

Berechnung der installierten Körperschalleistung im Holzrahmenbau

Katja Betz, Fabian Schöpfer, Andreas R. Mayr, Ulrich Schanda

Labor für Schallmesstechnik, Hochschule Rosenheim, 83024 Rosenheim, Deutschland, Email: katjabetz@gmx.de

Einleitung

Zur Prognose der von haustechnischen Anlagen ausgehenden Körperschallübertragung ist als Eingangsgröße die installierte Körperschalleistung erforderlich. Für den Massivbau wurde hierfür ein Ingenieurverfahren, die sogenannte Empfangsplattenmethode entwickelt. Dieses Verfahren ist allerdings nur dann direkt anwendbar, wenn die Empfangsstrukturen eine im Vergleich zur Körperschallquelle deutlich kleinere Anregbarkeit aufweisen. Im Holzrahmenbau ist oft das Gegenteil der Fall. Zudem weisen Leichtbaustrukturen durch die versteifende Rahmenbauweise örtlich stark variierende Eigenschaften in Bezug auf die Anregbarkeit auf. Aus diesen Gründen müssen für die Berechnung der installierten Körperschalleistung im Holzrahmenbau die Eigenschaften der Quelle und der Struktur für alle Kontaktpunkte bekannt sein. Zudem sind sämtliche Interaktionen zwischen den Kontaktpunkten zu berücksichtigen. Im Rahmen der vorgestellten Arbeit wurde hierfür eine Referenzquelle mit vier Kontaktpunkten entwickelt und messtechnisch vollständig erfasst. Ebenso wurden die Struktureigenschaften einer Holzrahmenbauwand an den jeweiligen Befestigungspunkten messtechnisch bestimmt. Aus diesen Größen konnte die installierte Körperschalleistung exakt berechnet werden. Mögliche Vereinfachungen dieser Berechnungen wurden systematisch untersucht und mit den exakten Werten verglichen. Hierfür wurde der resultierende Schalldruckpegel in einem Empfangsraum herangezogen. Dieser wurde mittels empirischer Übertragungsfunktionen zwischen installierter Körperschalleistung und Schalldruck bestimmt. Die Ergebnisse dieser Arbeit werden sowohl für eine Laborsituation als auch für eine Bausituation diskutiert.

Referenz-Körperschallquelle

Die Referenzquelle (Siehe Abbildung 1) dient als vereinfachtes Modell für eine haustechnische Anlage mit mehreren Kontaktpunkten zur Struktur. Durch die Verwendung einer Referenzquelle kann die Signalstärke sowie die spektrale Zusammensetzung des Anregesignals kontrolliert gesteuert werden. Zudem ist der Betrieb im Gegensatz zu realen haustechnischen Anlagen wesentlich einfacher da die Versorgung mit Brennstoffen oder Wasser sowie die Entsorgung von Abgasen oder Abwasser entfällt. Die Referenzquelle wurde als Rahmenkonstruktion bestehend aus Metallprofilen eines Sanitärvorwandsystems mit vier Kontaktpunkten zur Empfangsstruktur erstellt. Diese Befestigungspunkte wurden im Abstand von 62,5 cm angeordnet. Somit kann die Quelle im üblichen Rastermaß einer Rahmenkonstruktion mit allen vier Kontakten auf Wandriegeln befestigt werden. Innerhalb der Rahmenkonstruktion wur-

de ein Inertialshaker zur Anregung verbaut. Für gleichbleibende Betriebsbedingungen wurde ein Referenzsignal als wav-Datei erzeugt und mit der gleicher Hardware (Soundkarte und Verstärker) sowie Einstellungen an der Hardware für alle Messungen angesteuert.



Abbildung 1: Referenzkörperschallquelle

Betrachtete Empfangsstrukturen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Körperschalleitung sowohl für eine idealisierte Konstruktion im Labor als auch an einer realen Konstruktion im Gebäude untersucht.

Die Labormessungen wurden an einem Holzrahmenbauprüfstand im Labor für Schallmesstechnik an der Hochschule Rosenheim durchgeführt. Dieser besteht aus einem T-Stoß zwischen Holzrahmenbauwänden und einer Holzbalkendecke (Siehe Abbildung 2). Die Rahmenkonstruktion der Wände ist beidseitig, die Holzbalkendecke nur auf der Oberseite einlagig mit 19 mm dicken Spanplatten beplankt. In den Wandhohlräumen wurde kein Dämmstoff eingebracht.

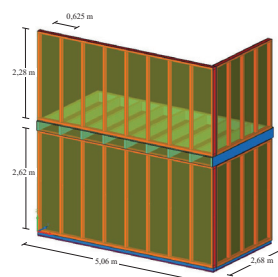


Abbildung 2: Konfiguration des Leichtbauprüfstandes

In der betrachteten Gebäudesituation liegt eine getrennte Rahmenkonstruktion der Wände vor (Haustrennwand). Raumseitig wurden die Wände hier zweilagig mit 12,5 mm starken Gipskartonplatten beplankt, in der Haustrennfuge wurden Gipsfaserplatten auf die Rahmenkonstruktion geschraubt. Die Wandhohlräume waren mit Faserdämmstoff gefüllt.

Übertragung

Da die eingebrachte Leistung an den Kontaktpunkten der Referenzquelle nicht direkt gemessen werden konnte und die Zielgröße in der Planung der resultierende Schalldruck ist, wurde dieser als Vergleichsgröße herangezogen. Als Referenz wurde somit beim Betrieb der Quelle der Schalldruckpegel in einem diagonal unter der angeregten Wand liegenden Empfangsraum gemessen. Aus der berechneten installierten Leistung wurde der Schalldruckpegel unter Verwendung von gemessenen Übertragungsfunktionen in der jeweiligen Situation [1] ermittelt. Da die betrachteten Rahmenstrukturen einen sehr inhomogenen Aufbau aufweisen, wurden folgende Möglichkeiten der Übertragung in Betracht gezogen:

- Alle vier Befestigungspunkte auf der Rahmenkonstruktion der Wand (Labor- und Bausituation).
- Alle vier Befestigungspunkte in Gefachen der Wand (Labor- und Bausituation).
- Zwei Befestigungspunkte auf der Rahmenkonstruktion und zwei im Gefach (nur in der Laborsituation).

Berechnung der inst. Schalleistung

Sofern nur ein Kontaktpunkt betrachtet wird, kann die durch eine Quelle eingebrachte Leistung an einer Struktur durch folgende Gleichung bestimmt werden [2]:

$$P = \frac{|\bar{v}_{sf}|^2}{|\bar{Y}_S + \bar{Y}_R|^2} \cdot \operatorname{Re}\{\bar{Y}_R\} \quad (1)$$

Dabei ist \bar{v}_{sf} der Effektivwert der freien Schnelle der Quelle und \bar{Y}_S bzw. \bar{Y}_R die komplexe Admittanz der Quelle (Index S) bzw. des Empfängers (Index R).

Da reale Körperschallquellen meist mehr als einen Kontaktpunkt aufweisen, kann die eingebrachte Leistung durch das Verhalten der Punkte untereinander beeinflusst werden. Für die vorliegende Referenzquelle mit vier Kontaktpunkten ist deshalb eine vollständige Charakterisierung der Quelle durch die messtechnische Erfassung der freien Schnelle sowie der Admittanz von der Quelle und der Struktur inklusive aller Transferterme zwischen den Kontaktpunkten notwendig. Auf der Grundlage dieser Eingangsgrößen kann die übertragene Körperschalleistung wie folgt berechnet werden [3].

$$\bar{W} = \bar{v}_{sf}^{*T} [\bar{Y}_S + \bar{Y}_R]^{*T-1} [\bar{Y}_R] [\bar{Y}_S + \bar{Y}_R]^{-1} \bar{v}_{sf} \quad (2)$$

Berechnung des res. Schalldruckpegels

Der Schalldruckpegel im Empfangsraum wird anhand des berechneten Schalleistungspegels L_W und der Übertragungsfunktion H in der jeweiligen Situation ermittelt (Siehe auch [1] und [4]).

$$L_p = H + L_W \quad (3)$$

Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden alle relevanten Größen der Quelle als auch der Empfangsstruktur erfasst, um die installierte Körperschalleistung nach Gleichung 2 berechnen zu können.

Punkt- und Transferadmittanzen:

Es wurden sowohl Punkt- als auch Transferadmittanzen an den vier Befestigungspunkten der Referenzquelle und an der Struktur mit einem Modalhammer und Beschleunigungssensoren gemessen. Bei der Ermittlung der Quelladmittanz wurde die Referenzquelle mit einer sehr tief abgestimmten Lagerfrequenz aufgehängt. An der Struktur wurden die Punkt- und Transferadmittanzen für alle drei beschriebenen Übertragungspositionen gemessen. In Abbildung 3 ist der Betrag der Punktadmittanz beispielhaft für einen Kontaktpunkt der Quelle und der Struktur (Gefach und Ständer) dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Quell- und Strukturadmittanz in weiten Teilen in der selben Größenordnung liegen.

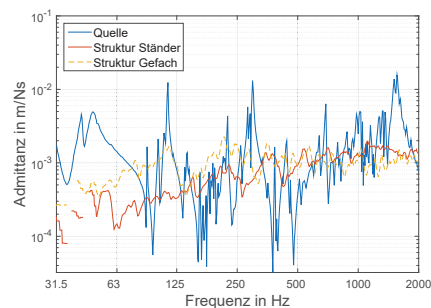


Abbildung 3: Betrag der Punktadmittanz von Struktur und Quelle (Negative Realteile verworfen)

Freie Schnelle:

Zur Ermittlung der freien Schnelle wurde die Referenzquelle ebenfalls frei gelagert und der Inertialshaker mit dem beschriebenen Signal betrieben. Dabei wurde die Schwingschnelle an den vier Kontaktpunkten gemessen.

Schalldruckpegel:

Zur späteren Überprüfung der berechneten Schalldruckpegel wurde für alle drei Übertragungspositionen der resultierende Schalldruckpegel im diagonal unter der angeregten Wand liegenden Empfangsraum gemessen. Dazu wurde auf die an der Struktur befestigte Quelle, dasselbe Signal gegeben, wie bereits bei der Messung der freien Schnelle. Im Empfangsraum wurden die selben Mikrofonpositionen wie bei der Bestimmung des Übertragungsmaßes verwendet, um Messunsicherheiten vor allem bei tiefen Frequenzen gering zu halten.

Ergebnisse der Untersuchungen

Die installierte Leistung wurde mit den Datensätzen der Quelle, der Struktur und der Freien Schnelle nach Gleichung 1 (für eine separate Betrachtung der Anregepunkte), beziehungsweise nach Gleichung 2 (unter Berücksichtigung aller Interaktionen zwischen den Kontaktpunkten) berechnet. Bevor anhand dieser installierten Leistung sowohl der Schalleistungspegel

als auch der Schalldruckpegel bestimmt werden konnte, wurden im Labor folgende Vereinfachungsschritte untersucht, wobei bei allen Varianten die Transferterme der Admittanzen nicht berücksichtigt wurden.

Variante 1: Punktadmittanzen einzeln

Die übertragene Leistung wurde nur anhand der Punktadmittanzen nach Gleichung 1 für jeden Punkt separat berechnet. Die gesamte installierte Leistung wurde durch die Summe der einzelnen Punkte bestimmt.

Variante 2: Mittelwert Punktadmittanzen

Sowohl für die Quelle als auch für die Struktur wurden die Punktadmittanzen als auch die freien Schnellen gemittelt. Die übertragene Leistung wurde dann für einen Punkt mit den Mittelwerten berechnet und mit der Anzahl der Befestigungspunkte multipliziert.

Variante 3: Punktadmittanz unendl. Platte

Die Admittanz der Struktur wurde als unendliche Platte mit einem für den Leichtbau typischen Wert von $10^{-3} \frac{m}{N_s}$ approximiert. Mit diesem Wert wurde die Leistung nach Gleichung 2 unter Verwendung der gemessenen Punktadmittanzen der Quelle berechnet.

Für die Bausituation wurde nur die Vereinfachungsvariante 2 durchgeführt. In den Abbildungen 5 bis 13 werden für verschiedene Übertragungspositionen im Labor und in der Bausituation die entsprechenden berechneten Schalldruckpegel im Vergleich zum Gemessenen betrachtet. Lücken in den Datensätzen sind durch das Verwerfen von negativen Realteilen der gemessenen Punktadmittanzen begründet.

Labormessungen:

Die untersuchten Vereinfachungen bei der Berechnung der installierten Leistung zeigen im Vergleich zur exakten Berechnung nur sehr geringe Abweichungen. So stellt sich im Vergleich der prognostizierten Schalldruckpegel für alle Berechnungsvarianten eine ähnliche Abweichung zum gemessenen Schalldruckpegel ein. Diese weist bei tiefen Frequenzen eine leichte Überschätzung, bei hohen Frequenzen eine Unterschätzung auf. Die Abweichung liegt allerdings weitgehend im Bereich von ± 5 dB mit einzelnen Ausreißern von etwa ± 10 dB.

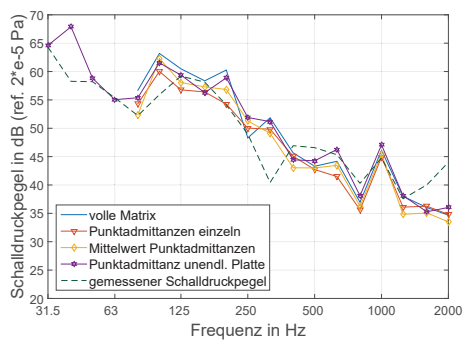


Abbildung 4: Labormessung: Alle vier Befestigungspunkte auf der Rahmenkonstruktion der Wand: Berechnungen des Schalldruckpegels mit 1. voll ausgefüllten Admittanzmatrizen, 2. Punktadmittanzen, 3. Mittelwert der Punktadmittanzen, 4. einheitlichem Wert für die Strukturadmittanz und 5. gemessener Schalldruckpegel im Empfangsraum

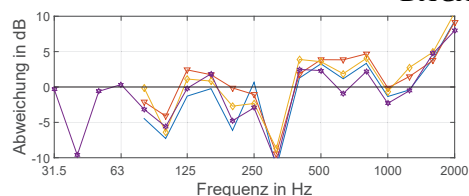


Abbildung 5: Abweichungen der berechneten Schalldruckpegel zum Gemessenen aus Abbildung 4

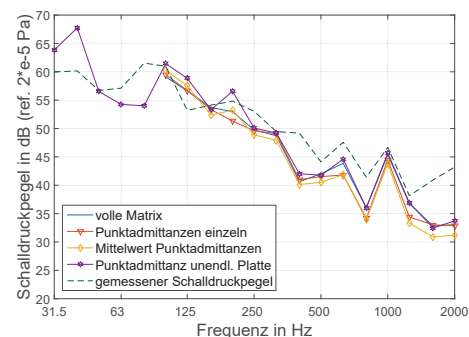


Abbildung 6: Labormessung: Alle vier Befestigungspunkte in Gefachen der Wand: Berechnungen des Schalldruckpegels mit 1. voll ausgefüllten Admittanzmatrizen, 2. Punktadmittanzen, 3. Mittelwert der Punktadmittanzen, 4. einheitlichem Wert für die Strukturadmittanz und 5. gemessener Schalldruckpegel im Empfangsraum

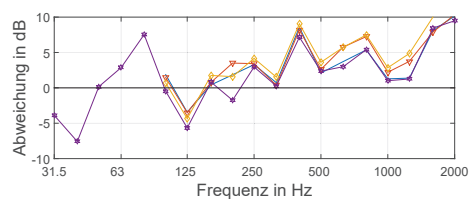


Abbildung 7: Abweichungen der berechneten Schalldruckpegel zum Gemessenen aus Abbildung 6

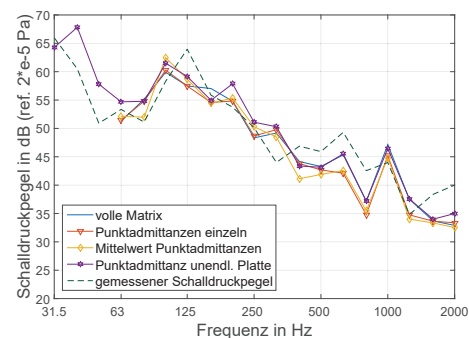


Abbildung 8: Labormessung: Zwei Befestigungspunkte auf der Rahmenkonstruktion und zwei im Gefach: Berechnungen des Schalldruckpegels mit 1. voll ausgefüllten Admittanzmatrizen, 2. Punktadmittanzen, 3. Mittelwert der Punktadmittanzen, 4. einheitlichem Wert für die Strukturadmittanz und 5. gemessener Schalldruckpegel im Empfangsraum

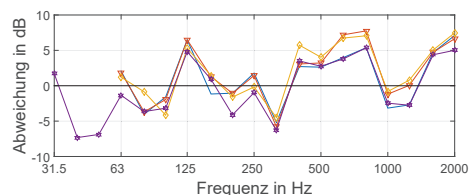


Abbildung 9: Abweichungen der berechneten Schalldruckpegel zum Gemessenen aus Abbildung 8

Baumessungen:

In der Bausituation wurde nur eine Berechnungsvariante durchgeführt. Die Erkenntnisse der Laboruntersuchungen zeigen allerdings, dass die Prognose des resultierenden Schalldruckpegels für verschiedene Vereinfachungsvarianten relativ ähnlich ist. Die vereinfachte Prognoserechnung in der Bausituation zeigt eine ähnliche Charakteristik wie die Abweichungen in der Laborsituation. Bei tiefen Frequenzen liegt eine Überschätzung vor, bei hohen eine Unterschätzung. Im mittleren Frequenzbereich liegen die Abweichungen sogar unter ± 3 dB.

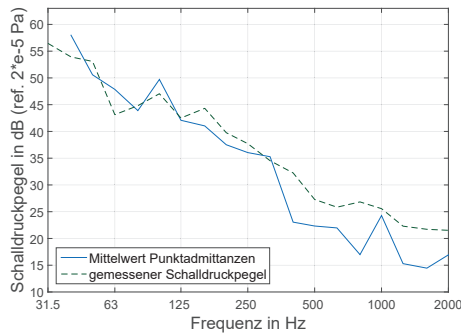


Abbildung 10: Baumessung: Alle vier Befestigungspunkte auf der Rahmenkonstruktion der Wand: 1. Berechnung des Schalldruckpegels mit Mittelwert der Punktdmittanzen und 2. gemessener Schalldruckpegel im Empfangsraum

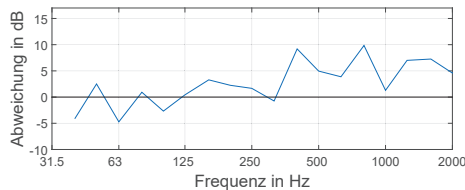


Abbildung 11: Abweichung des berechneten Schalldruckpegels zum Gemessenen aus Abbildung 10

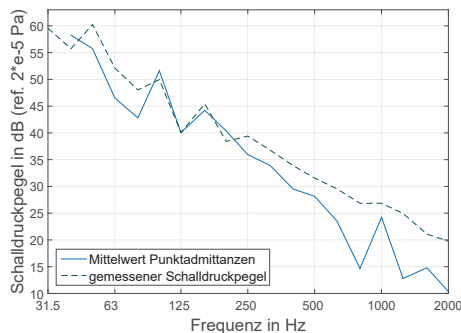


Abbildung 12: Baumessung: Alle vier Befestigungspunkte in Gefachen der Wand: 1. Berechnung des Schalldruckpegels mit Mittelwert der Punktdmittanzen und 2. gemessener Schalldruckpegel im Empfangsraum

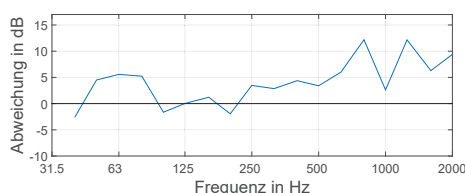


Abbildung 13: Abweichung des berechneten Schalldruckpegels zum Gemessenen aus Abbildung 12

Zusammenfassung

Die dargestellten Abweichungen zwischen Prognose und Messung des resultierenden Schalldruckpegels können möglicherweise auf folgende Ursachen zurückgeführt werden. Die Mikrofonpositionen waren sowohl bei der Bestimmung der Übertragungsfunktion als auch bei der Messung mit der Referenzquelle gleich. Dennoch ist eine gewisse Messunsicherheit vor allem bei tiefen Frequenzen nicht auszuschließen. Die Übertragungsfunktion wurde durch eine Punktanregung für mehrere Anregepunkte gemessen und abschließend gemittelt. Treten allerdings Interaktionen zwischen Kontaktpunkten bei mehreren Punkten auf, sind diese in der Übertragungsfunktion nicht enthalten. Aufgrund der Mittelung ist mit einer Streuung von ± 3 dB zu rechnen [1]. Wegen der messtechnischen Schwierigkeiten wurde eine Anregung durch Momente in den gezeigten Untersuchungen bisher vernachlässigt. Sofern eine Anregung durch Momente stattfindet wird sie in der Prognose nicht berücksichtigt. Dies würde möglicherweise die Unterschätzung der Berechnung bei hohen Frequenzen erklären. Trotz der starken Vereinfachungen zeigt sich dennoch sowohl im Labor als auch in der Bausituation eine vertretbare Abweichung zwischen Prognose und Messung des resultierenden Schalldruckpegels.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde im Rahmen des Projektes *Nachhaltiger Schallschutz gebäudetechnischer Anlagen in energetisch optimierten Gebäuden*, gefördert durch das BMBF im Rahmen der Förderlinie FHPProfUnt erarbeitet. Die Autoren bedanken sich zudem bei der Firma Regnauer für die Zusammenarbeit beim Bau des Prüfstandes sowie bei der Durchführung der Baumessung als auch bei der Firma Müller-BBM Vibroakustiksysteme für die Unterstützung in der Messtechnik.

Literatur

- [1] Schöpfer, F.; Hopkins, C.; Mayr, A. R.; Schanda, U.: Measured transmission functions from structure-borne sound sources in a timber-frame construction. Euronoise. Maastricht, Netherlands. 2015
- [2] Mondot J. M., Petersson B. A. T.: Characterization of structure-borne sound sources: The source descriptor and the coupling function", J. Sound and Vibration, Vol. 114(3), 1987, p. 507-518.
- [3] Yap S. H. (1988): The role of moments and forces in structure-borne sound emission from machines in buildings", PhD Thesis of The University of Liverpool.
- [4] Arnold, J.; Kornadt, O.: Beschreibung Körperschall-induzierter Schalldruckpegel mit Hilfe von Übertragungsfunktionen. Bauphysik Kalender 2014. Wiley-VCH Verlag GmbH, S. 641–663.