

Charakterisierung von Hammerwerken für horizontale Anregung

Heinrich Bietz, Volker Wittstock

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig heinrich.bietz@ptb.de

Einleitung

Zur Prognose von Schwingungsübertragungen in Gebäudestrukturen werden zunehmend vibroakustische Eigenschaften von Wänden als Eingangsgrößen benötigt. Beispiele für solche Prognosen sind die DIN 7396¹ und der darauf verweisende Entwurf der EN 12354-2². Zur Messung von Wänden wird eine genormte Quelle vergleichbar dem Norm-Trittschallhammerwerk benötigt, die aber im Gegensatz zu diesem eine Anregung des Bauteils in horizontaler Richtung erlaubt. Die zurzeit auf dem Markt befindlichen Geräte arbeiten entweder elektrodynamisch oder nach dem Prinzip eines Pendelhammers. Hier stellt sich die Frage, ob sich diese Quellen hinsichtlich ihrer Eignung charakterisieren lassen, und ob eine Umrechnung zwischen verschiedenen Quellen möglich ist. Um diese Fragestellungen näher zu untersuchen, wurden einige dieser Geräte hinsichtlich ihrer Quellgrößen (Quellmobilität, Kurzschlusskraft, erzeugtes Spektrum) betrachtet und miteinander verglichen. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse werden vorgestellt und diskutiert.

Untersuchte Quellen

Ein Großteil der Untersuchungen befasst sich mit einem als „MIDI-Hammerwerk“ im Handel befindlichen elektrodynamischen Hammerwerk, das speziell im Hinblick auf die in DIN 7396 formulierten Anforderungen konstruiert wurde³. Weiterhin wurden ein an der EMPA Dübendorf entwickelter Pendelhammer und das altbekannte Kleinhammerwerk „System Gösele“ untersucht, da diese ebenfalls die Möglichkeit der horizontalen und vertikalen Anregung bieten. Zum Vergleich wurden auch ein zugelassenes Normhammerwerk sowie ein modifiziertes Normhammerwerk hinzugezogen, bei letzterem wurden vier Hämmer ausgebaut, so dass ein Hammer mit einer Schlagfrequenz von 2 Hz übrigbleibt.

Durchführung der Messungen

Normhammerwerke werden in der PTB üblicherweise geprüft, indem die Schlagfolge und die Aufprallgeschwindigkeit gemessen werden. Dieses Verfahren ist bei den ausgewählten Quellen teils nicht praktikabel und auch nicht sinnvoll. Stattdessen wurde eine Charakterisierung mit dem 2-Platten-Verfahren angestrebt. Dieses ist zwar mit relativ hohen Unsicherheiten behaftet, liefert dafür aber Aussagen über die grundlegenden Quellparameter Kurzschlusskraft, freie Schnelle und Quellmobilität. Hierbei wird die zu untersuchende Schallquelle auf zwei verschiedenen Empfangsplatten betrieben, deren Mobilität im ersten Fall deutlich höher und im zweiten Fall deutlich niedriger als die der Quelle sein sollte. Die Messung der mittleren Schnelle und der daraus resultierenden Körperschalleistung liefert im ersten Fall die freie Schnelle, und im zweiten Fall die Kurzschlusskraft der untersuchten Quelle, woraus sich letztlich auch die Quellmobilität ermitteln lässt. In der Praxis ist die Auswahl der Platte hoher Mobilität oft problematisch. Diese muss leicht, biegsam und weichfedernd gelagert sein. Andererseits muss sie z.B. im vorliegenden Fall ermöglichen, dass

ein Hammerwerk auf ihr betrieben werden kann. Als schwere Empfangsplatte wurde für vertikale Anregung die Betondecke eines Prüfstands genutzt, und für horizontale Anregung eine freistehende und nicht weiter bedämpfte Betonplatte. Als leichte Empfangsplatte wurde in beiden Fällen eine Sperrholzplatte benutzt, diese war für vertikale Anregung vollflächig und für horizontale Anregung punktweise elastisch gelagert. Die Materialparameter der Empfangsplatten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Materialparameter der Empfangsplatten

Material	Beton ↓	Beton →	Sperrholz
S (m ²)	16,7	2,7	2,0
d (mm)	160	50	6
m (kg)	6400	297	5,0
E (GPa)	34	34	12
Y_{inf} (m/(Ns))	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$

Ein Indikator für die Qualität einer Empfangsplatte ist die sog. „Leistungskorrektur“. Dabei wird die mittels eines Shakers eingespeiste Körperschalleistung am Einleitungspunkt und im Hallfeld gemessen, wobei eine ideale Empfangsplatte in beiden Fällen den gleichen Wert liefern würde. Die Leistungskorrekturen der verwendeten Empfangsplatten sind in Bild 1 dargestellt. Die vollflächig gelagerte liegende Sperrholzplatte weist hierbei eine erheblich höhere Leistungskorrektur auf als die anderen Empfangsplatten.

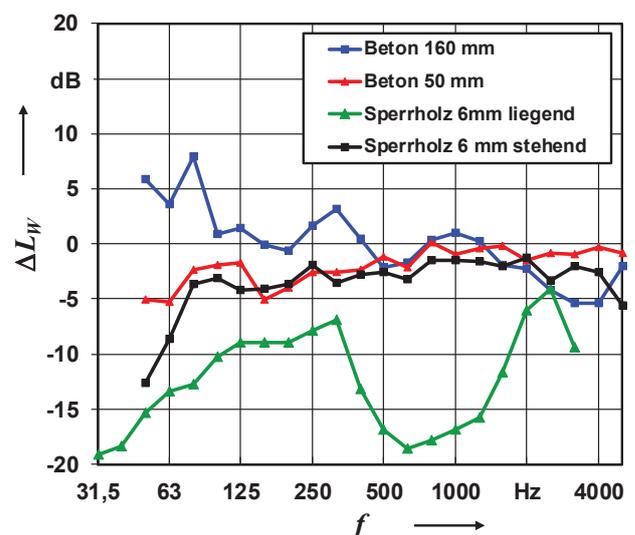


Bild 1: Leistungskorrekturen der Empfangsplatten

Messergebnisse

Vertikale Anregung

Bild 2 zeigt die durch Messung auf der Betondecke ermittelten Kurzschlusskräfte. Da der Pendelhammer kein stationäres Signal liefert, wurden hier jeweils 10 Einzelschläge ausgewertet und das gemittelte Ergebnis energetisch auf eine

angenommene Schlagfrequenz von 2 Hz korrigiert. Am Pendelhammer können zwei Fallwinkel eingestellt werden, ein kleinerer Winkel („KW“) für vertikale Anregung und ein größerer Winkel („GW“) für horizontale Anregung. Im vorliegenden Fall wurden für beide Betriebsarten beide Winkel verwendet.

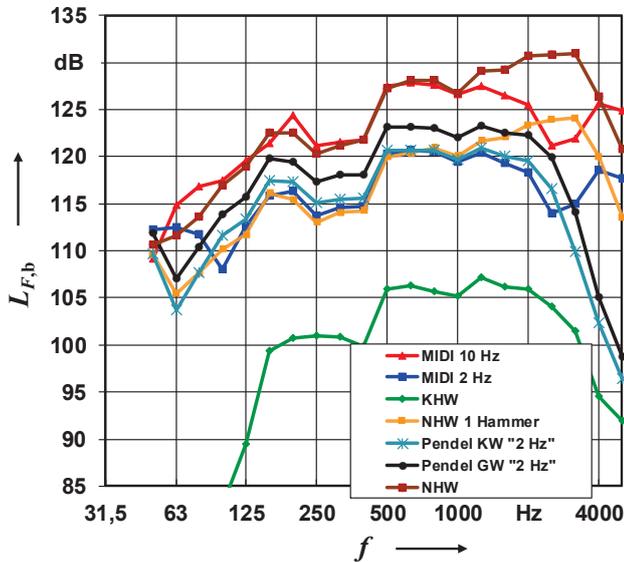


Bild 2: Kurzschlusskräfte in dB re 2e-5 N, vertikale Anregung. KHW: Kleinhammerwerk; NHW: Normhammerwerk

Zunächst fällt auf, dass fast alle Quellen über einen weiten Frequenzbereich qualitativ und teils auch quantitativ ähnliche Verläufe liefern. Oberhalb von 1000 Hz zeigen sich signifikante Abweichungen zwischen den Normhammerwerken und dem MIDI-Hammerwerk mit 10 Hz bzw. 2 Hz Schlagfrequenz. Diese wurden in der Vergangenheit nicht beobachtet³ und sind auch deshalb bemerkenswert, weil die Hämmer hinsichtlich Material, Masse und Form gleich sein sollten. Auch die Kurzschlusskraft des Pendelhammers bricht oberhalb von 1000 Hz ein, dies ist allerdings in Anbetracht des Materials der Schlagflächen (Nylon ö.ä.) nicht verwunderlich. Auch das Kleinhammerwerk zeigt bei hohen Frequenzen einen Einbruch, darüber hinaus bricht die Kurzschlusskraft auch unter 160 Hz stark ein.

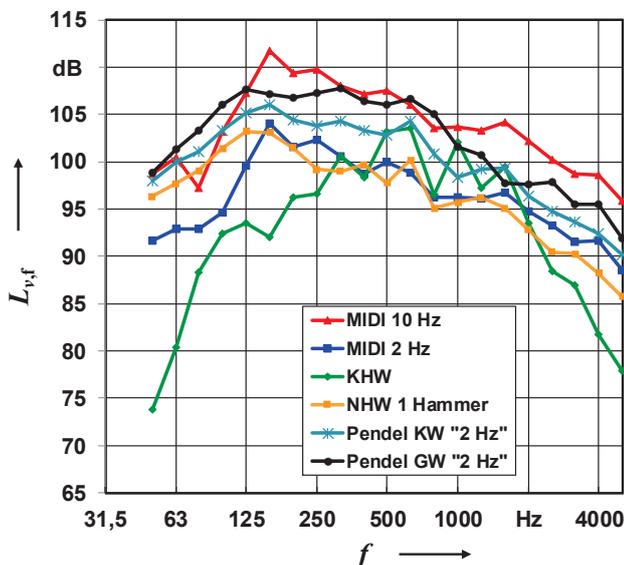


Bild 3: Freie Schnellen in dB re 5e-8 m/s, vertikale Anregung

Der in Bild 3 dargestellte Verlauf der freien Schnelle zeigt eine weniger klare, aber grundsätzlich ähnliches Bild. Auch hier zeigt das Kleinhammerwerk ein von den anderen Probanden deutlich abweichendes Verhalten.

Bild 4 zeigt die resultierenden Quellmobilitäten. Das modifizierte Normhammerwerk zeigt hierbei noch über den weitesten Frequenzbereich ein typisches Masseverhalten, wenngleich der theoretisch zu erwartende Wert einer 500g-Masse nicht erreicht wird. Im Vergleich zum MIDI-Hammerwerk zeigt sich im mittleren Frequenzbereich eine gute Übereinstimmung der Mobilitäten, bei tiefen und hohen Frequenzen gibt es größere Abweichungen. Auch der Pendelhammer zeigt über einen recht weiten Frequenzbereich einen dem Normhammer ähnlichen Verlauf der Mobilität. Das Kleinhammerwerk fällt dagegen sehr aus dem Rahmen und soll im Weiteren auch nicht mehr betrachtet werden.

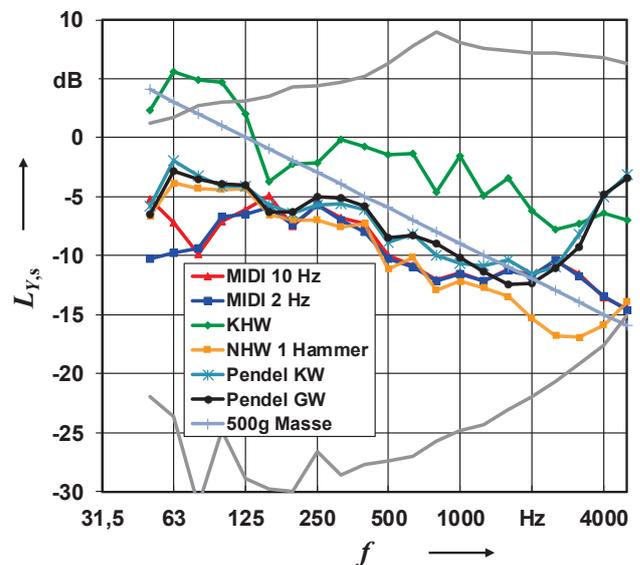


Bild 4: Mobilitäten in dB re 2,5 e-3 m/s/N, vertikale Anregung. Die grauen Linien bezeichnen die Mobilitäten der verwendeten Empfangsplatten.

Horizontale Anregung

Hier werden nur noch das MIDI-Hammerwerk und der Pendelhammer betrachtet, die Normhammerwerke scheiden naturgemäß aus. Bild 5, Bild 6 und Bild 7 zeigen wiederum die ermittelten Quellparameter. Bei den Kurzschlusskräften zeigt sich ein über der Frequenz stark schwankender Verlauf, welcher in den Eigenschaften der verwendeten Empfangsplatte begründet ist. Diese hat zwar eine geringe Leistungskorrektur, ist aber nur schwach bedämpft und weist zudem eine geringe Modendichte auf. Die freien Schnellen zeigen dagegen einen sehr gleichmäßigen Verlauf. Im Gegensatz zur vertikalen Anregung ist der Verlauf der freien Schnellen auch zu deutlich tieferen Frequenzen hin plausibler. Hier wirkt sich die nur punktweise Lagerung der Sperholzplatte positiv aus. Dies zeigt sich letztlich auch bei den resultierenden Mobilitäten. Obwohl die Kurvenverläufe entsprechend schwanken, zeigen sie doch im Frequenzbereich von 80 Hz bis 1000 Hz das zu erwartende Masseverhalten, auch wird im Mittel die Mobilität einer Masse von 500 g deutlich besser abgebildet als bei den Messungen mit vertikaler Anregung.

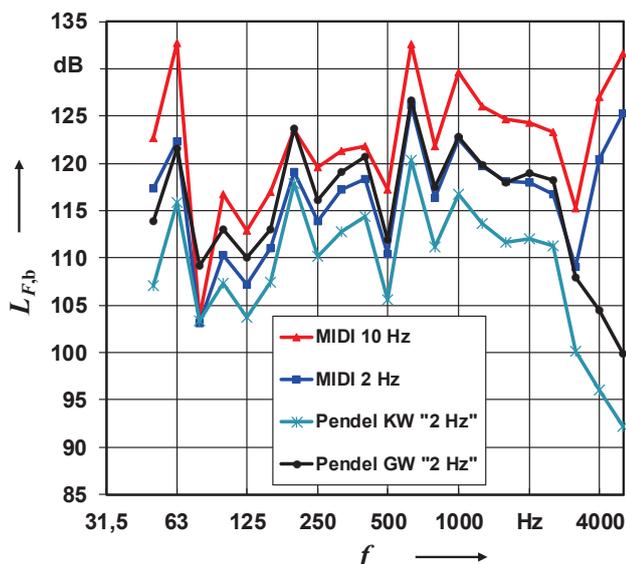


Bild 5: Kurzschlusskräfte in dB re 2e-5 N, horizontale Anregung

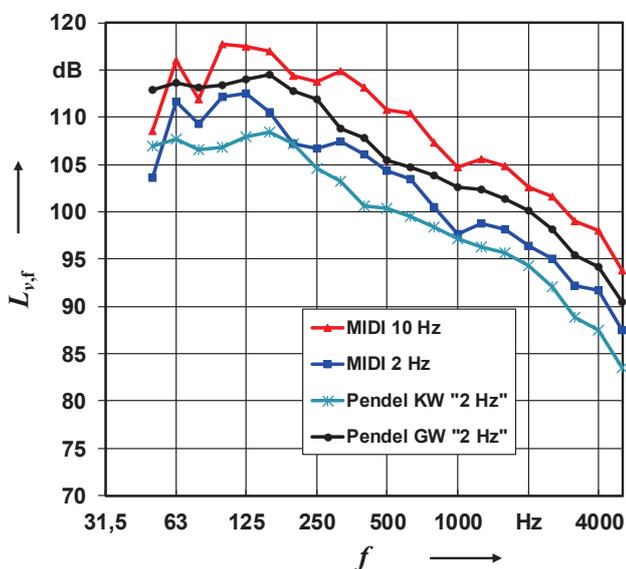


Bild 6: Freie Schnellen in dB re 5e-8 m/s, horizontale Anregung

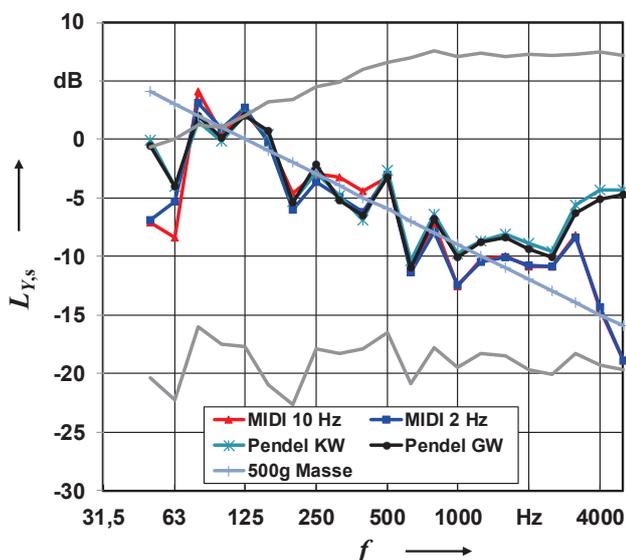


Bild 7: Mobilitäten in dB re 2,5 e-3 m/s/N, horizontale Anregung. Die grauen Linien bezeichnen wiederum die Mobilitäten der verwendeten Empfangsplatten.

Weitere Auswertungen

Vergleich vertikale zu horizontale Anregung

Wie aus den bisher gezeigten Ergebnissen ersichtlich ist, sind die Eigenschaften der verwendeten Empfangsplatten leider nicht immer optimal. Ein direkter Vergleich der Kurzschlusskräfte bzw. freien Schnellen für vertikale und horizontale Anregung ist daher wenig aussagekräftig. Es soll aber zumindest die in Bild 8 dargestellte Differenz der ermittelten Quellmobilitäten betrachtet werden. Es zeigen sich zwar erhebliche Unterschiede zwischen den beiden Betriebsarten, der grundsätzliche Verlauf der Differenzen ist aber für die betrachteten Quellen in einem weiten Bereich sehr ähnlich. Es gibt zunächst keine Anhaltspunkte dafür, dass sich die Mobilität in Abhängigkeit von der Anregungsrichtung wirklich ändert.

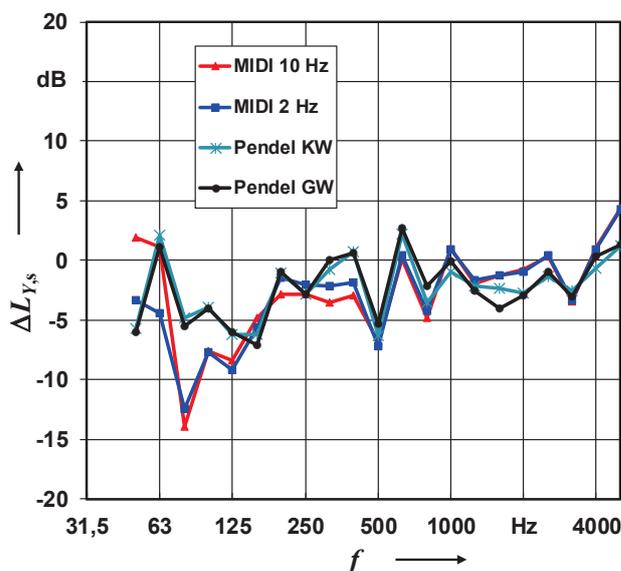


Bild 8: Differenz vertikale-horizontale Anregung der Quellmobilitäten in dB

Umrechnung 2 Hz / 10 Hz Schlagfrequenz

Schlägt ein Hammer mit unterschiedlichen Frequenzen f_1 und f_2 auf eine Empfangsplatte, ergibt sich theoretisch für den Pegelunterschied ΔL

$$\Delta L = 10 \log \left(\frac{f_1}{f_2} \right) \text{ dB} \quad (1).$$

Für $f_1 = 10 \text{ Hz}$ und $f_2 = 2 \text{ Hz}$ ergibt sich also eine Korrektur von 7,0 dB. Wie Bild 9 zeigt, funktioniert die Korrektur für das Normhammerwerk sehr gut, nur bei 50 Hz gibt es eine größere Abweichung. Dies ist auch deshalb bemerkenswert, weil es sich um zwei verschiedene Fabrikate handelt. Für das MIDI-Hammerwerk ergibt derselbe Vergleich ein etwas anderes Ergebnis. Grundsätzlich funktioniert die Korrektur auch, aber im tieffrequenten Bereich ergeben sich doch deutlich stärkere Abweichungen als beim Normhammerwerk, wie in Bild 10 gut zu sehen ist.

Dieses Verhalten scheint zunächst nicht plausibel, zumal es sich ja in beiden Fällen um das selbe Hammerwerk handelt. Aber der Sachverhalt wird klar, wenn man das in Bild 11 dargestellte Schmalbandspektrum der von den Hammerwerken erzeugten Schnellen betrachtet.

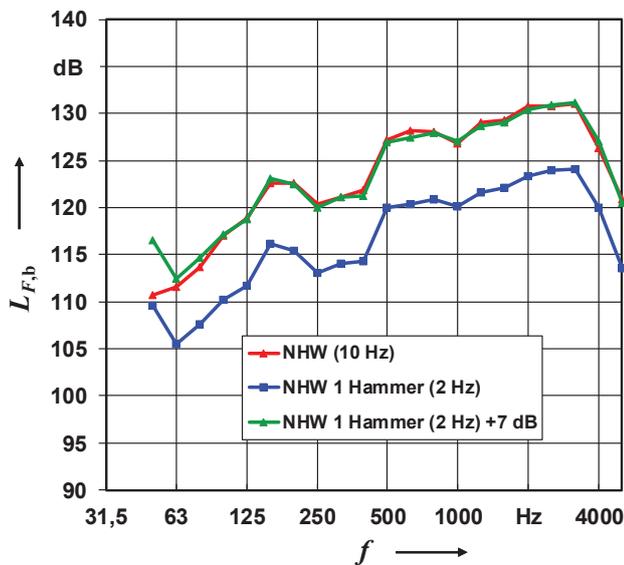


Bild 9: Kurzschlusskräfte des Normhammerwerks und des modifizierten Hammerwerks, vertikale Anregung

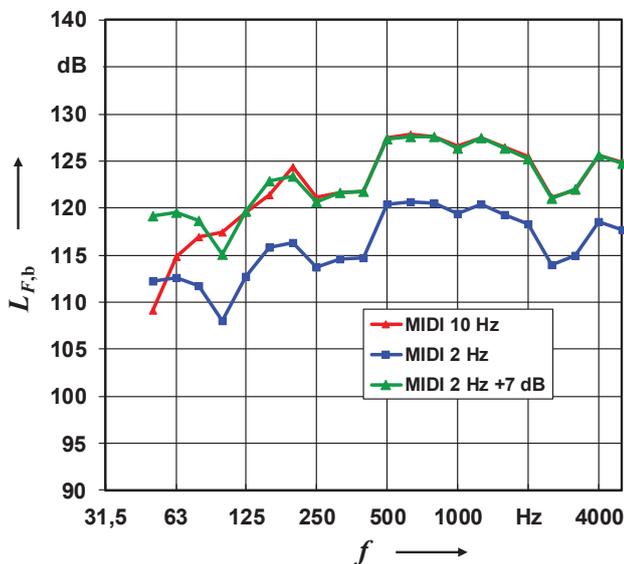


Bild 10: Kurzschlusskräfte des MIDI-Hammerwerks mit 10 Hz und 2 Hz Schlagfrequenz, vertikale Anregung

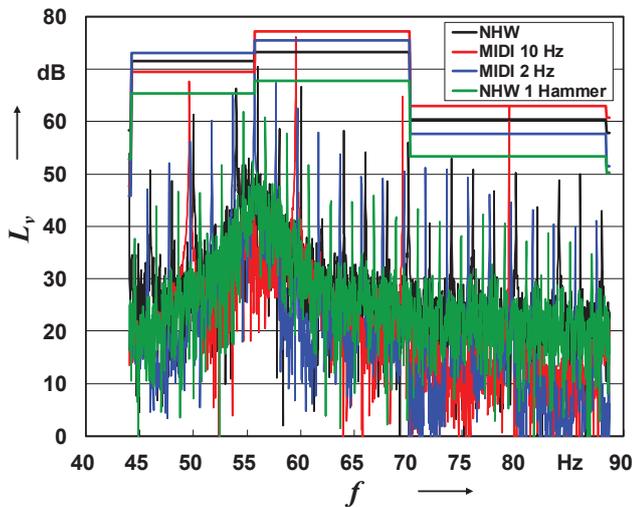


Bild 11: Von den Hammerwerken auf der Betondecke erzeugtes Schmalband- bzw. Terzspektrum. Mittelung über eine Anregeposition und sechs Empfangspositionen.

Tatsächlich erzeugt auch das Normhammerwerk mit fünf Hämmern trotz seiner nominellen Schlagfolge von 10 Hz ein Spektrum mit 2 Hz Linienabstand. Dies ist bereits in der Vergangenheit beobachtet und auch erklärt worden⁴. Das MIDI-Hammerwerk erzeugt hingegen bei 10 Hz Schlagfrequenz auch ein entsprechendes Spektrum mit 10 Hz Linienabstand. Obwohl im vorliegenden Fall eine Schlagfrequenz von 10 Hz zu einem dem Normhammerwerk ähnlicherem Pegel der Kurzschlusskraft führt, muss grundsätzlich gesagt werden, dass eine Schlagfrequenz von 2 Hz physikalisch sinnvoller ist, wenn die Vergleichbarkeit mit dem Normhammerwerk gewährleistet sein soll.

Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass von den qualitativen Quelleigenschaften her sowohl das MIDI-Hammerwerk (mit 2 Hz Schlagfrequenz und 7 dB Korrektur) als auch der Pendelhammer für die horizontale Anregung einer Wand grundsätzlich geeignet sind. Allerdings bleiben noch viele Fragen offen. Für eine quantitative Beschreibung ist das 2-Platten-Verfahren zu ungenau. Für den ungewöhnlichen Verlauf der Kurzschlusskraft des MIDI-Hammerwerks bei hohen Frequenzen gibt es noch keine plausible Erklärung, auch erweist es sich in der Handhabung bei der Anregung einer Wand als etwas problematisch (Gefahr des Verkippens). Die von der Messnorm vorgegebene Schlagfrequenz von 10 Hz generiert kein dem Normhammerwerk qualitativ vergleichbares Spektrum. Vor dem Hintergrund anderer Untersuchungsergebnisse⁵ ist auch zu diskutieren, ob die hohe Spitzenkraft eines Hammerschlages (mehrere kN) zu einer Anregung der (gemauerten) Prüfstandswand im nichtlinearen Bereich führt. Alternativ zu der Anregung mit einem Hammerwerk könnte überlegt werden, mit einem „Leistungsübertragungsmaß“ zu arbeiten. Hierzu könnte man z.B. mit einem Shaker anregen, die eingespeiste Leistung messen und diese dann in Relation zur Schalleistung im Empfangsraum setzen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Stefan Schoenwald und Markus Haselbach (EMPA Dübendorf) sowie bei Martin Schneider (HFT Stuttgart) für die unbürokratische Bereitstellung von Versuchsobjekten.

¹ DIN 7396 „Bauakustische Prüfungen - Prüfverfahren zur akustischen Kennzeichnung von Entkopplungselementen für Massivtreppen“, Juni 2016

² prEN 12354-2 “Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 2: Impact sound insulation between rooms”, Entwurf Januar 2016

³ Fichtel, C., Scheck, J., Kurz, R.: Ein neues Hammerwerk für Geh- und Trittschallmessungen, DAGA 2007, CD-ROM

⁴ Wittstock, V., Stange-Kölling, S.: Eigenschaften des Normhammerwerks, DAGA 2011, CD-ROM

⁵ Stange-Kölling, S., Wittstock, V.: Schallschutz-Vergleichsmessungen in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt 2016, DAGA 2017, CD-ROM