

Psychoakustische Beurteilung der Trittschallübertragung einer Massivtreppe

Maren Wolters¹, Jochen Scheck², Andreas Drechsler², Ulrich Schanda¹

¹ Technische Hochschule Rosenheim, 83024 Rosenheim, E-Mail: wolters.maren@gmx.de, ulrich.schanda@th-rosenheim.de

² Hochschule für Technik, 70174 Stuttgart, E-Mail: jochen.scheck@hft-stuttgart.de, andreas.drechsler@hft-stuttgart.de,

Einleitung

In den letzten Jahrzehnten hat die Bedeutung der Psychoakustik zur gehörrichtigen Beurteilung von Schallereignissen deutlich zugenommen. Hierbei wird sie zum Großteil zur Optimierung der akustischen Eigenschaften von Produkten wie beispielsweise Lautsprechersystemen oder Fahrzeugen mit hohen Ansprüchen an den Fahrkomfort verwendet. Doch auch im Bausektor nimmt die Psychoakustik eine immer wichtigere Rolle ein. Hierbei konzentrieren sich die Forschungsergebnisse jedoch auf die Trittschallübertragung von Holzbalkendecken und Leichtbautreppen [1]. Im Massivbau wurden bisher erst wenige Untersuchungen durchgeführt, obwohl in Treppenhäusern von Mehrfamilienhäusern vorwiegend Massivtreppen verbaut werden. In Anbetracht von immer wieder auftretenden Beschwerden, trotz fehlerfreier Ausführung wurden hierzu Untersuchungen durchgeführt unter folgenden Fragestellungen:

1. Wie werden Gehgeräusche auf Massivtreppen wahrgenommen?
2. Was bringt die Entkopplung von Massivtreppen aus psychoakustischer Sicht?

Um diesen Fragen nachzugehen, wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit [2] die Trittschallübertragung einer entkoppelten Massivtreppe durch psychoakustische Kenngrößen beurteilt und der bauakustischen Beurteilung durch Norm-Trittschallpegel und Spektrum-Anpassungswerte gegenübergestellt. Dazu wurde in einem schalltechnischen Treppenprüfstand ein Aufbau nach DIN 7396 [3] mit einem entkoppelten Treppenlauf und einem starr verbundenen Podest realisiert und Messungen bei Anregung durch gehende und hüpfende Personen mit unterschiedlichem Schuhwerk, sowie mit Norm-Hammerwerk und Gummiball nach DIN EN ISO 10140-5 [4] durchgeführt.

Prüfaufbau

Sowohl die bauakustischen als auch psychoakustischen Messungen erfolgten im Treppenprüfstand der STEP GmbH. Wie Abbildung 1 zeigt, erfolgte die Übertragung dabei vom Senderaum (SR) unten rechts zum Empfangsraum (ER) unten in der Mitte. Die Trennwand (dunkelgrau) bestand aus einem 24 cm starken Vollstein aus Kalksandstein mit einer Dichte von $1,8 \text{ kg/m}^3$. Während das Podest auf der einen Seite mit der Trennwand starr verbunden war, lag es auf der gegenüberliegenden Hilfswand (blau) entkoppelt auf. Dadurch ist gewährleistet, dass der Körperschall bei Anregung der Treppe nur über die Trennwand übertragen wird. Der Treppenlauf (rot) wurde entkoppelt auf dem Podest und auf dem Boden aufgelegt, wobei sich jeweils ein

Entkopplungselement unter dem An- und Austritt befand. Zwischen dem Treppenlauf und der Trennwand war eine ca. 2 cm breite Luftfuge.

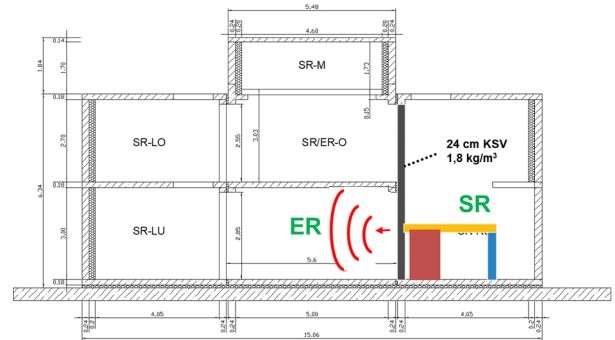


Abbildung 1: Treppenprüfstand der STEP GmbH.

Der Empfangsraum wurde mit Flächen- und Eckabsorbieren bedämpft, um eine übliche Nachhallzeit ähnlich der eines Wohnzimmers (0,5- 1,0 Sekunden) zu erreichen. Für die psychoakustischen Messungen wurde einem Kunstkopf ein binaurales Headset aufgesetzt und dieser in der Ecke gegenüber der Trennwand positioniert (Abbildung 2). Durch diese Aufstellung befanden sich die Mikrofone in etwa auf Höhe der Ohren einer im Bett liegenden Person.



Abbildung 2: Empfangsraum aus Sicht der Trennwand (Raummitte: Mikrofon mit Schwenktrippel; hintere rechte Ecke: Kunstkopf mit binauralem Headset; Raumecken: Eckabsorber zur Reduzierung der Nachhallzeit).

Anregungen

Es wurden sowohl normative als auch reale Anregungen durchgeführt. Als normative Quellen wurden ein Norm-Hammerwerk und ein japanischer Gummiball verwendet, wobei der Gummiball aus einer Höhe von einem Meter und mit einer Frequenz von 2 Hz fallen gelassen wurde. Als reale Anregungen wurden das Gehen und Hüpfen einer Frau und eines Mannes verwendet. Die Anregung erfolgte dabei jeweils

mit Turnschuhen und barfuß. Bei der Anregung durch die Frau wurden zusätzlich Absatzschuhe verwendet.

Die Anregung erfolgte auf dem Austritt des entkoppelten Treppenlauf und auf dem nicht entkoppelten Podest. Frühere Untersuchungen [5] haben gezeigt, dass der Austritt der Treppe aufgrund des modalen Verhaltens des Treppenlaufs als kritischster Anregungsort auf dem Lauf angenommen werden kann. Als Referenz zum Vergleich mit dem entkoppelten Treppenlauf wurde das starre Podest verwendet.

Die realen Anregungen erfolgten hüpfend auf dem Austritt und auf dem Podest knapp hinter dem Austritt. Das Gehen erfolgte auf dem gesamten Lauf rauf und runter bzw. auf dem Podest hin und her.

Bauakustische Messergebnisse

Zum Vergleich der normativen Anforderungen mit der tatsächlichen Wahrnehmung erfolgte zunächst eine Auswertung der bauakustischen Messungen. Diese zeigten für den entkoppelten Lauf im Vergleich zum Podest eine deutliche Reduzierung des Norm-Trittschallpegels $L_{n,w}$ (C_1 ; $C_{150-2.500}$) von 70 dB (-13; -13) auf 38 dB (-3; 0), siehe Abbildung 3. Die Trittschallminderung ΔL_w ($C_{1,\Delta}$) beträgt 28 dB (-10), siehe Abbildung 4. Dadurch werden sowohl die erhöhten Schallschutzanforderungen nach DIN 4109-5 ($L'_{n,w} = 47\text{dB}$) [6] als auch die Schallschutzstufe II ($L'_{nT,w} = 44\text{ dB}$) der VDI 4100 [7] und der DEGA-Empfehlung 103 Klasse A ($L'_{n,w} = 38\text{ dB}$) [8] erfüllt. Somit führt die Entkopplung des Treppenlaufs am An- und Austritt zu einer erheblichen Verbesserung des Trittschallschutzes und zu einem hohen Schallschutzniveau in Bezug auf normative Anforderungen.

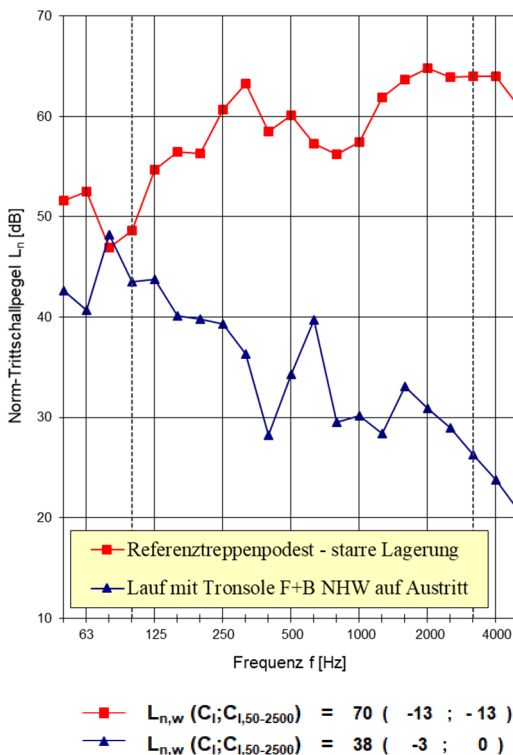


Abbildung 3: Norm-Trittschallpegel des starren Podests (rot) und des entkoppelten Treppenlaufs (blau).

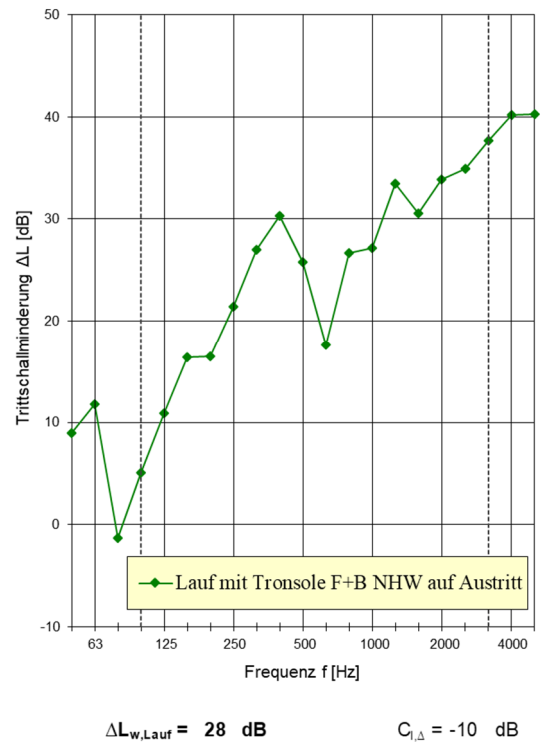


Abbildung 4: Trittschallpegelminderung des entkoppelten Treppenlaufes mit Referenz zum starren Podest.

Psychoakustische Kenngrößen

Anders als die Bauakustik befasst sich die Psychoakustik mit der Messung und Auswertung von Empfindungsgrößen [9]. Sie beschreibt wie laut, scharf oder rau ein Geräusch wahrgenommen wird. Die vier am häufigsten genannten Kenngrößen sind hierbei die Lautheit N, Schärfe S, Schwankungsstärke F und Rauigkeit R. Die Schärfe beschreibt den Anteil hoher Frequenzen in einem Geräusch während sich die Schwankungsstärke und die Rauigkeit mit der Modulation befassen. Die meist maßgebliche und in dieser Untersuchung betrachtete Kenngröße ist die Lautheit mit der Einheit sone. Diese beschreibt um wieviel lauter ein Geräusch A im Vergleich zu einem Geräusch B wahrgenommen wird.

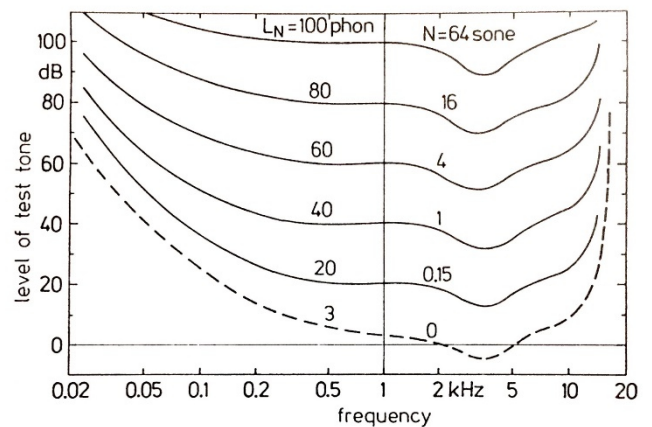


Abbildung 5: Kurven gleicher Lautstärke in phon und sone.

Grundsätzlich ist die Lautheit eng mit der Lautstärke verbunden. So ist ein sone als ein Ton bei 1.000 Hz und 40 dB definiert, was einer Lautstärke von 40 phon entspricht.

Abbildung 5 macht diese Beziehung deutlich. Oberhalb von einem sone entspricht eine Erhöhung von 10 phon einer Verdoppelung der Lautheit, was einem linearen Verlauf entspricht. Unterhalb von einem sone verhält sich das Gehör nicht-linear, wodurch bereits geringere Lautstärkeerhöhungen zu einer Lautheitsverdopplung führen.

Spezifische Lautheit

Die psychoakustische Auswertung der Messungen erfolgte mit der Software Artemis, welche zur Ermittlung der Lautheit das Lautheitsmodell nach Zwicker von 1991 nutzt [10]. Das Modell basiert auf der Bandbreite des menschlichen Gehörs, nach welcher der hörbare Frequenzbereich in 25 Frequenzgruppen [bark] aufgeteilt werden kann. Diese werden bei Schallsignalen zu unterschiedlichen Teilen angeregt, wobei die Lautheit innerhalb der einzelnen Frequenzgruppen als spezifische Lautheit N' bezeichnet wird. Abbildung 6 zeigt den Verlauf der spezifischen Lautheit in sone/bark über den Frequenzgruppen für die Anregung des entkoppelten Laufs mit dem Gummiball.

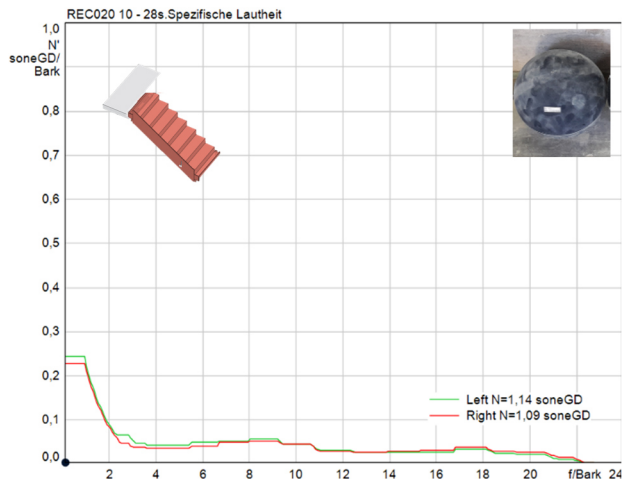


Abbildung 6: Spezifische Lautheit bei Anregung des entkoppelten Treppenlaufs mit dem Gummiball.

Aus der spezifischen Lautheit lässt durch Integration über alle Frequenzgruppen die Summenlautheit ermitteln:

$$N_{m,t} = \int_0^{24} N'(z, t) * dz \quad [\text{sone}] \quad (1)$$

Eignung der Anregungsarten

Bei der psychoakustischen Auswertung wurden die spezifische Lautheit, die Summenlautheit und das 10%-Perzentil der Summenlautheit bei verschiedenen Anregungen betrachtet.

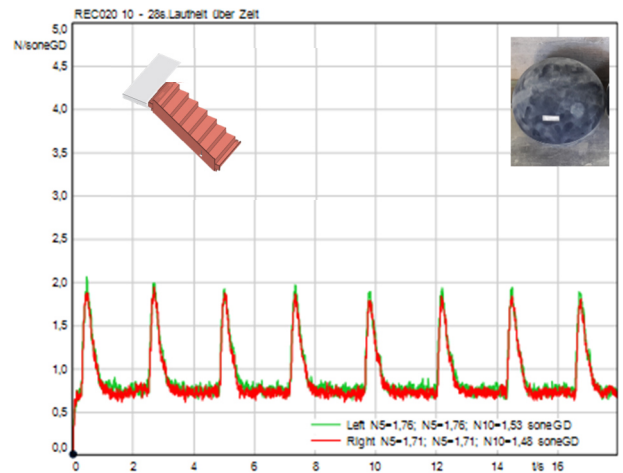


Abbildung 7: Zeitverlauf der Summenlautheit bei Anregung des entkoppelten Treppenlaufs mit dem Gummiball.

Der Zeitverlauf der Summenlautheit (Abbildung 7) zeigt, dass die Anregung mit dem Gummiball sehr gut reproduzierbar ist. Das Maximum der Lautheit liegt bei ca. 2,0 sone, was der durchschnittlichen Summenlautheit bei Anregung durch den hüpfenden Mann entspricht.

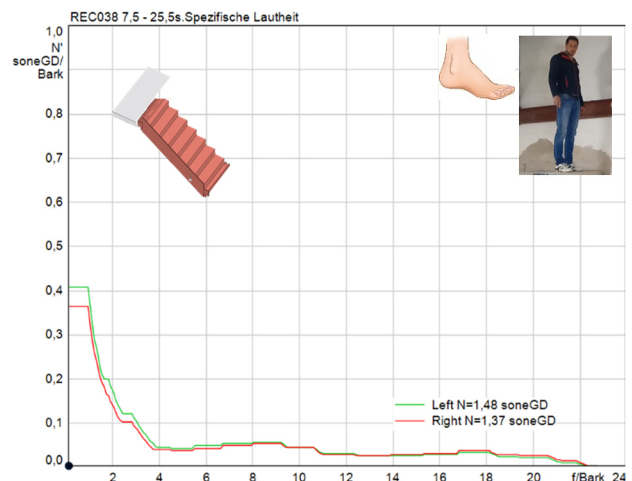


Abbildung 8: Spezifische Lautheit bei Anregungen des entkoppelten Treppenlaufs durch den hüpfenden Mann (barfuß).

Die Vergleichbarkeit beider Anregungen wird auch durch die spezifischen Lautheiten in Abbildung 6 und 8 bestätigt. Bei beiden Anregungen erfolgt die wesentliche Übertragung in den Frequenzgruppen von 0 bis 1 Bark, also unter 100 Hz. Ein störender Einfluss des Grundgeräusches kann dabei vernachlässigt werden, wie auch durch Analysen mit Filterungen bestätigt werden konnte [11].

Hinsichtlich des Norm- Hammerwerks konnten wiederum frühere Forschungsergebnisse bestätigt werden, dass es nicht dazu geeignet ist, um reale Trittschallanregungen nachzubilden. Die Anregung des Hammerwerks über alle Frequenzen ist zwar dazu geeignet, die schalldämmende Wirkung von Bauteilen über eine große Bandbreite zu ermitteln, jedoch kann es nicht für die Beurteilung von Gehanregungen herangezogen werden.

Wirkung der Tronsole

Die Analyse der Ergebnisse hat gezeigt, dass der Einsatz von Tronsolen zur Entkopplung von Treppenläufen zu einer deutlichen Reduzierung der Lautheit führt. Demnach ergibt sich im Falle des Gummiballs eine Halbierung der Lautheit.

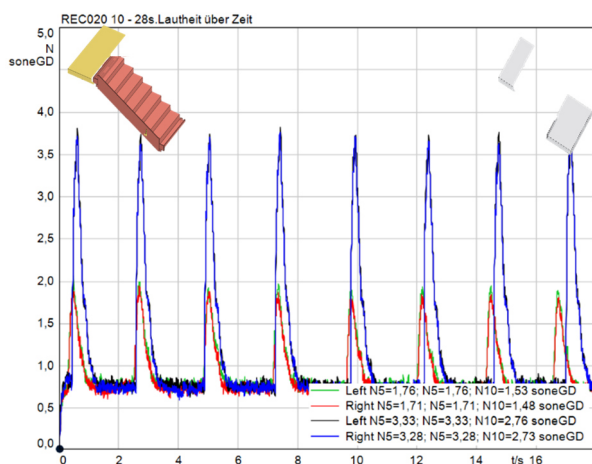


Abbildung 9: Zeitverlauf der Summenlautheit bei Anregung des entkoppelten Treppenlaufs (rot/grün) und des entkoppelten Podests (blau/violett) mit dem Gummiball.

Darüber hinaus ergaben die Analysen, dass die Gesamtverbesserung der Lautheit stark abhängig ist von der jeweiligen Anregungsart. Demnach führte bei Anregungen mit Anteilen mittlerer und hoher Frequenzen die Entkopplung zu einer stärkeren Verbesserung. Wie Abbildung 9 zeigt, liegt dies an der im Vergleich größeren Reduzierung der Fläche unterhalb des Verlaufs und damit der Summenlautheit.

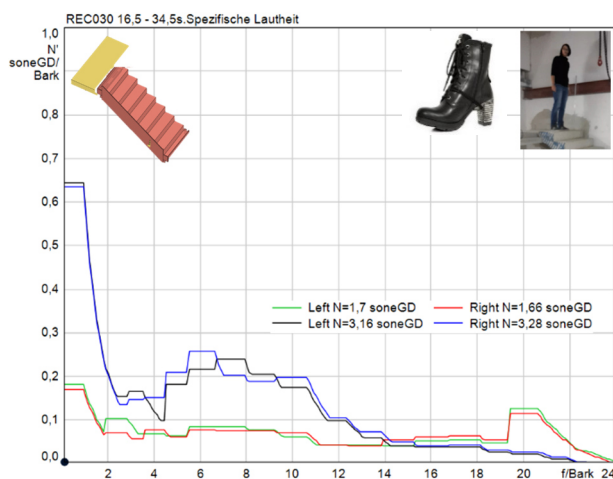


Abbildung 10: Zeitverlauf der Summenlautheit bei Anregung des entkoppelten Treppenlaufs (rot/grün) und des entkoppelten Podests (blau/violett) durch eine Frau mit Absatzschuhen.

Die 10%-Perzentile und die sich ergebenden Verbesserungsfaktoren der verschiedenen Anregungsarten sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Gesamtverbesserung der Lautheit je Anregung

	Anregung		
	Gummiball	Mann (barfuß)	Frau (Absatz)
Podest	2,8 sone	2,8 sone	4,1 sone
Lauf	1,5 sone	1,7 sone	1,5 sone
Faktor	~2,0	~2,0	~3,0

Entsprechend der zusätzlich geminderten mittleren Frequenzen ist bei der Anregung mit Absätzen ein höherer Faktor gegeben. Somit bestätigt sich erneut der Gummiball als sehr gut geeignete Anregungsart zur Beurteilung der Wirkung von Entkopplungselementen. Die Beurteilung liegt hier auf der sicheren Seite und es wird keine vermeintlich höhere Verbesserung angenommen.

Fazit

Die Analysen ergaben, dass die Wirkung von Entkopplungselementen stark von der Anregung abhängig ist. Der Gummiball ließ sich sowohl in seiner Reproduzierbarkeit, seiner angeregten Frequenzen als auch seiner Gesamtverbesserung als sehr gut geeignet bestätigen, um die Wirkung von Entkopplungselementen zu beurteilen.

Die vorgenommenen Auswertungen deuten darauf hin, dass der für die Wahrnehmung problematische Frequenzbereich bei entkoppelten Massivtreppen unter 100 Hz liegt.

Grundsätzlich handelt es sich bei den dargestellten Werten allein um Mess- und Berechnungsergebnisse. Inwieweit sie der tatsächlich wahrgenommenen Verbesserung entsprechen ist im Rahmen weiterer Forschung durch Hörversuche zu überprüfen.

Literatur

- [1] A. Rabold „Trittschalldämmung richtig bewerten“, *I. Internationale Schall- und Akustiktage*, 2011
- [2] M. Wolters „Psychoakustische Beurteilung der Schallübertragung einer Massivtreppe bei unterschiedlichen Anregungen“, 2019
- [3] DIN 7396:2016-06 „Bauakustische Prüfungen – Prüfverfahren zur akustischen Kennzeichnung von Entkopplungselementen für Massivtreppen“
- [4] DIN EN ISO 10140-5:2010-05 „Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen“
- [5] J.Scheck, E. Taskan, H.-M. Fischer und C. Fichtel: „Schallschutz von entkoppelten Massivtreppen – Teil 1: Prüfverfahren im Labor“ *Bauphysik Heft 15*, 2013
- [6] DIN 4109-5:2020-08 „Schallschutz im Hochbau - Teil 5: Erhöhte Anforderungen“
- [7] VDI 4100:2012-10 „Schallschutz im Hochbau – Wohnungen - Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz“
- [8] DEGA-Empfehlung 103:2018-01 „Schallschutz im Wohnungsbau – Schallschutzausweis“
- [9] H. Zwicker, E. Fastl „Psychoacoustics“, 1990
- [10] DIN 45631: 1991-03 „Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum – Verfahren nach E. Zwicker“
- [11] V. Silberbauer „Psychoakustische Beurteilung der Dämmwirkung von Entkopplungselementen an Massivtreppen“, 2020