

Charakterisierung von an mehrere Bauteile gekoppelten Körperschallquellen

Sven Öhler, Bernd Kaltbeitzel, Mona Schaub

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 70569 Stuttgart, E-Mail: sven.ohler@ibp.fraunhofer.de

Einleitung

Derzeit erfolgt die Beurteilung von Geräuschen durch Sanitärinstallationen im Wesentlichen in speziellen Musterbauprüfständen, wobei die Ergebnisse nur mit Einschränkungen auf vom Prüfstand abweichende, reale Bausituationen übertragen werden können [1]. Die Schallübertragung durch haustechnische Anlagen lässt sich allerdings auch nach DIN EN 12354-5:2009-10 für beliebige Massivbauten berechnen. Für die Prognoseberechnung wird neben den schalltechnischen Gebäudedaten als wichtigste Eingangsgröße die durch eine Quelle (z. B. Sanitärinstallation) in das angekoppelte Bauteil eingeleitete Körperschalleistung benötigt. Die messtechnische Bestimmung der Körperschalleistung einer Installation erfolgt dabei nach der Norm DIN EN 15657:2017-10. Im Musterbau (z. B. Prüfstand mit gekoppelten Massivbauteilen mit bauüblichen Stoßstellen) wird hierfür das „Schalleistungs-Ersatzverfahren“ nach Anhang C in obiger Norm vorgeschlagen.

Ist die Sanitärinstallation allerdings mit mehreren Bauteilen (z. B. Rohboden und Wand) gleichzeitig verbunden, wie es z. B. bei einer Badewanne üblicherweise der Fall ist, müssen die Anteile der Körperschalleitung separiert werden. Im Gegensatz zu Empfangsplattenprüfständen mit entkoppelten Bauteilen, sind in Musterbauprüfständen allerdings Boden und Wände miteinander verbunden, so dass eine Trennung der Körperschallanteile in Boden und Wände zunächst nicht eindeutig möglich ist (vgl. Abbildung 1).

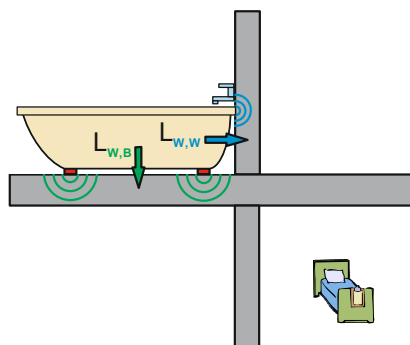


Abbildung 1: Körperschallanregung der Installationswand ($L_{w,w}$) und des Bodens ($L_{w,b}$) durch eine Badewanne.

Im Folgenden wird diskutiert inwieweit die richtungsabhängige Charakterisierung von an mehrere Bauteile gekoppelten Körperschallquellen auch im Musterbau realisiert werden kann.

Anwendbarkeit der Messverfahren nach EN 15657 und prEN 14366-1

In EN 15657 ist das Verfahren beschrieben, wie die Eigenschaften von Körperschallquellen messtechnisch bestimmt werden können. Dabei wird u. A. zwischen

Prüfeinrichtungen mit elastisch gelagerten Empfangsplatten und Prüfständen mit gekoppelten Empfangsplatten (z. B. Musterbau) unterschieden. Eine verhältnismäßig einfache und verlässliche Methode zur Bestimmung der Eigenschaften einer Körperschallquelle, bietet das „Schalleistungs-Ersatzverfahren“ nach Anhang C in dieser Norm.

Hierbei wird mit einer kalibrierten Referenz-Körperschallquelle ein Bauteil angeregt und die Übertragungsfunktion zwischen der direkt gemessenen Körperschalleistung der Referenzquelle $L_{ws,cal}$ und dem mittleren Schnellepegel auf dem angeregten Bauteil $L_{<v>,cal}$ gebildet. Anschließend wird die reale Quelle in Betrieb genommen und wieder der resultierende mittlere Schnellepegel auf dem angeregten Bauteil $L_{<v>,s}$ gemessen. Folglich kann der Körperschalleistungspegel der realen Quelle $L_{ws,s}$ nach folgender Beziehung ermittelt werden.

$$L_{ws,s} = L_{<v>,s} + [L_{ws,cal} - L_{v,cal}] \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

Am Beispiel eines Abwassersystems wird dieses Verfahren nach prEN 14366-1:2021-08 angewendet (vgl. Abbildung 2).

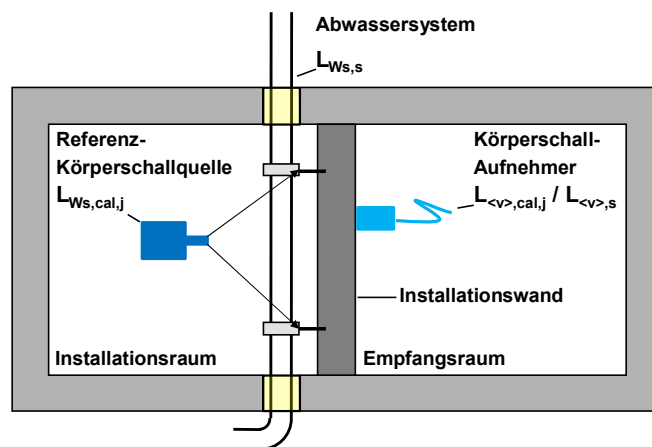


Abbildung 2: Anwendung des „Schalleistungs-Ersatzverfahrens“ am Beispiel eines Abwassersystems im Prüfstand nach prEN 14366-1.

Das Abwassersystem wird mit zwei Rohrschellen an der Installationswand befestigt. Da aber dabei nur ein Bauteil angeregt wird, ist das „Schalleistungs-Ersatzverfahren“ anwendbar. Anders, wenn beispielsweise die gelb markierten Bereiche in den Deckendurchbrüchen z. B. mit Mörtel schallhart ausgefüllt werden, so dass sich Schwingungen des durchströmten Abwassersystems zusätzlich in Boden und Decke übertragen. Dann kann je nach Beschaffenheit der Bauteileigenschaften und der Stoßstellen nicht mehr eindeutig bestimmt werden, welcher Körperschallanteil über die Schellen und welcher über die Durchbrüche für Bauteilschwingungen sorgt. Da die spätere Prognoseberechnung nach EN 12354-5 diese Kenntnis über die bauteilabhängigen Anteile der Körperschalleistung allerdings verlangt, müssen Ansätze untersucht werden,

inwieweit Prüfstände mit gekoppelten Empfangsplatten (Musterbauprüfstand) trotzdem für die Charakterisierung von an mehrere Bauteile gekoppelten Körperschallquellen eingesetzt werden können.

Kalibrierung des Prüfstands mit Körperschall-Übertragungsfunktionen

Für die Anwendung des „Schalleistungs-Ersatzverfahrens“ muss das Körperschall-Übertragungsverhalten des Prüfstands, ausgehend vom angeregten Bauteil, bekannt sein. Hierzu wurden im Installationsprüfstand am Fraunhofer-Institut für Bauphysik nacheinander jeweils die Bauteile Installationswand (Kalksandstein, flächenbezogene Masse $m' = 220 \text{ kg/m}^2$) und Prüfstandsboden (Stahlbeton, flächenbezogene Masse $m' = 440 \text{ kg/m}^2$) mit einem elektrodynamischen Schwingerreger (Inertialshaker) zu Schwingungen angeregt. Als Signal wurde „rosa Rauschen“ verwendet. Durch direkte Messung des Kreuzleistungsspektrums aus Kraft (F) und Schnelle (v) am Einleitungsort des Schwingerregers auf dem jeweiligen angeregten Bauteil i, kann als erste Größe die eingeleitete Körperschalleistung $L_{Ws,cal,i}$ als Referenzgröße bestimmt werden (vgl. Abbildung 3).

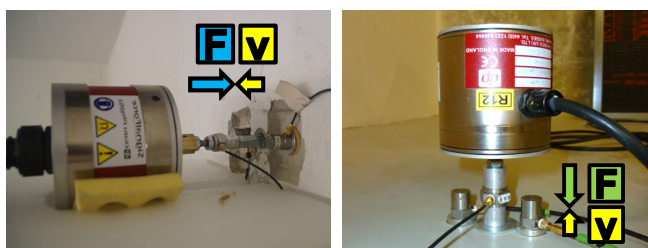


Abbildung 3: Direkte Bestimmung der eingeleiteten Körperschalleistung durch Messung des Kreuzleistungsspektrums aus Kraft und Schnelle am Einleitungsort (links: Installationswand, rechts: Prüfstandsboden).

Während der Anregung mit der Referenzschallquelle muss neben der direkt gemessenen Körperschalleistung auch der flächengemittelte Schnellepegel $L_{<v>,j}$ auf dem jeweiligen Bauteil j gemessen werden (vgl. Abbildung 4). Die Differenz der beiden Messgrößen beschreibt anschließend die Körperschall-Übertragungsfunktion und stellt, wenn Anregung und Schnellemessung auf demselben Bauteil stattfinden (Orte der Anregung i und der Schnellemessung j beschreiben also dasselbe Bauteil), ein Maß für die „Körperschalldämmung“ des Bauteils dar.

$$R_{KS,ij} = L_{Ws,cal,i} - L_{<v>,j} \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

Nach gleichem Verfahren kann aber auch das Körperschall-Übertragungsverhalten der Bausituation messtechnisch bestimmt werden. Wenn z. B. die Installationswand mit der Anregung durch den Shaker beaufschlagt und die dadurch resultierende Schwingschnelle auf dem angrenzenden Prüfstandsboden gemessen wird, beschreibt die Differenz nach Gleichung (2), vergleichbar mit der Stoßstellendämmung, die richtungsabhängige Kopplungseigenschaft zwischen den beiden Bauteilen.

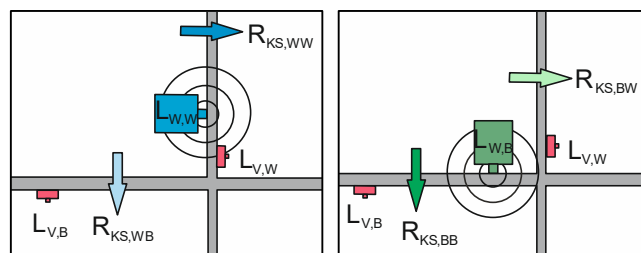


Abbildung 4: Messanordnung zur Bestimmung der „Körperschalldämmmaße“ $R_{KS,ij}$ durch Anregung eines Bauteils mit der Referenzschallquelle und Messungen der Schnellen auf dem direkt angeregten und dem benachbarten Bauteil.

Abbildung 5 zeigt das Ergebnis für die im Musterbauprüfstand des IBP gemessenen Körperschalldämm-Maße, bei Anregung mit dem Inertialshaker an einer Position auf der Installationswand („blau“) und auf dem Prüfstandsboden („grün“). Für die beiden Anregesituationen wurde jeweils der Schnellepegel auf dem angeregten und dem angrenzenden Bauteil gemessen. Das Ergebnis zeigt die Auswertung nach Gleichung (2).

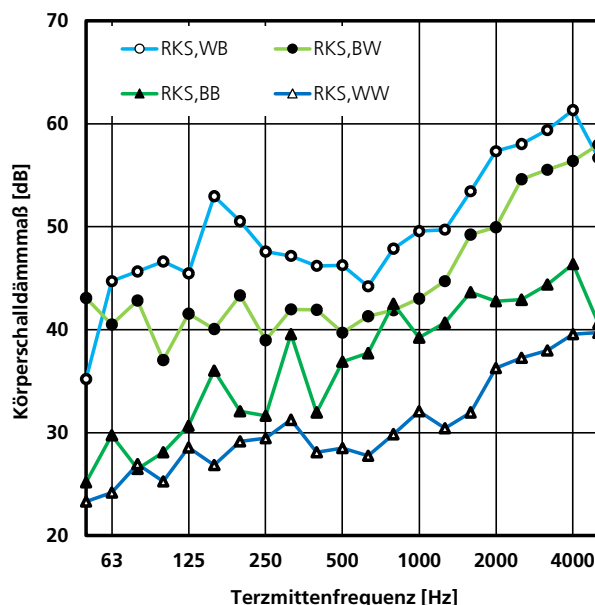


Abbildung 5: „Körperschalldämmmaße“ $R_{KS,ij}$ über der Frequenz.
R_{KS,WW}: Anregung auf Wand, Schnellemessung auf Wand,
R_{KS,WB}: Anregung auf Wand, Schnellemessung auf Boden,
R_{KS,BB}: Anregung auf Boden, Schnellemessung auf Boden,
R_{KS,BW}: Anregung auf Boden, Schnellemessung auf Wand.

Die geringste „Körperschalldämmung“ zeigt der Übertragungsweg bei direkter Anregung und Messung auf der Installationswand ($R_{KS,WW}$, dunkelblau). Wegen der flächenbezogenen Masse $m' = 440 \text{ kg/m}^2$ ist die „Körperschalldämmung“ des Prüfstandsbodens gegenüber der halb so schweren Wand demzufolge höher ($R_{KS,BB}$, dunkelgrün). Bei Messung der Körperschallausbreitung über die Stoßstelle sind selbstverständlich höhere Pegeldifferenzen messbar, als bei der Betrachtung der Einzelbauteile. Wobei der Übertragungsweg während Anregung der Installationswand und der Schnellemessung auf dem Prüfstandsboden ($R_{KS,WB}$, hellblau) die höchste „Körperschalldämmung“ aufweist.

Trennung der Leistungsanteile bei gleichzeitiger Anregung gekoppelter Bauteile

Im nächsten Schritt ist sowohl an der Installationswand, als auch am Prüfstandsboden jeweils ein Inertialshaker als Körperschallquelle angebracht (vgl. Abbildung 6). Mit der Anordnung soll die Anregung einer realen, an mehrere Bauteile gekoppelten Körperschallquelle (z. B. einer Badewanne, vgl. Abbildung 1) simuliert werden. Gleichzeitig bietet der Einsatz der beiden Punktschallquellen die Möglichkeit, die ins jeweilige Bauteil eingeleitete Körperschalleistung direkt zu messen, um diese später mit Ergebnissen aus der Anwendung des „Schalleistungs-Ersatzverfahrens“ zu vergleichen.

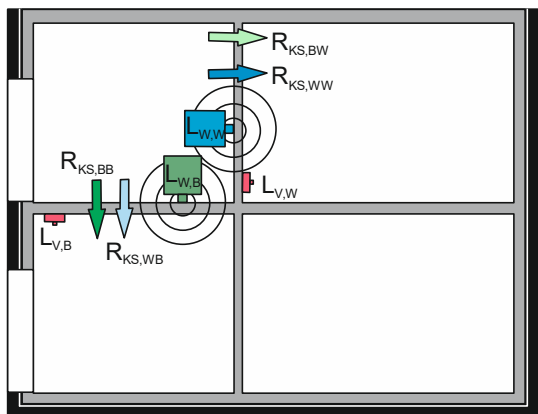


Abbildung 6: Gleichzeitige Anregung der Installationswand und des Prüfstandsbodens mit zwei Inertialshakern als Körperschallquellen und Messung der Schwingenschnellen auf den Bauteilen im Musterbauprüfstand.

Mit Körperschallaufnehmern wird während der Anregung mit den Shakern die Schwingenschnelle simultan auf der Installationswand und dem Prüfstandsboden gemessen. Unter Einbeziehung der gewonnenen „Körperschalldämmmaße“ $R_{KS,ij}$ aus vorigem Kapitel, lassen sich die Schwingenschnellen auf den jeweiligen Bauteilen j durch folgende Gleichungen ausdrücken.

$$L_{\langle v \rangle, W} = 10 * \lg \left(10^{(L_{W,B} - R_{KS,BW})/10} + 10^{(L_{W,W} - R_{KS,WW})/10} \right) \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

$$L_{\langle v \rangle, B} = 10 * \lg \left(10^{(L_{W,B} - R_{KS,BB})/10} + 10^{(L_{W,W} - R_{KS,WB})/10} \right) \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

Beispielsweise setzt sich der mittlere Schnellepegel $L_{\langle v \rangle, W}$ auf der Installationswand in Gleichung (3) bei gleichzeitiger Anregung von Wand und Boden, demnach aus der Differenz der Einzelleistung und dem jeweiligen für die Körperschallausbreitung maßgeblichen „Körperschalldämmmaß“ zusammen. Die wichtigste Erkenntnis daraus ist, dass je weniger Leistung eine Quelle auf dem benachbarten Bauteil (Prüfstandsboden) einbringt und je höher die richtungsabhängige Stoßstellendämmung $R_{KS,BW}$ zwischen Boden und Wand ist, desto weniger Einfluss nimmt die Leistung am Prüfstandsboden an der Schwingenschnelle auf der Installationswand ein. Entsprechende Zusammenhänge lassen sich anschließend in gleicher Weise für den mittleren Schnellepegel auf dem Prüfstandsboden $L_{\langle v \rangle, B}$ in Gleichung (4) ableiten.

Mit Hilfe der Schnellepegel $L_{v,j}$ in Gleichungen (3) und (4) lassen sich die interessierenden Körperschalleistungen $L_{W,i}$ bei gleichzeitiger Anregung der Installationswand und des Prüfstandsbodens wie folgt darstellen.

$$L_{W,W} = 10 * \lg \frac{10^{(R+R)/10} * (10^{(L_{v,W} + R - R)/10} - 10^{L_{v,B}/10})}{10^{(R+R-R)/10} - 10^{R/10}} \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

$$L_{W,B} = 10 * \lg \frac{10^{(R+R)/10} * (10^{(L_{v,B} + R - R)/10} - 10^{L_{v,W}/10})}{10^{(R+R-R)/10} - 10^{R/10}} \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

mit $R = R_{KS,WW}$, $R = R_{KS,WB}$, $R = R_{KS,BB}$ und $R = R_{KS,BW}$

Die farblich gekennzeichneten R sind der übersichtlicheren Darstellung geschuldet und bedeuten in obigen Gleichungen (5) und (6) die jeweiligen Körperschalldämmmaße $R_{KS,ij}$ nach oben angegebener Kodierung.

Obige Gleichungen (5) und (6) zeigen wieder, dass je höher die Körperschalldämmmaße (bzw. die richtungsabhängigen Schnellepegeldifferenzen) zwischen den beiden angeregten Bauteilen, desto höher der Vertrauensbereich des individuellen Leistungsanteils, der von einer Quelle in das direkt angrenzende Bauteil eingeleitet wird. Den Idealfall stellt dabei natürlich ein Empfangsplattenprüfstand mit bestmöglich entkoppelten Bauteilen dar, jedoch scheint unter Berücksichtigung der Ergebnisse in Abbildung 5 auch im Musterbauprüfstand das „Schalleistungs-Ersatzverfahren“ unter praxisnahen Bedingungen anwendbar.

Anwendung des „Schalleistungs-Ersatzverfahrens“ bei gleichzeitiger Anregung gekoppelter Bauteile

In der Messkonfiguration in Abbildung 6 wurden nun die beiden Inertialshaker gleichzeitig mit angelegtem rosa Rauschsignal in Betrieb genommen. Die Signale wurden mehrfach in der Anregungsstärke variiert (ΔL), wodurch unterschiedliche Kombinationen untersucht werden konnten. Zum einen wurde dabei die eingeleitete Körperschalleistung direkt gemessen (vgl. Abbildung 3) und zum anderen die Körperschalleistung indirekt nach dem „Schalleistungs-Ersatzverfahren“ bestimmt. Folgende Kombinationen von gleichzeitig in die jeweiligen Bauteile eingeleiteten Körperschalleistungen wurden betrachtet.

Tabelle 1: Kombinationen der durch die Shaker an Wand $L_{W,W}$ und Boden $L_{W,B}$ eingeleiteten Körperschalleistungen.

	$L_{W,W}$ in dB	ΔL in dB	$L_{W,B}$ in dB	ΔL in dB
1	85	0	83	0
2	85	0	78	-5
3	85	0	73	-10
4	80	-5	73	-10
5	60	-25	68	-15

Gemessene und berechnete Körperschalleistung wiesen dabei durchgehend identische Summenpegel auf, so dass die Angaben $L_{W,W}$ und $L_{W,B}$ in Tabelle 1 tatsächlich stellvertretend für Messung und Rechnung stehen. Zunächst wurden die Inertialshaker so betrieben, dass an den

Körperschallaufnehmern auf den Bauteilen immer ein ausreichend hoher Abstand zum Grundgeräusch vorhanden war. Beispielhaft zeigt folgendes Diagramm in Abbildung 7 die Ergebnisse für die Konfiguration „2“, bei der gleichzeitig die Installationswand mit einer Körperschallleistung von $L_{W,W} = 85$ dB und der Prüfstandsboden mit $L_{W,B} = 78$ dB angeregt wurde. Die Ergebnisse der direkt gemessenen Körperschallleistung (dunkelblau bzw. dunkelgrün) und der indirekt über das „Schallleistungs-Ersatzverfahren“ rückgerechneten Leistungsanteile (hellblau bzw. hellgrün) zeigen dabei hervorragende Übereinstimmung und liegen in den meisten Terzbändern deckungsgleich übereinander.

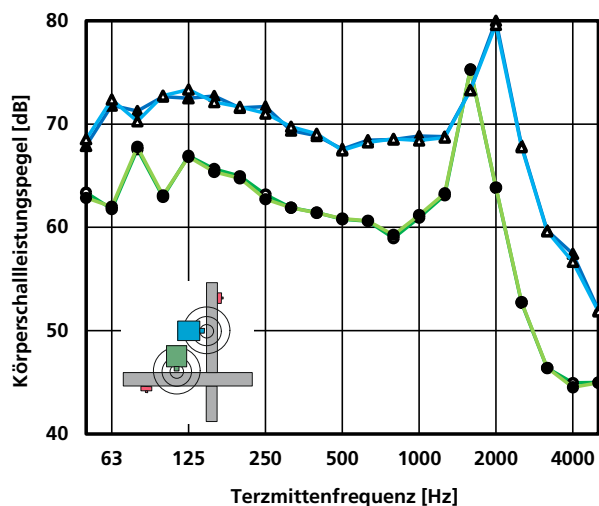


Abbildung 7: Körperschallleistung $L_{W,i}$ über der Frequenz.
 $L_{W,W, \text{direkt}}$: 85 dB, direkt gemessene KS-Leistung Wand,
 $L_{W,W, \text{Ersatz}}$: 85 dB, „Schallleistungs-Ersatzverfahren“ Wand,
 $L_{W,B, \text{direkt}}$: 78 dB, direkt gemessene KS-Leistung Boden,
 $L_{W,B, \text{Ersatz}}$: 78 dB, „Schallleistungs-Ersatzverfahren“ Boden.

Die übrigen, nicht „fett“ hervorgehobenen Konfigurationen in Tabelle 1 zeigen in der frequenzabhängigen Darstellung ähnlich gute Übereinstimmung wie in Abbildung 7, sind jedoch hier nicht dargestellt.

Ebenfalls „fett“ hervorgehoben in Tabelle 1 ist die Konfiguration „5“, bei der in die Wand eine Körperschallleistung von $L_{W,W} = 60$ dB und in den Boden eine Körperschallleistung von $L_{W,B} = 68$ dB eingeleitet wurde. Dabei konnte im diagonal angrenzenden Messraum (vgl. Abbildung 6) ein Luftschalldruckpegel $L_{Aeq,n}$ von 35 dB(A) gemessen werden. Dies entspricht in etwa der Höhe eines Installationsgeräusches einer nicht schalltechnisch optimierten, jedoch praxisnahen Sanitärinstallation (die Schallschutzanforderungen in DIN 4109 sind mit diesem Wert um 5 dB überschritten). Durch die um 8 dB unterschiedlichen Körperschallanteile in Wand und Boden, sollen die typischen Anregungsbedingungen einer Dusche oder Badewanne simuliert werden, bei denen üblicherweise der Hauptteil der vom Sanitärobjekt ausgehenden Körperschallleistung in den Rohboden eingeleitet wird.

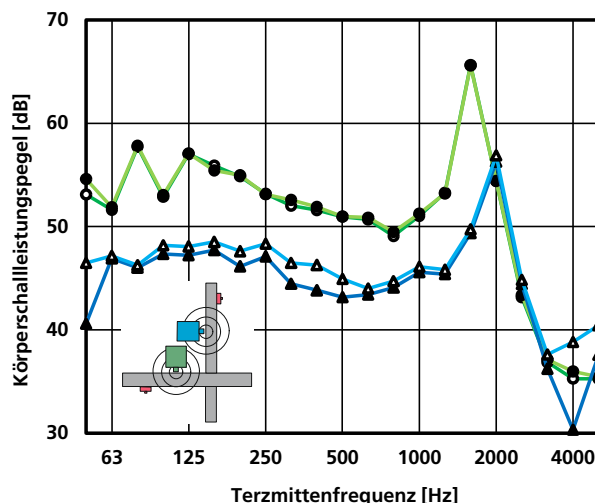


Abbildung 8: Körperschallleistung $L_{W,i}$ über der Frequenz.
 $L_{W,W, \text{direkt}}$: 60 dB, direkt gemessene KS-Leistung Wand,
 $L_{W,W, \text{Ersatz}}$: 60 dB, „Schallleistungs-Ersatzverfahren“ Wand,
 $L_{W,B, \text{direkt}}$: 68 dB, direkt gemessene KS-Leistung Boden,
 $L_{W,B, \text{Ersatz}}$: 68 dB, „Schallleistungs-Ersatzverfahren“ Boden.

Bei der Bestimmung der Körperschallleistungs-Anteile in den Prüfstandsboden (hell- und dunkelgrüne Kurven) ist wieder eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen. Bei der Bestimmung der in die Installationswand eingeleiteten Körperschallleistung tritt zwischen direkt gemessener (dunkelblaue Kurve) und der indirekt berechneten Körperschallleistung (hellblaue Kurve) in den mittleren Terzbändern eine maximale Abweichung von 2,5 dB auf. Bei tiefen und sehr hohen Frequenzen gibt es größere Abweichungen, die grundsätzlich auf die Messgrenze hindeuten, die aufgrund der sehr niedrigen Schnellepegele im Bereich des Grundrauschens auftritt. In den für die Bildung des Summenpegels maßgeblichen Frequenzbändern ist wieder eine sehr hohe Übereinstimmung festzuhalten. Dass die an der Installationswand nach dem „Schallleistungs-Ersatzverfahren“ bestimmte Körperschallleistung höhere Werte liefert als die direkt gemessene, zeigt voraussichtlich, dass die Trennung der Bauteile nicht ausreichend groß und das Anregungssignal gegenüber dem am Boden zu gering ist. Die gesamte Körperschallanregung des Gebäudes wird durch das Signal des am Boden montierten Shakers dominiert.

Zusammenfassung und Ausblick

Das „Schallleistungs-Ersatzverfahren“ ist auch für die Charakterisierung von an mehrere Bauteile gekoppelten Körperschallquellen in Musterbauprüfständen mit gekoppelten Empfangsplatten anwendbar. Allerdings unter der Voraussetzung, dass eine ausreichende Körperschalldämmung zwischen den Bauteilen vorhanden ist. Trotzdem müssen weitere Untersuchungen, vor allem an realen Sanitäröbekten, angestellt werden, um die praktische Anwendbarkeit zu erproben.

Literatur

- [1] Öhler S., Weber L., Kaltbeitzel B.: Bestimmung der Körperschallleistung und Prognoseberechnung von Installationsgeräuschen aus Luftschalldmessungen in einem Musterbau. DAGA 2020, „Hannover“