen.

Die Eignung des Lautsprechersystems, die Anzahl und die Positionen der Lautsprecher und das Betriebsverfahren entsprechen den Anforderungen der EN ISO 10140-5.

Die Messgeräte werden vor und nach jeder Messung mit einem geeichten Schallkalibrator überprüft.

Die Schallanregung erfolgt bei den Luftschallmessungen mit einem Dodekaeder-Lautsprecher, der mit einem breitbandigen Rauschsignal (rosa Rauschen) gespeist wird.

Die Messung des Sende- und Empfangsraumpegels erfolgt mit einem rotierenden Mikrophon im Sende- und im Empfangsraum für zwei verschiedene Lautsprecherpositionen im Senderaum. Der Standort der Schallquelle im Senderaum wird einmal nach der Hälfte der Messungen verändert.

Für jede Messung beträgt die Messdauer 60 s.

3.2.1 Messverfahren nach EN ISO 10140-2

Die Messung der Luftschalldämmung der Bauteile erfolgt nach EN ISO 10140-2 [3].

Das Schalldämm-Mass, zwischen den Räumen, R wird gemäss Gleichung (2) aus EN ISO 10140-2 ermittelt:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \cdot \lg\left(\frac{S}{A}\right) \text{ dB}$$

Dabei steht

- L_1 für den mittleren Schalldruckpegel im Senderaum in dB
- L_2 für den mittleren Schalldruckpegel im Empfangsraum in dB
- S für die Fläche des Prüfobjekts in m^2
- A für die äquivalente Schallabsorptionsfläche im Empfangsraum in m^2

Die Normschallpegeldifferenz, D_n , wird aus dem Schalldämm-Mass, R , mit folgende Formel errechnet:

$$D_n = R - 10 \cdot \lg\left(\frac{S}{A_0}\right) \text{ dB}$$

Dabei steht

- R Schalldämm-Mass in dB
- S für die Fläche des Prüfobjekts in m^2
- A_0 für die Bezugs-Schallabsorptionsfläche ($A_0=10 \text{ m}^2$)

3.3 Trittschalldämmung

Zur Beschreibung des Trittschallschutzes zwischen den Räumen wird der sogenannte Norm-Trittschallpegel L_n verwendet.

Dabei wird das zu untersuchende Bauteil mit einem Normhammerwerk beklopft und der Schallpegel des Geräuschs im Empfangsraum mit Mikrofonen gemessen.

3.3.1 Messverfahren nach EN ISO 10140-3

Die Messung der Trittschalldämmung zwischen den Räumen erfolgt nach EN ISO 10140-3 [4].

Die Messungen werden nach Abschnitt 5 von EN ISO 10140-3 durchgeführt.

Der Norm-Trittschallpegel wird nach Gleichung (1) von EN ISO 10140-3 ermittelt:

$$L_n = L_i + 10 \cdot \lg\left(\frac{A}{A_0}\right) \text{ dB}$$

Dabei steht:

- L_i für den mittleren Trittschallpegel je Terz im Senderaum in dB
- A für die äquivalente Schallabsorptionsfläche im Empfangsraum in m^2
- A_0 für die Bezugs-Schallabsorptionsfläche ($A_0=10 \text{ m}^2$)

Die Anzahl und die Auswahl der Hammerwerkspositionen erfolgt gemäss den Anforderungen von Abschnitt 5.2 von EN ISO 10140-3. Es werden 6 Hammerwerkspositionen verwandt.

Das Hammerwerk entspricht den Anforderungen von Anhang E, EN ISO 10140-5 [5].

3.4 Bestimmung der Einzahlangaben

Aus den in den Terzbändern gemessenen Schalldämm-Massen bzw. den Norm-Trittschallpegeln werden Einzahlangaben gebildet.

3.4.1 Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Masses

Die Einzahlangabe des bewerteten Schalldämm-Masses berechnen wir für jede Messung nach EN ISO 717 - 1 [5], durch Vergleich der Messwerte mit einer Bezugskurve.

Die Bezugskurve wird solange um 0.1 dB verschoben, bis die mittlere ungünstige Abweichung gerade noch kleiner oder gleich 32.0 dB ist.

Als bewertetes Schalldämm-Mass wird dann der Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz abgelesen. Das bewertete Schalldämm-Mass wird mit einem Index w, also R_w gekennzeichnet.

Darüber hinaus werden die Spektrumanpassungswerte C , C_{tr} , $C_{50-3150}$, $C_{tr, 50-3150}$, $C_{50-5000}$, $C_{tr, 50-5000}$, $C_{100-5000}$ und $C_{tr, 100-5000}$ nach EN ISO 717-1 ermittelt.

Die Einzahlangabe der Normschallpegeldifferenzen D_n und die zugehörigen Spektrumanpassungswerte berechnen wir in einem analogen Verfahren. Demnach wird die Bezugskurve solange um 0.1 dB verschoben, bis die mittlere ungünstige Abweichung gerade noch kleiner oder gleich 32.0 dB ist.

3.4.2 Bestimmung des bewerteten Norm-Trittschallpegels

Die Einzahlangabe des bewerteten Norm-Trittschallpegels berechnen wir für jede Messung nach EN ISO 717 - 2 [6], durch Vergleich der Messwerte mit einer Bezugskurve.

Die Bezugskurve wird solange um 0.1 dB verschoben, bis die mittlere ungünstige Abweichung gerade noch kleiner oder gleich 32.0 dB ist.

Als bewerteter Norm-Trittschallpegel wird dann der Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz abgelesen. Der bewertete Norm-Trittschallpegel wird mit einem Index w, also $L_{n,w}$ gekennzeichnet.

Darüber hinaus werden die Spektrumanpassungswerte C_i und $C_{i, 50-2500}$ nach EN ISO 717-2 ermittelt.

3.5 Fremdgeräuschkorrektur

Bei jeder Messung wird der Fremdgeräuschpegel im Empfangsraum bestimmt. Mit diesem Fremdgeräuschpegel wird der gemessene Empfangsraumpegel nach Gleichung (4) von EN ISO 10140-4 [7] korrigiert:

$$L = \begin{cases} L_{sb} \text{ für } L_{sb} - L_b \geq 15 \text{ dB} \\ 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{L_{sb}}{10 \text{ dB}}} - 10^{\frac{L_b}{10 \text{ dB}}} \right) \text{ dB für } 6 \text{ dB} < L_{sb} - L_b < 15 \text{ dB} \\ L_{sb} - 1.3 \text{ dB für } L_{sb} - L_b \leq 6 \text{ dB} \end{cases}$$

Hier bezeichnet

- L den korrigierten Schallpegel des Messsignals in Dezibel
- L_{sb} den Schallpegel des Messsignals einschliesslich Fremdgeräuschpegel in Dezibel
- L_b den Fremdgeräuschpegel in Dezibel

Die Korrektur kann nur vorgenommen werden, wenn die Differenz zwischen dem Schallpegel des Messsignals einschliesslich Fremdgeräuschpegel L_{sb} und dem Fremdgeräuschpegel L_b grösser als 6 dB ist. Bei kleinerem Abstand zwischen Empfangsraumpegel und Fremdgeräusch wird der Empfangsraumpegel mit 1.3 dB korrigiert. Das jeweilige Schalldämm-Mass wird mit einem „>“-Zeichen, der Norm-Trittschallpegel mit einem „<“-Zeichen markiert.

3.6 Messgeräte

Wir führen die Messungen mit folgenden Messgeräten durch:

	Hersteller	Typ	Serien-Nummer
Kalibrator	B&K	4231	2376294
Raum A			
Schallpegelmesser	Norsonic	N140	1404012
Mikrophondrehgalgen	Norsonic	N265	29351
Verstärker	Norsonic	N280	2803896
Dodekaeder Lautsprecher	Norsonic	N276	2765550
Normhammerwerk	Norsonic	211	14018
Raum B			
Schallpegelmessser	Norsonic	N140	1404012
Mikrophondrehgalgen	Norsonic	N265	29351
Verstärker	Norsonic	N280	2803896
Dodekaeder Lautsprecher	Norsonic	N276	2765550

Tabelle 1. Zusammenstellung der verwandten Messgeräte.

Die Funktionsfähigkeit des Normhammerwerks und des Dodekaeder-Lautsprechers werden regelmässig von der EMPA überprüft.

3.7 Aufbau der trennenden Geschossdecken

Es werden die Schalldämm-Masse und die Normtrittschallpegel einer Holzbetonverbunddecke aus Buche ermittelt. Dieses Deckenelement wird mit und ohne schwimmend verlegten Unterlagsboden gemessen.

Die Konstruktion der trennenden Geschossdecken ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Die Konstruktion wird jeweils von oben nach unten beschrieben.

HBV-Decke (in mm)	Beschreibung der Bauteilschichten
Geschossdecke	
<p>(Anlage 1.1)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 231 mm HBV-Decke <ul style="list-style-type: none"> - 150 mm armierter Beton, $\rho = 2330 \text{ kg/m}^3$ (*) - 81 mm Buche, $\rho = 720 \text{ kg/m}^3$ (*)
Geschossdecke + Unterlagsboden	
<p>(Anlage 1.2)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 70 mm Betonplatte, $\rho \approx 2450 \text{ kg/m}^3$ - 25/22 mm Trittschalldämmung ISOVER PS81, $s' = 7 \text{ MN/m}^3$ (*) - 231 mm HBV-Decke <ul style="list-style-type: none"> - 150 mm armierter Beton, $\rho = 2330 \text{ kg/m}^3$ (*) - 81 mm Buche, $\rho = 720 \text{ kg/m}^3$ (*)
(*) nach Herstellerangabe	

Tabelle 2: Beschreibung der Holzbetonverbunddecke von oben nach unten, ohne und mit Unterlagsboden.

3.8 Schalldämmung der Holzbetonverbunddecke

Mit der Holzbetonverbunddecke als trennendes Element wird die Schalldämmung des Prüfstands zwischen den beiden Räumen für den Luft- und den Trittschallschutz bestimmt. Da die Schallübertragung über die Prüfstandswände nach Angabe der Mitarbeiter der EMPA unterdrückt wird, handelt es sich hier um die Werte für die direkte Luft- und Trittschallübertragung ohne die Schallübertragung über flankierende Wände, also die Schalldämmmasse R und die Norm-Trittschallpegel L_n .

Für die Umrechnung der gemessenen Werte in andere akustische Grössen sind die Werte für die Geometrie des Prüfstands in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Geometrie	Abmessung HBV	Abmessung HBV mit UB
Volumen des oberen Raums A	93.9 m ³	91.5 m ³
Volumen des unteren Raums B	88.8 m ³	88.8 m ³
Fläche der trennenden Geschossdecke S	24.07 m ²	24.07 m ²

Tabelle 3. Geometrie des Prüfstands.

3.8.1 Luftschallschutz der Geschossdecke

Die Messergebnisse für die gemessenen Schalldämmmasse, R sind in Anlage 2 zusammengestellt. Es wird jeweils das Schalldämmmass von Raum A nach Raum B und von Raum B nach Raum A unter Berücksichtigung der Grenzschalldämmung des Prüfungsstands berechnet und dann der Mittelwert aus beiden Werten gebildet¹.

3.8.2 Trittschallschutz der Geschossdecke

Die Messergebnisse für die Norm-Trittschallpegel der Holzbetonverbunddecken ohne und mit Unterlagsboden enthält Anlage 3.

3.9 Zusammenfassung der Messergebnisse der Direktschallübertragung

In Tabelle 4 Einzahlwerte und Spektrumanpassungswerte der Luftschalldämmung und der Trittschalldämmung für die direkte Schallübertragung der Geschossdecke sind die Messergebnisse der Luft- und Trittschallmessungen in Form der Einzahl- und der Spektrumanpassungswerte zusammengestellt.

Es werden ausserdem die Anlagen angegeben, in denen die Messergebnisse beschrieben werden.

	HBV		HBV + UB	
Senderraum-Empfangsraum	A-B	B-A	A-B	B-A
Luftschalldämmung	Anlage 2.1	Anlage 2.2	Anlage 2.3	Anlage 2.4
R_w	55.2	54.3	74.4	74.8
C	-1	-1	-2	-1
C_{tr}	-4	-5	-7	-6
$C_{50-3150}$	-1	-2	-9	-7
$C_{tr, 50-3150}$	-5	-6	-22	-20
$C_{50-5000}$	0	-1	-8	-6
$C_{tr, 50-5000}$	-5	-6	-22	-20
$C_{100-5000}$	0	0	-1	-1
$C_{tr, 100-5000}$	-4	-5	-7	-7
Trittschalldämmung	Anlage 3.1		Anlage 3.2	
$L_{n,w}$	82.7		47.2	
C_l	-12		-4	
$C_{l,50-2500}$	-12		0	

Tabelle 4 Einzahlwerte und Spektrumanpassungswerte der Luftschalldämmung und der Trittschalldämmung für die direkte Schallübertragung der Geschossdecke.

4 Literaturverzeichnis

- [1] EN ISO 3382-2 „Akustik –Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen (ISO 3382-2:2008)“
- [2] EN ISO 10140-5 „Akustik –Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen (ISO 10140-5:2010)“
- [3] EN ISO 10140-2 „Akustik –Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 2: Messung der Luftschalldämmung (ISO 10140-2:2010)“
- [4] EN ISO 10140-3 „Akustik –Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 3: Messung der Trittschalldämmung (ISO 10140-3:2010)“
- [5] EN ISO 717 – 1 „Akustik, Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 1: Luftschalldämmung (ISO 717-1:2013)“
- [6] EN ISO 717 – 2 „Akustik, Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen“ - Teil 2: Trittschalldämmung (ISO 717-2:2013)“
- [7] EN ISO 10140-4 „Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 4: Messverfahren und Anforderungen (ISO 10140-4:2010)“

5 Verzeichnisse

5.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Zusammenstellung der verwandten Messgeräte.	8
Tabelle 2: Beschreibung der Holzbetonverbunddecke von oben nach unten, ohne und mit Unterlagsboden.	9
Tabelle 3. Geometrie des Prüfstands.	9
Tabelle 4 Einzahlwerte und Spektrumanpassungswerte der Luftschalldämmung und der Trittschalldämmung für die direkte Schallübertragung der Geschossdecke.	10

5.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Aufbau des Prüfstands in Dübendorf.	3
Abbildung 2. Gemessene Nachhallzeiten im Raum A. Die Anforderungen an die Nachhallzeit nach EN ISO 10140-5 sind ebenfalls als rote Linien eingetragen.	4
Abbildung 3. Gemessene Nachhallzeiten im Raum B. Die Anforderungen an die Nachhallzeit nach EN ISO 10140-5 sind ebenfalls als rote Linien eingetragen.	5

6 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

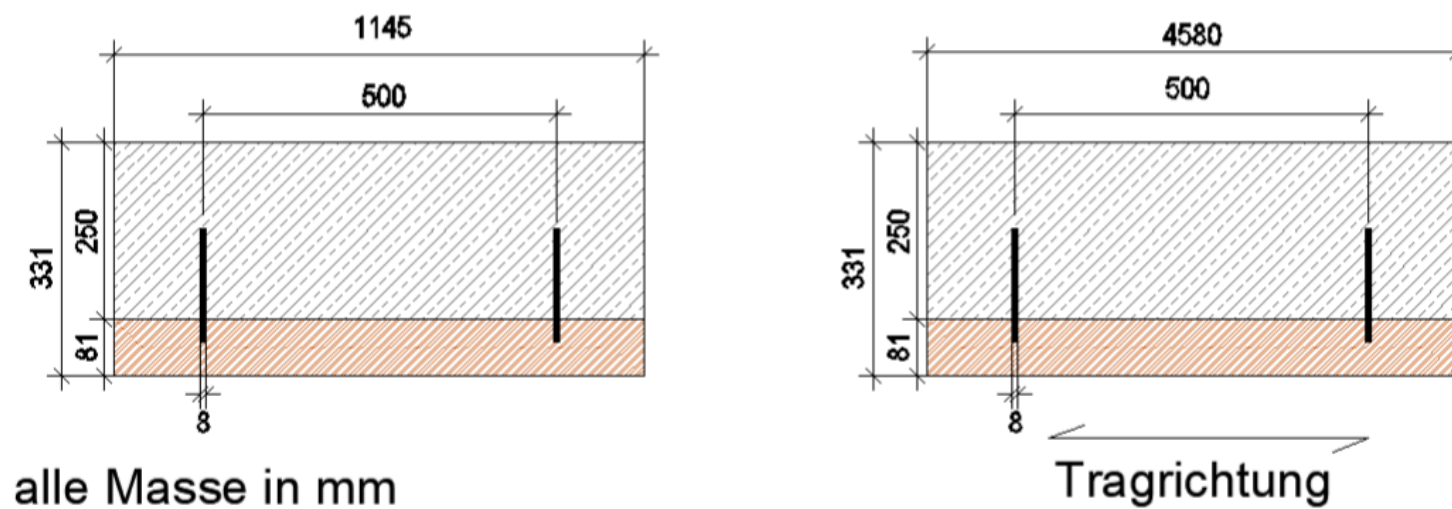
Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt. Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Institutsleiters für Holzbau, Tragwerke und Architektur und des Projektverantwortlichen gültig.

Anlage 1

Beschreibung der HBV-Decke

HBV-Decke ohne Unterlagsboden

Vertikalschnitte



Überbeton



Buche

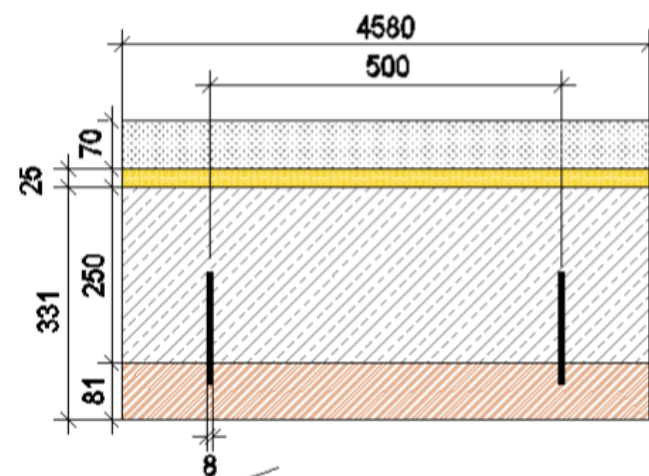
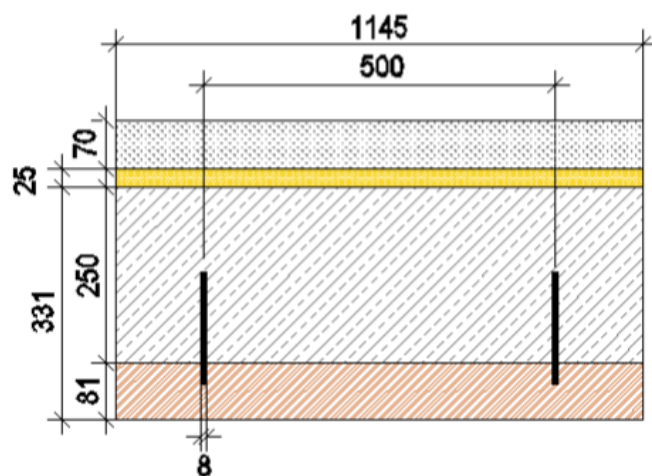


Schraube

Biel, 11.12.18

HBV-Decke mit Unterlagsboden

Vertikalschnitte



alle Masse in mm

Tragrichtung



Unterlagsboden



Trittschalldämmung



Überbeton



Buche



Schraube

Biel, 11.12.18

Anlage 2

Messergebnisse der Luftschalldämmung

Schalldämm-Mass nach ISO 10140-2

Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand

Auftraggeber: BAFU

Prüfdatum: 18.03.2019

Hersteller: Fagus Suisse und Häring

Aufbau des Prüfgegenstandes: HBV- Decke 150mm Beton + 80mm Baubuche, gedübelt,
Elementbreite 115cm, 5 Elemente
Elemente mit Klebeband abgedichtet

Luftdruck: 950.0 kPa

Lufttemperatur: 15.9 °C

Relative Luftfeuchtigkeit: 58.0 %

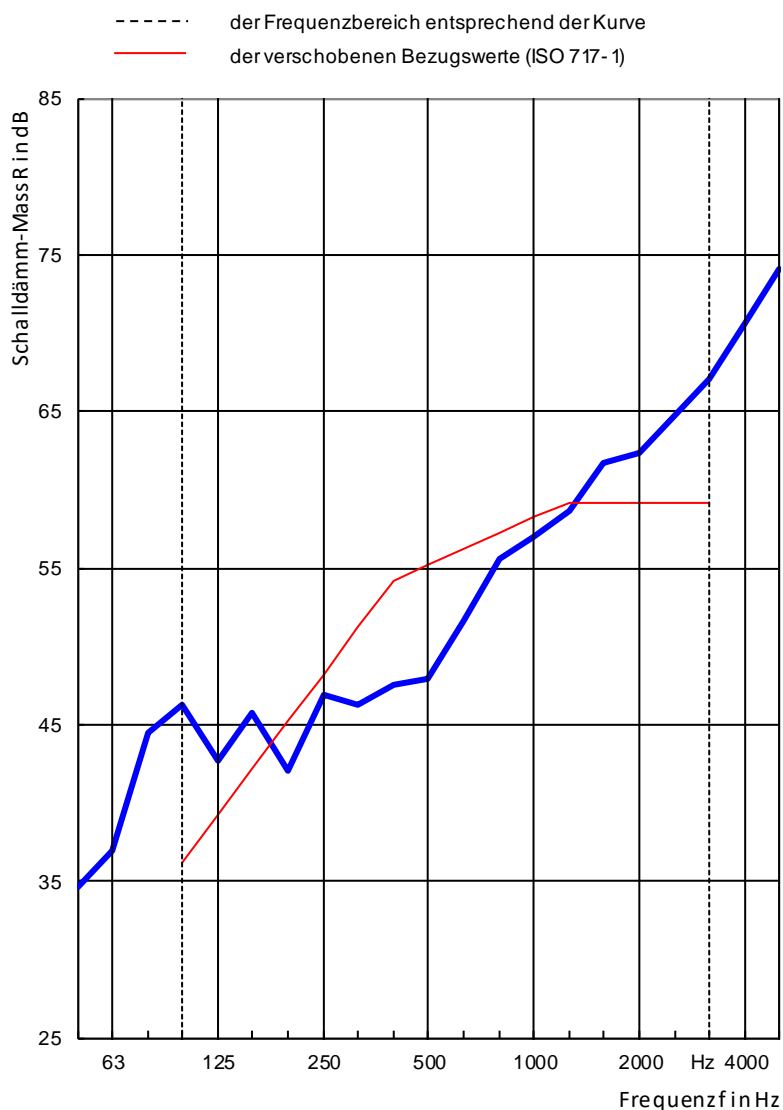
Flächenbezogene Masse:

Fläche der Prüföffnung: 24.07 m²

Senderraum Volumen: 93.9 m³

Empfangsraum Volumen: 88.8 m³

Frequenz f [Hz]	R Terz [dB]
50	34.6
63	36.9
80	44.5
100	46.3
125	42.7
160	45.8
200	42.1
250	46.9
315	46.3
400	47.5
500	47.9
630	51.6
800	55.6
1000	57.0
1250	58.7
1600	61.7
2000	62.4
2500	64.8
3150	67.1
4000	70.6
5000	74.1



Bewertung nach ISO 717-1

 $R_W(C;C_{tr}) = 55.2$ (-1 ; -4) dBDie Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen,
die in Terzbändern gewonnen wurden. $C_{50-3150} = -1$ dB $C_{50-5000} = 0$ dB $C_{100-5000} = 0$ dB $C_{tr,50-3150} = -5$ dB $C_{tr,50-5000} = -5$ dB $C_{tr,100-5000} = -4$ dB

Name des Prüfinstitut: BFH

Nr. des Prüfberichtes: BFH_03_AB

Datum: 18.03.2019

Unterschrift: Amabel Melián Hernández

Schalldämm-Mass nach ISO 10140-2

Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand

Auftraggeber: BAFU

Prüfdatum: 18.03.2019

Hersteller: Fagus Suisse und Häring

Aufbau des Prüfgegenstandes: HBV- Decke 150mm Beton + 80mm Baubuche, gedübelt,
Elementbreite 115cm, 5 Elemente
Elemente mit Klebeband abgedichtet

Luftdruck: 950.0 kPa

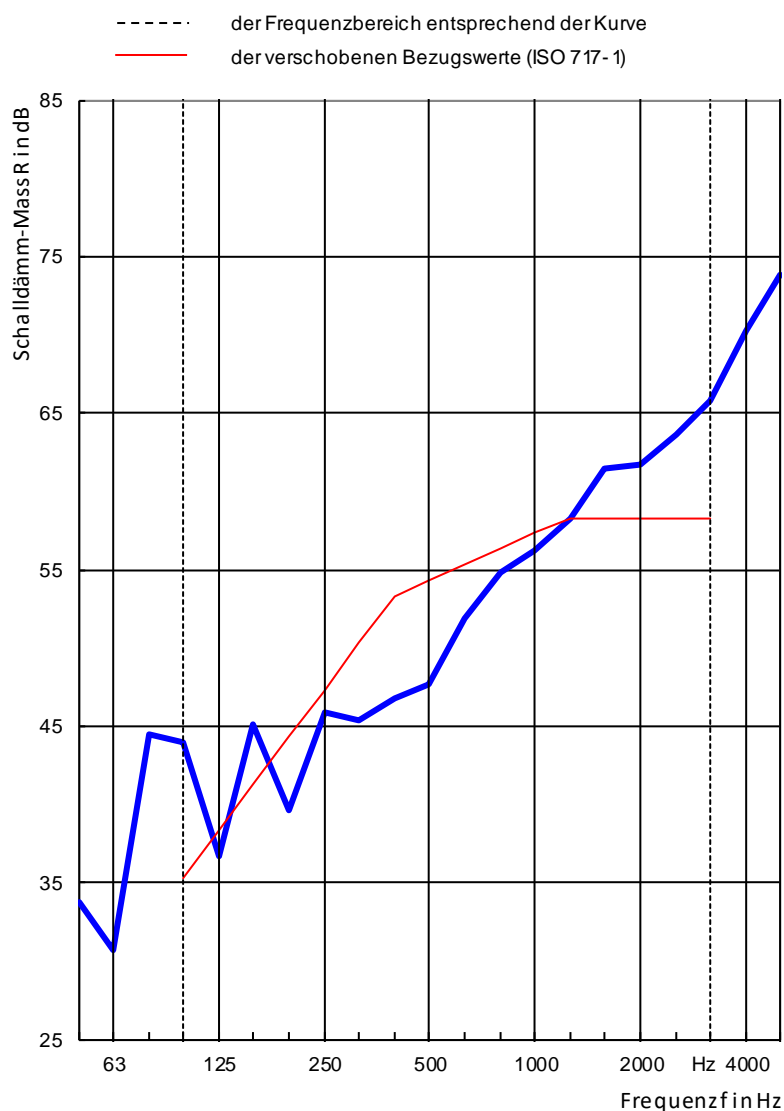
Lufttemperatur: 16.2 °C

Relative Luftfeuchtigkeit: 58.0 %

Flächenbezogene Masse:

Fläche der Prüfoffnung: 24.07 m²Senderraum Volumen: 88.8 m³Empfangsraum Volumen: 93.9 m³

Frequenz f [Hz]	R Terz [dB]
50	33.7
63	30.7
80	44.5
100	43.9
125	36.7
160	45.1
200	39.6
250	45.9
315	45.3
400	46.8
500	47.7
630	51.9
800	54.8
1000	56.2
1250	58.2
1600	61.4
2000	61.7
2500	63.6
3150	65.8
4000	70.2
5000	73.8



Bewertung nach ISO 717-1

 $R_w(C;C_{tr}) = 54.3$ (-1 ; -5) dB $C_{50-3150} = -2$ dB $C_{50-5000} = -1$ dB $C_{100-5000} = 0$ dB

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden.

 $C_{tr,50-3150} = -6$ dB $C_{tr,50-5000} = -6$ dB $C_{tr,100-5000} = -5$ dB

Name des Prüfinstitut: BFH

Nr. des Prüfberichtes: BFH_03_BA

Datum: 18.03.2019

Unterschrift: Amabel Melián Hernández

Schalldämm-Mass nach ISO 10140-2

Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand

Auftraggeber: BAFU

Prüfdatum: 12.03.2019

Hersteller: Fagus Suisse und Häring

Aufbau des Prüfgegenstandes: Betonplatte 70mm
 Trittschalldämmung 25mm Mineralfaser Isover PS81
 HBV- Decke 150mm Beton + 80mm Baubuche, gedübelt,
 Elementbreite 115cm, 5 Elemente
 Elemente mit Klebeband abgedichtet

Luftdruck: 970.0 kPa

Lufttemperatur: 13.2 °C

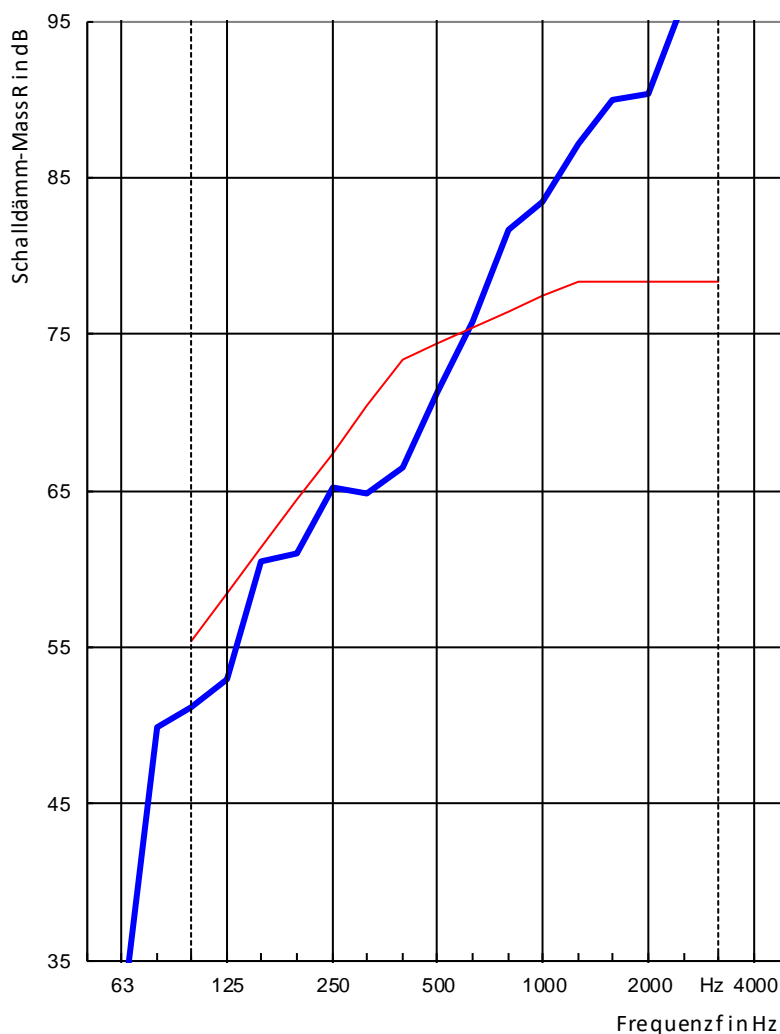
Relative Luftfeuchtigkeit: 55.0 %

Flächenbezogene Masse:

Fläche der Prüfoffnung: 24.07 m²Senderraum Volumen: 91.5 m³Empfangsraum Volumen: 88.8 m³

Frequenz f [Hz]	R Terz [dB]
50	31.0
63	30.9
80	49.9
100	51.1
125	52.9
160	60.5
200	61.0
250	65.2
315	64.8
400	66.5
500	71.2
630	75.8
800	81.6
1000	83.5
1250	87.2
1600	90.0
2000	90.3
2500	96.4
3150	100.4
4000	98.6
5000	95.9

----- der Frequenzbereich entsprechend der Kurve
 ----- der verschobenen Bezugswerte (ISO 717-1)



Bewertung nach ISO 717-1

 $R_W(C;C_{tr}) = 74.4$ (-2 ; -7) dB

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden.

 $C_{50-3150} = -9$ dB $C_{50-5000} = -8$ dB $C_{100-5000} = -1$ dB $C_{tr,50-3150} = -22$ dB $C_{tr,50-5000} = -22$ dB $C_{tr,100-5000} = -7$ dB

Name des Prüfinstitut: BFH

Nr. des Prüfberichtes: BFH_01_AB

Datum: 12.03.2019

Unterschrift: Amabel Melián Hernández

Schalldämm-Mass nach ISO 10140-2

Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand

Auftraggeber: BAFU

Prüfdatum: 12.03.2019

Hersteller: Fagus Suisse und Häring

Aufbau des Prüfgegenstandes: Betonplatte 70mm

Trittschalldämmung 25mm Mineralfaser Isover PS81

HBV- Decke 150mm Beton + 80mm Baubuche, gedübelt,

Elementbreite 115cm, 5 Elemente

Elemente mit Klebeband abgedichtet

Luftdruck: 970.0 kPa

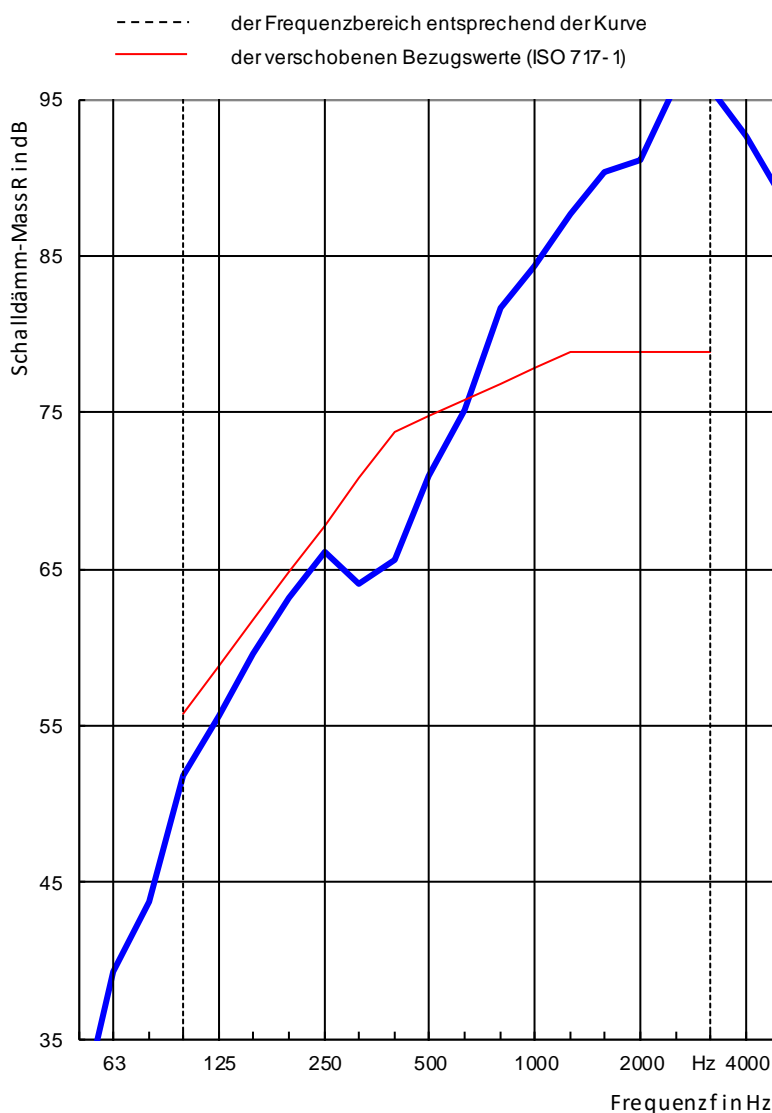
Lufttemperatur: 13.2 °C

Relative Luftfeuchtigkeit: 55.0 %

Flächenbezogene Masse:

Fläche der Prüfföffnung: 24.07 m²Senderraum Volumen: 88.8 m³Empfangsraum Volumen: 91.5 m³

Frequenz f [Hz]	R Terz [dB]
50	30.0
63	39.3
80	43.8
100	51.8
125	55.6
160	59.6
200	63.2
250	66.1
315	64.1
400	65.6
500	71.0
630	75.2
800	81.7
1000	84.4
1250	87.6
1600	90.3
2000	91.1
2500	96.0
3150	95.7
4000	92.7
5000	88.9



Bewertung nach ISO 717-1

 $R_w(C;C_{tr}) = 74.8$ (-1 ; -6) dBDie Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen,
die in Terzbändern gewonnen wurden. $C_{50-3150} = -7$ dB $C_{50-5000} = -6$ dB $C_{100-5000} = -1$ dB $C_{tr,50-3150} = -20$ dB $C_{tr,50-5000} = -20$ dB $C_{tr,100-5000} = -7$ dB

Name des Prüfinstitut: BFH

Nr. des Prüfberichtes: BFH_01_BA

Datum: 12.03.2019

Unterschrift: Amabel Melián Hernández

Anlage 3

Messergebnisse der Trittschalldämmung

Norm-Trittschallpegel nach ISO 10140-3

Messung der Trittschalldämmung von Decken in Prüfständen

Auftraggeber: BAFU

Prüfdatum: 18.03.2019

Hersteller: Fagus Suisse und Häring

Aufbau des Prüfgegenstandes: HBV-Decke 150mm Beton + 80mm Baubuche, gedübelt,
Elementbreite 115cm, 5 Elemente
Elemente mit Klebeband abgedichtet

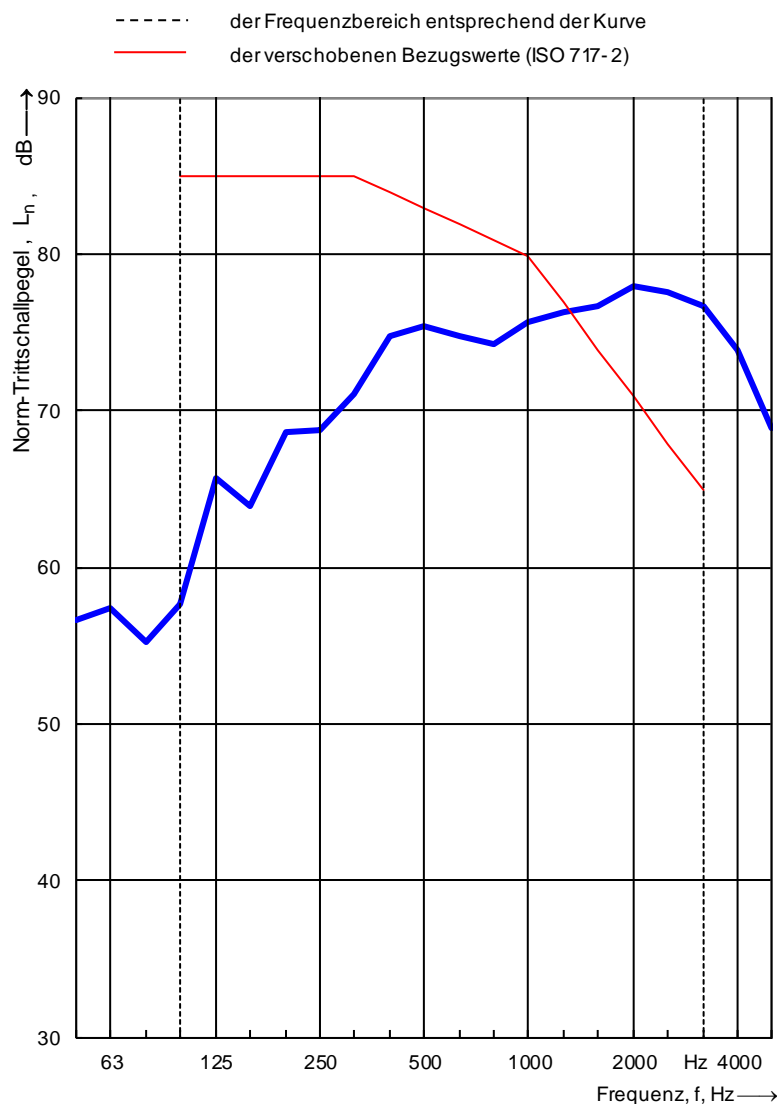
Temperatur: 16.2 °C

Luftfeuchte: 58.0 %

Senderraum Volumen: 93.9 m³

Empfangsraum Volumen: 88.8 m³

Frequenz f [Hz]	L_n Terz [dB]
50	56.6
63	57.4
80	55.2
100	57.6
125	65.7
160	63.9
200	68.6
250	68.7
315	71.0
400	74.8
500	75.4
630	74.7
800	74.2
1000	75.6
1250	76.3
1600	76.6
2000	77.9
2500	77.6
3150	76.6
4000	73.8
5000	68.9



Bewertung nach ISO 717-2

 $L_{nw}(C_1) = 82.7$ (- 12) dB $C_{150-2500} = -12$ dB

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen,
die in Terzbändern gewonnen wurden.

Name des Prüfinstituts: BFH

Nr. des Prüfberichtes: BFH_03_TS

Datum: 18.03.2019

Unterschrift: Amabel Melián Hernández

Norm-Trittschallpegel nach ISO 10140-3

Messung der Trittschalldämmung von Decken in Prüfständen

Auftraggeber: BAFU

Prüfdatum: 12.03.2019

Hersteller: Fagus Suisse und Häring

Aufbau des Prüfgegenstandes: Betonplatte 70mm

Trittschalldämmung 25mm Mineralwolle Isovor PS81

HBV-Decke 150mm Beton + 80mm Baubuche, gedübelt,

Elementbreite 1150mm, 5 Elemente

Elemente mit Klebeband abgedichtet

Temperatur: 13.2 °C

Luftfeuchte: 55.0 %

Flächenbezogene Masse:

Abbindzeit:

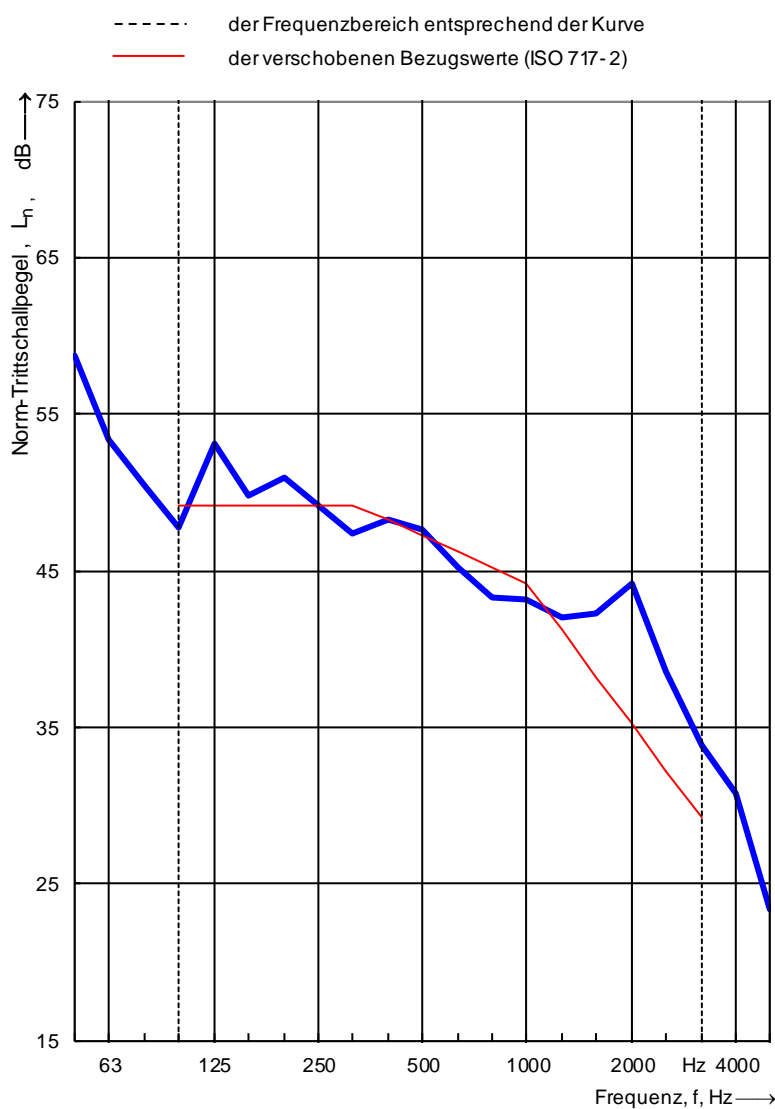
Senderraum Volumen:

91.5 m³

Empfangsraum Volumen:

88.8 m³

Frequenz f [Hz]	L_n Terz [dB]
50	58.7
63	53.3
80	50.4
100	47.7
125	53.1
160	49.8
200	51.0
250	49.2
315	47.3
400	48.2
500	47.6
630	45.2
800	43.3
1000	43.2
1250	42.0
1600	42.2
2000	44.2
2500	38.5
3150	33.8
4000	30.8
5000	23.4



Bewertung nach ISO 717-2

 $L_{nw}(C_i) = 47.2$ (-4) dB $C_{150-2500} = 0$ dB

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden.

Name des Prüfinstitut: BFH

Nr. des Prüfberichtes: BFH_01_TS

Datum: 12.03.2019

Unterschrift: Amabel Melián Hernández