

Untersuchungen zur Ausweitung des Verfahrens zur Ermittlung der charakteristischen Körperschalleistung haustechnischer Anlagen mittels Empfangsplatten gemäß DIN EN 15657:2017-10 auf Anregungen in Plattenebene

Michael Hoßfeld¹, Fabian Schöpfer¹, Andreas R. Mayr¹, Ulrich Schanda¹

¹ Labor für Schallmesstechnik, Technische Hochschule Rosenheim, E-Mail: Michael.Hossfeld@th-rosenheim.de

Einleitung

Die aktuelle Fassung der DIN 4109-1:2018-01 [1] definiert Mindestanforderungen für den maximalen A-bewerteten Norm-Schalldruckpegel $L_{AF,max,n}$ in schutzbedürftigen Räumen, der durch gebäudetechnische Geräte erzeugt wird.

Um bereits in der Planungsphase den von gebäudetechnischen Anlagen verursachten Schalldruckpegel in schutzbedürftigen Räumen in Gebäuden vorhersagen zu können, wird dazu in der DIN EN 12354-5:2009-10 [2] ein Prognosemodell bereitgestellt. Als Eingangsdaten für dieses Berechnungsverfahren fließt unter anderem die charakteristische Körperschalleistung, P_{sn} , dieser Anlagen mit ein, wobei dazu in der DIN EN 15657:2017-10 [3] ein Verfahren mit Empfangsplatten zur Quellencharakterisierung zur Verfügung gestellt wird.

In der Baupraxis werden oftmals gebäudetechnische Anlagen nicht auf, sondern in der Gebäudestruktur montiert. Ein typisches Beispiel hierfür können Einbauventilatoren oder in der Fensterlaibung montierte Rolllädenkästen sein. Dabei stellt sich die Frage, ob eine stirnseitige, also *inplane* Einleitung von Körperschallenergie in die Struktur maßgeblich ist. Bei einer Montage auf der Gebäudestruktur wird von einer maßgeblichen Anregung senkrecht zur Plattenebene (*ou-of-plane*) ausgegangen. Im Rosenheimer Technologiezentrum Energie & Gebäude (roteg) an der Technischen Hochschule Rosenheim wurde hierfür ein Empfangsplattenprüfstand aufgebaut, jedoch mit von der obigen genannten Norm [3] abweichenden Geometrien. Die in einer der beiden vertikalen Empfangsplatten vorhandene Fensteröffnung ermöglicht es, Geräte, die in der Regel in Fensterlaibungen montiert werden, unter bauüblichen Bedingungen zu befestigen und zu betreiben (Abbildung 1).

Um eine mögliche Ausweitung des Verfahrens zur Ermittlung der charakteristischen Körperschalleistung gebäudetechnischer Anlagen bei Anregung in Plattenebene durchführen zu können, wurden hierfür Voruntersuchungen bewältigt. Dabei wurde die Eingangsadmittanz bei *out-of-plane* und *inplane* Anregung genauer betrachtet sowie ein Leistungsvergleich bei *inplane* Anregung durchgeführt.

Empfangsplattenverfahren

Bei dem in der DIN EN 15657:2017-10 [3] beschriebenen Empfangsplattenverfahren handelt es sich um ein indirektes Messverfahren, da die Körperschalleistung nicht

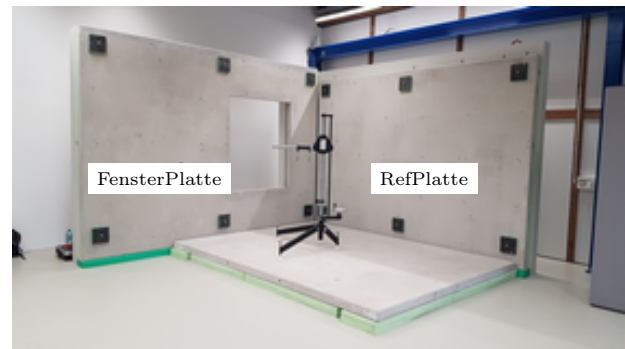


Abbildung 1: Empfangsplattenprüfstand im Rosenheimer Technologiezentrum Energie & Gebäude (roteg) an der Technischen Hochschule Rosenheim. Platte mit Fensteröffnung wird als *Fensterplatte* und die zweite vertikale Platte als *Ref-Platte* bezeichnet

direkt am Gerät, sondern über die Energie der Empfangsplatten ermittelt wird. Dabei wird die zu charakterisierende Körperschallquelle bauüblich an den Empfangsplattenprüfstand montiert und betrieben. Parallel wird die räumlich gemittelte Schnelle, \tilde{v}_i^2 , aus N Beschleunigungssensoren auf der Platte messtechnisch erfasst. Unter Berücksichtigung des Verlustfaktors, η , sowie der Masse der Platte, m , ergibt sich die eingebrachte Körperschalleistung der zu betrachtenden Quelle unter Bezug auf die Eigenkreisfrequenz, ω , nach Gleichung (1)

$$P_s = m \cdot \eta \cdot \omega \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \tilde{v}_i^2 \quad (1)$$

Der Verlustfaktor wird dabei aus der Messung der Körperschall-Nachhallzeiten bestimmt.

Die charakteristische Körperschalleistung wird nach Gleichung (2) berechnet. Dabei wird die auf der Empfangsplatte gemessene Körperschalleistung, P_s , durch das Verhältnis der charakteristischen Admittanz einer unendlich großen Platte, $Y_{R,\infty,low}$, und der äquivalenten Eingangsadmittanz, $Y_{R,low,eq}$, (Mittelwert aller Kontaktpunkte einer Quelle) korrigiert.

$$P_{sn} = P_s \cdot \frac{Y_{R,\infty,low}}{\text{Re}(Y_{R,low,eq})} \quad (2)$$

In der DIN EN 15657:2017-10 [3] wird für die charakteristische Admittanz einer 10 cm dicken, unendlich großen Platte der Wert $Y_{R,\infty,low} = 5 \cdot 10^{-6} (\text{m/s})/N$ angegeben.

Die Admittanz der Empfangsplatte ist dabei im Vergleich zur Admittanz der zu charakterisierenden Quelle wesentlich kleiner, was mit dem Index *low* beschrieben wird.

Durch die so ermittelte charakteristische Körperschalleistung gebäudetechnischer Geräte wird ein Vergleich von Geräten gleichen Typs untereinander ermöglicht, da die Eigenschaften der Empfangsplatte sowie der konkreten Ankopplungspunkte durch Gleichung (2) herausgerechnet werden.

Umgekehrt kann die installierte Körperschalleistung P_{inst} durch den Bezug auf die Admittanzen einer konkreten Einbausituation am Bau bestimmt werden. Diese dient dann als Eingangsgröße für Prognosemodelle, wie zum Beispiel der DIN EN 12354-5:2009-10 [2].

Admittanz

Die Admittanz beschreibt im Allgemeinen die Anregbarkeit eines Körpers. Dabei kann bei Punktanregung die Eingangsadmittanz für einfache homogene Strukturen theoretisch bestimmt werden. Die charakteristische Admittanz einer *out-of-plane* angeregten, unendlich großen Platte wird nach Gleichung (3) berechnet, wobei sich diese aus der Biegesteifigkeit, B , der Dichte, ρ , und der Dicke, d , der Empfangsplatte ergibt [4]. Dabei handelt es sich um einen frequenzunabhängigen reellen Wert. Der Index *oop* steht für *out-of-plane* Anregung.

$$Y_{\infty,oop} = \frac{1}{(8 \cdot \sqrt{\rho \cdot d \cdot B})} \quad (3)$$

Messtechnisch wird die komplexe Eingangsadmittanz, $Y_{R,eq}$, über das Verhältnis der komplexen, resultierenden Schwingschnelle und der aufgebrachten komplexen Kraft am Krafteinleitungspunkt gebildet (Gleichung(4)).

$$Y_{R,eq} = \frac{v}{F} \quad (4)$$

Auf der *RefPlatte* (siehe Abbildung 1) wurde an vier Punkten die *out-of-plane* Eingangsadmittanz messtechnisch ermittelt und daraus resultierend eine äquivalente Admittanz $Y_{R,eq,oop}$ gebildet. In Abbildung 2 ist diese im Vergleich mit $Y_{\infty,oop}$ aufgetragen und weist vor allem bei mittleren und hohen Frequenzen eine gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Verlauf für eine unendliche Platte auf.

Der theoretischen Verlauf der Eingangsadmittanz $Y_{\infty,ip}$ bei *inplane* Anregung kann nach Gleichung (5) berechnet werden [5]. Dabei wird für die Berechnung das Schubmodul, G , die longitudinale Steife, D , die Dicke, d , der Platte, die longitudinale Wellenzahl, k_L , und die Wellenzahl der Transversalwellen, k_T , berücksichtigt.

$$Y_{\infty,ip} = \frac{\omega}{8dD} \left[1 - i \frac{2}{\pi} \ln \frac{k_L e}{2} \right] + \frac{\omega}{8dG} \left[1 - i \frac{2}{\pi} \ln \frac{k_T e}{2} \right] \quad (5)$$

Für den Vergleich mit dem theoretischen Verlauf der Admittanz $Y_{\infty,ip}$ wurde wieder die *inplane* Eingangsadmittanz an fünf Positionen stirnseitig an der *RefPlatte* messtechnisch ermittelt und daraus eine resultierende äquivalente Admittanz $Y_{R,eq,ip}$ gebildet.

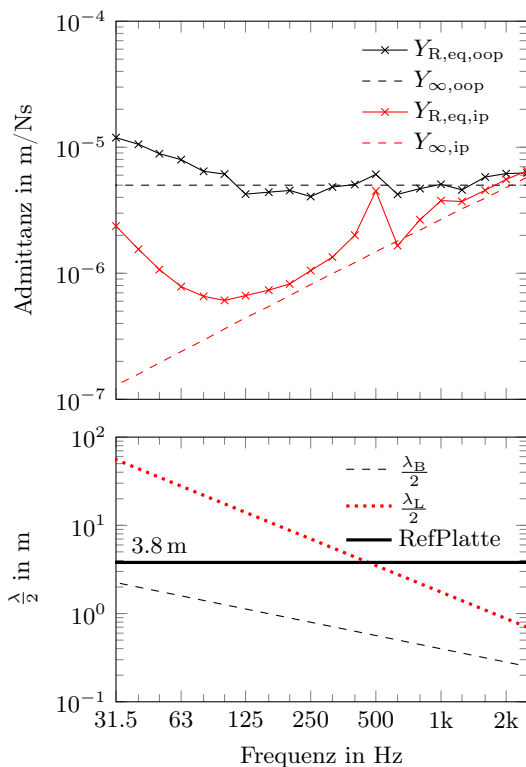


Abbildung 2: Oben (1): Äquivalente Eingangsadmittanz bei *out-of-plane* und *inplane* Anregung der *RefPlatte* und die theoretischen Verläufe einer *out-of-plane* und *inplane* angeregten Platte. Unten (2): Zusätzlich aufgetragen halbe Biege- und longitudinale Wellenlänge im Vergleich zur Länge 3.8 m der *RefPlatte*

Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, stimmt die messtechnisch ermittelte Admittanz $Y_{R,eq,ip}$ oberhalb von 100 Hz gut mit der Admittanz einer halbumendlichen, in Plattenebene angeregten Platte, $Y_{\infty,ip}$, überein. Für den Bereich unter 100 Hz müssen jedoch noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um den Verlauf interpretieren zu können.

Auffällig ist die bei 500 Hz auftretende Resonanz im Admittanzverlauf. Diese kann durch die Betrachtung der longitudinalen Wellenlänge, λ_L , nach Gleichung 6 [z.B. 6] erklärt werden.

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (6)$$

Abbildung 2 zeigt zusätzlich zur Admittanz, den Verlauf der halben Wellenlängen als Funktion der Frequenz. Die schwarze horizontale Linie gibt dabei die Länge von 3.8 m der *RefPlatte* wieder. Bei 500 Hz ist der Schnittpunkt beider Linien; es kommt zur Ausbildung der ersten longitudinalen Mode in der *RefPlatte*. Diese ist vermutlich die Ursache für die Resonanz im Verlauf der *inplane* Admittanz.

Leistungsvergleich

Voraussetzung für die Anwendung der Empfangsplattenmethode ist, dass die Leistung der Platte, P_s , nach

Gleichung(1) der eingebrachten Leistung am Anregungspunkt, $P_{\text{Anregungspunkt}}$, entspricht. Dies ist bei *out-of-plane* Anregung und *out-of-plane* Messung von P_s der Fall, wie Abbildung 4, Graph a bestätigt. Um zu untersuchen, ob diese Voraussetzung auch bei *inplane* Anregung der Empfangsplatte gegeben ist, wurde sowohl die *Ref-Platte* als auch die *Fenster-Platte* stirnseitig angeregt und die Leistung in der Platte, P_s , mit verschiedenen Sensorpositionen ermittelt.

Die Leistung am Anregungspunkt wird nach Gleichung 7 bestimmt. Um diese zu erhalten, wird dazu der Realteil des Kreuzspektrums aus Kraft und der Schnelle am Anregungspunkt gebildet, wobei der verwendete Impulshammer die Kraft und die am Anregungspunkt montieren Beschleunigungssensoren die Schnelle liefern.

$$P_{\text{Anregungspunkt}} = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \hat{F}^* \cdot \hat{v} \right\} \quad (7)$$

In Abbildung 4 und 5 werden jeweils Pegeldifferenzen für verschiedene Anregungs- und Sensorpositionen abgebildet. Die Pegeldifferenz, ΔL_{Ws} , wird aus der Leistung am Anregungspunkt, $P_{\text{Anregungspunkt}}$, und der gemessenen Körperschalleistung in der Platte, P_s , gebildet. Dabei handelt es sich um den Mittelwert aus drei Pegeldifferenzen für jeweils drei Anregungspunkte. Die mit aufgetragene Standardabweichung zeigt die Abweichung der drei Einzeldifferenzen von dem gebildeten Mittelwert auf.

Die *Ref-Platte* und die *Fenster-Platte* wurden jeweils an drei Punkten mit einem Impulshammer angeregt. Die in der Plattenstruktur vorhandene kinetische Energie ergibt sich aus den räumlich gemittelten quadratischen Schnellen, welche mit Beschleunigungsaufnehmern auf der Platte experimentell erfasst werden.

Die verwendeten Sensor- und Anregungspositionen werden exemplarisch für die *Ref-Platte* in Abbildung 3 gezeigt. Dabei handelt es sich bei den Anregungspositionen 1 bis 3 um *out-of-plane* Anregung, bei den Positionen 4 bis 6 um *inplane* Anregung.

Graph a zeigt die gemittelte Pegeldifferenz, ΔL_{Ws} , bei *out-of-plane* Anregung und *out-of-plane* Messung sowohl für die *Ref-Platte* (Abbildung 4) als auch für die *Fenster-Platte* (Abbildung 5). Diese überschreitet für beide Empfangsplatten den Bereich von ± 3 dB nicht und soll in diesem Fall als Referenz dienen, da es den Standardfall für einen Leistungsvergleich nach DIN EN 15657:2017-10 [3] darstellt.

Im nächsten Schritt erfolgte an beiden Empfangsplatten jeweils wieder an drei Anregungspunkten die stirnseitige, also *inplane* Einleitung der Körperschallenergie. Die Leistung der Platte, P_s , wurde mit *out-of-plane* montierten Sensoren ermittelt. Betrachtet man wieder die resultierende Pegeldifferenz, ΔL_{Ws} , (Graph b) für die *Ref-Platte* und *Fenster-Platte*, so ist festzustellen, dass diese im Vergleich zur *out-of-plane* Anregung wesentlich größer ist, der Leistungsvergleich also schlechter ausfällt.

Graph c zeigt den Verlauf der Pegeldifferenz ΔL_{Ws} bei *inplane* Einleitung der Körperschallenergie und *inplane*

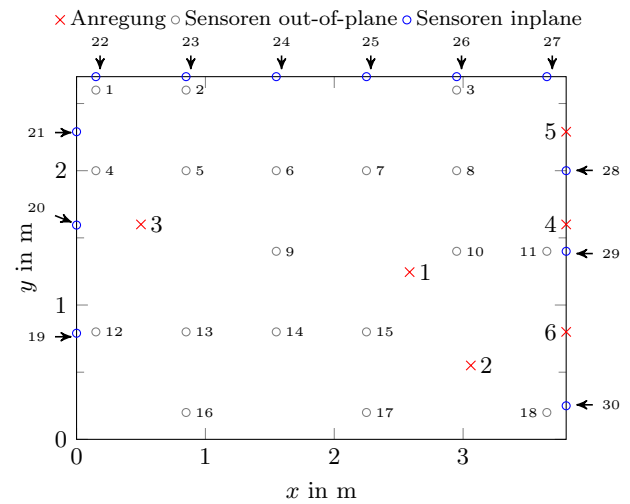


Abbildung 3: Ref-Platte; Anregungs- und Sensorpositionen; Sensoren 1 bis 18 für *out-of-plane* Messung; Sensoren 19 bis 30 für *inplane* Messung

Messung der Plattenleistung. Dabei ist zu erkennen, dass bei der *Ref-Platte* ab 500 Hz die Pegeldifferenz im Bereich von ± 3 dB liegt und somit ein Leistungsvergleich gut möglich ist. Dies kann damit erklärt werden, dass ab 500 Hz longitudinale Moden in der *Ref-Platte* vorhanden sind (siehe Abbildung 2) und somit die *inplane* montierten Sensoren die modale Körperschallenergie erfassen.

Graph d stellt eine Kombination aus *inplane* und *out-of-plane* montierten Beschleunigungssensoren bei *inplane* Anregung der Struktur dar. Es ist festzustellen, dass dies im Vergleich zur reinen *inplane* Messung keine Vorteile liefert, sondern eher eine Verschlechterung der Pegeldifferenz bewirkt.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die *inplane* Anregung von Empfangsplatten genauer betrachtet, um eine mögliche Erweiterung des Empfangsplattenverfahrens nach DIN EN 15657:2017-10 [3] auf Anregung in Plattenebene zu prüfen. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf die *inplane* Admittanz am Krafteinleitpunkt gelegt. Über 100 Hz stimmt diese gut mit der theoretischen Admittanz einer halbunendlichen *inplane* angeregten Platte überein. Der Bereich unter 100 Hz bedarf jedoch noch genauerer Untersuchungen.

Zudem wurde ein Leistungsvergleich bei *inplane* Anregung der *Ref-Platte* und *Fenster-Platte* durchgeführt. Dabei wurde die Positionierung der Beschleunigungsaufnehmer für die Ermittlung der eingebrachten Körperschallleistung, P_s , genauer betrachtet.

Um den Leistungsvergleich richtig durchzuführen und im späteren Verlauf eine Ermittlung der charakteristischen Körperschallleistung gebäudetechnischer Anlagen bei *inplane* Anregung der Empfangsplatten zu ermöglichen, werden in weiteren Schritten noch zusätzliche Untersuchungen zur *inplane* Anregung durchgeführt.

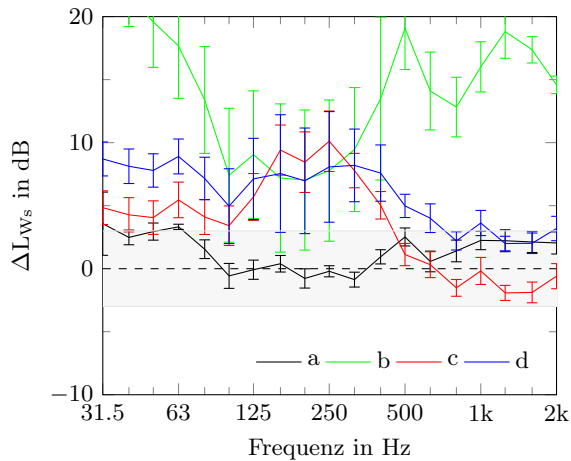


Abbildung 4: *RefPlatte*: gemittelte Pegeldifferenz, ΔL_{ws} , zwischen der Leistung am Anregungspunkt, $P_{Anregungspunkt}$, und der gemessenen Körperschalleistung, P_s ; Mittelwert über drei Anregungspunkte mit dazugehöriger Standardabweichung

a: Pegeldifferenz aus *out-of-plane* Anregung sowie *out-of-plane* Messung; Standardfall nach DIN EN 15657:2017-10 [3], dient als Referenz

b: *inplane* Anregung und *out-of-plane* Messung

c: *inplane* Anregung und *inplane* Messung

d: *inplane* Anregung und Kombination aus *inplane* und *out-of-plane* Messung

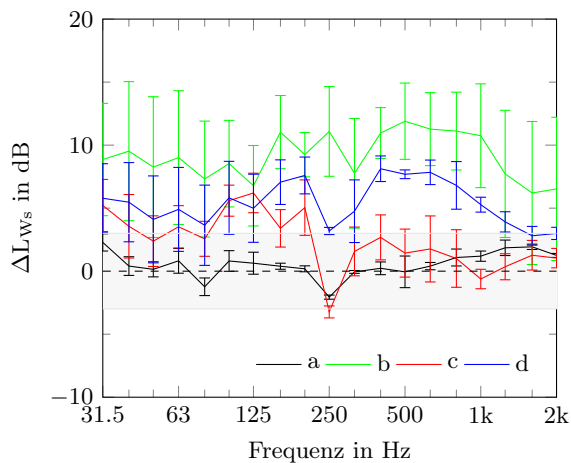


Abbildung 5: *FensterPlatte*: gemittelte Pegeldifferenz, ΔL_{ws} , zwischen der Leistung am Anregungspunkt, $P_{Anregungspunkt}$, und der gemessenen Körperschalleistung, P_s ; Mittelwert über drei Anregungspunkte mit dazugehöriger Standardabweichung

a: Pegeldifferenz aus *out-of-plane* Anregung sowie *out-of-plane* Messung; Standardfall nach DIN EN 15657:2017-10 [3], dient als Referenz

b: *inplane* Anregung und *out-of-plane* Messung

c: *inplane* Anregung und *inplane* Messung

d: *inplane* Anregung und Kombination aus *inplane* und *out-of-plane* Messung

Danksagung

Die Autoren danken der Firma Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH für die Unterstützung in der Messtechnik.

Literatur

- [1] DIN 4109-1:2018-01: Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderung
- [2] DIN EN 12354-5:2009-10: Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 5: Installationsgeräusche
- [3] DIN EN 15657:2017-10: Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden - Messung des Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand für alle Installationsbedingungen
- [4] Cremer, L.; Heckl, M. A.: Körperschall: Physikalische Grundlagen und Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1967
- [5] Gardonio, P.; Brennan, M. J.: „Mobility and impedance methods in structural dynamics: Chapter 9“. In: *Advanced Application in Acoustics, Noise and Vibration*. Hrsg. von Fahy, F. J.; Walker, J. 2004
- [6] Hopkins, C.: Sound Insulation. Butterworth-Heinemann, 2007