

## Eigenschaften des Normhammerwerks

Volker Wittstock, Sylvia Stange-Kölling

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, volker.wittstock@ptb.de

### Einleitung

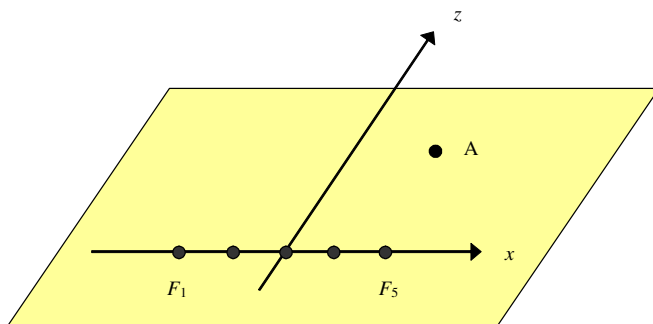
Das Trittschall-Hammerwerk findet als genormte Quelle zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden und von Deckenkonstruktionen Anwendung. Um ein physikalisches Verständnis von der akustischen Wirksamkeit verschiedener Deckenkonstruktionen zu gewinnen, ist eine realistische Modellvorstellung der Anregung erforderlich. Die gängige Betrachtungsweise ist hierbei, die fünf Hämmer des Hammerwerks, die mit jeweils 2 Hz den Boden anregen, als einen Hammer mit 10 Hz Anregungsfrequenz darzustellen [1]. Als Anregungsspektrum ergibt sich daraus ein Linienspektrum mit 10 Hz Linienabstand. Bei Messungen an der PTB hat sich jedoch ein Linienspektrum mit 2 Hz Linienabstand gezeigt [2]. Das Ziel dieses Beitrags ist es, die Ursache dafür zu finden.

### Analytisches Modell

Betrachtet werden fünf auf einer Linie angeordnete Punktkräfte auf einer unendlich großen Platte (Bild 1). Die an einem Aufpunkt A durch alle fünf Punktkräfte erzeugte Schnelle ergibt sich nach [1] aus

$$v_{A,\Sigma} = \frac{1}{Z_0} \sum_{i=1}^5 F_i \Pi(k_B r_i) \quad (1)$$

mit der charakteristischen Plattenimpedanz  $Z_0$ , den Kräften  $F_i$ , den Abständen zwischen Quell- und Aufpunkt  $r_i$ , der Biegewellenzahl  $k_B$  sowie der Übertragungsfunktion  $\Pi$ , die sich aus Hankelfunktionen [1] berechnet.



**Bild 1** Geometriemodell

Die insgesamt in die Platte eingeleitete Leistung ergibt sich durch Integration der Schnelle über einen im Fernfeld liegenden Kreis mit dem Radius  $R$  [1] zu

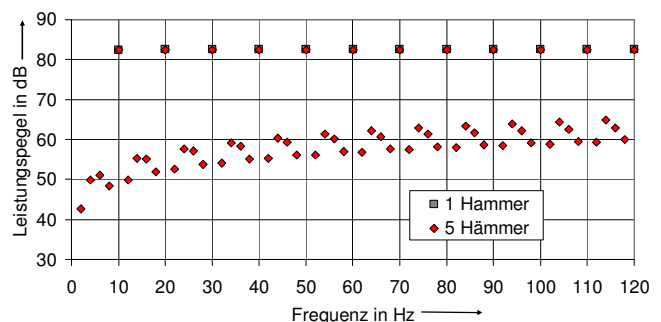
$$P = 2 c_B 2 \pi R \rho h |v_{A,\Sigma}|^2 \quad (2)$$

mit der Plattendichte und -dicke  $\rho$  und  $h$  sowie der Biegewellengeschwindigkeit  $c_B$ .

Die im Folgenden dargestellten Rechnungen wurden für eine Betondecke mit 16 cm Dicke ausgeführt.

### Ideale Hammerwerke

Zunächst wurden die Berechnungen für ideale Hammerwerke ausgeführt, bei denen das Zeitintervall zwischen den Schlägen exakt 100 ms und die Auftreffgeschwindigkeit jedes Hammers genau 886 mm/s beträgt. Werden alle 5 Hämmer an einem Punkt konzentriert, so ergibt sich ein exaktes 10 Hz – Linienspektrum. Werden dagegen die Hämmer in einem Abstand von 10 cm zueinander angeordnet, so ergeben sich aufgrund der Laufzeitunterschiede auch Leistungsanteile bei ganzzahligen Vielfachen von 2 Hz (Bild 2). Diese liegen jedoch bei tiefen Frequenzen um ca. 20 dB unter den ganzzahligen Vielfachen von 2 Hz. Erst bei ca. 1 kHz werden beide Leistungsanteile in etwa gleich groß. Jeweils 5 Linien des mit 5 Hämmern berechneten Spektrums ergeben leistungsmäßig exakt eine Linie des mit einem Hammer berechneten Spektrums. Die Terzleitungsspektren sind daher für beide Quellmodelle identisch. Die Laufzeiteffekte alleine können das beobachtete 2 Hz – Linienspektrum demnach nicht erklären.

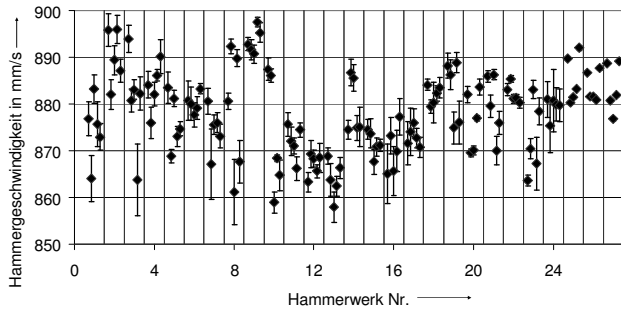


**Bild 2** Berechnete Körperschalleistungspegel, Vergleich zwischen Hammerwerken mit fünf Hämmern à 2 Hz und mit einem Hammer à 10 Hz

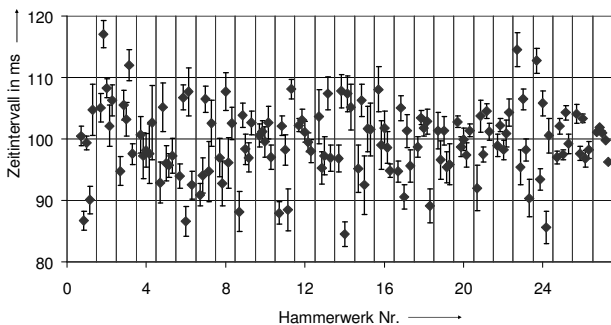
### Reale Hammerwerke

An der PTB wird regelmäßig die Konformität von Hammerwerken mit den Anforderungen der entsprechenden Normen [3] überprüft. Hauptmessgrößen sind dabei die Geschwindigkeit der Hämmer beim Aufprall und der Zeitabstand zwischen aufeinander folgenden Hammerschlägen. Beide Größen werden mit einem Laservibrometer gemessen. Die Hammerwerke liegen üblicherweise gut innerhalb der vorgegebenen Toleranzen von  $\pm 33$  mm/s bzw.  $\pm 10$  ms (Bild 3, Bild 4). Deutlich wird außerdem, dass sich die Fallgeschwindigkeiten und auch die Zeitintervalle einzelner Hämmer des selben Hammerwerks signifikant unterscheiden. Dies bedeutet, dass alle untersuchten Hammerwerke ein Muster in Bezug auf die Schlagstärke und auf den zeitlichen Ablauf aufweisen. Bei den Hammerwerken mit den Nummern 25, 26 und 27 werden die Hämmer über einen gesteuerten Elektromagneten angehoben und fallen gelassen. Diese Hammerwerke zeigen nur sehr geringe

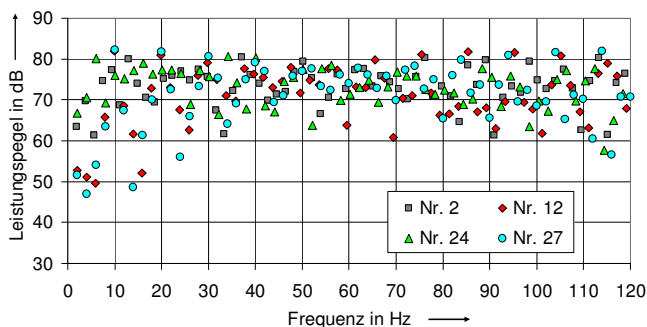
Schwankungen zwischen den Hämmern. Überdies sind die 95%-Vertrauensbereiche sehr klein, da die Werte desselben Hammers wesentlich stabiler sind, als bei den mechanisch angetriebenen Hammerwerken.



**Bild 3** Auftreffgeschwindigkeit der einzelnen Hämmer von 27 verschiedenen realen Hammerwerken und zugehörige 95%-Vertrauensbereiche



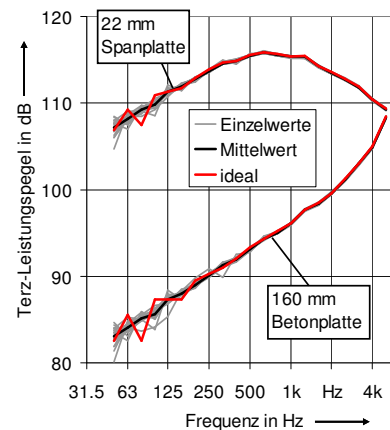
**Bild 4** Zeitintervall zwischen den einzelnen Hammerschlägen bei 27 verschiedenen realen Hammerwerken und zugehörige 95%-Vertrauensbereiche



**Bild 5** Berechnete Körperschalleistungspegel, vier verschiedene reale Hammerwerke

Aus den gemessenen Eigenschaften der realen Hammerwerke können die Quelleigenschaften für das verwendete Rechenmodell ermittelt werden. Dies erfolgt über eine Modifikation der Amplitude und der Phasenlage der 5 Kräfte. Werden diese Werte verwendet, um die in eine Platte eingeleitete Körperschalleistung zu berechnen, so ergeben sich Linienspektren mit ganzzahligen Vielfachen von ungefähr 2 Hz (Bild 5). Selbst bei dem sehr gleichmäßig laufenden Hammerwerk mit der Nummer 27 (vgl. Bild 4, Bild 5) liegt ab ca. 40 Hz keine Dominanz der ganzzahligen Vielfachen von 10 Hz mehr vor. Damit ist die Ursache für das 2 Hz - Linienspektrum gefunden.

Eine weitere interessante Frage ist, wie sich dies auf die eingeleiteten Terz-Leistungspegel auswirkt. Es zeigt sich, dass alle in die Untersuchung einbezogenen Hammerwerke sehr ähnliche Resultate liefern (Bild 6). Die Standardabweichung der Terzleistungspegel beträgt 1 dB bei 50 Hz und fällt von dort mit der Frequenz stark ab. Dies gilt sowohl für die 22 mm dicke Spanplatte, als auch für die 160 mm dicke Betonplatte. Außerdem ist in Bild 6 der Terzleistungspegel dargestellt, der sich aus der Annahme eines idealen Hammerwerks ergibt. Der zugehörige Terz-Leistungspegel entspricht recht genau dem Mittelwert über alle 27 betrachteten realen Hammerwerke. Der Einbruch bei 80 Hz wird dadurch verursacht, dass in dieser Terz nur ein ganzzahliges Vielfaches von 10 Hz liegt. Ein solcher Einbruch ist bei keinem der realen Hammerwerke zu beobachten.



**Bild 6** Berechnete Körperschalleistungspegel in Terzen, 27 verschiedene reale Hammerwerke, zugehöriger Mittelwert sowie ideales Hammerwerk

### Zusammenfassung

Reale Hammerwerke emittieren ein 2 Hz - Linienspektrum. Wesentliche Ursachen sind Laufzeiteffekte und die Ausbildung von individuellen Schlagmustern in Bezug auf die zeitliche Abfolge und Stärke der Hammerschläge. Verstärkt wird dies noch dadurch, dass die Hämmer eines Hammerwerks auf endlichen Platten auf unterschiedliche Eingangsimpedanzen einwirken. Bei hohen Frequenzen kommt es wegen der Linienbreite von ca. 1% zur Ausbildung eines Breitbandspektrums. Für die emittierten Terz-Leistungsspektren spielt die spektrale Feinstruktur eine nur untergeordnete Rolle.

### Literatur

- [1] L. Cremer, M. Heckl, B.A.T. Petersson: *Körperschall. Physikalische Grundlagen und Technische Anwendungen*. Springer, Berlin / Heidelberg / New York, 2007
- [2] V. Wittstock, W. Scholl: *Berücksichtigung von Unsicherheiten beim Trittschall in der neuen DIN 4109*. Abschlussbericht zum gleichnamigen DIBt-Projekt, Braunschweig, März, 2010
- [3] DIN EN ISO 10140-5 *Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen*. Dezember 2010