

Lutz Weber, Agostino Troll, Sven Öhler

# **Geräuschübertragung durch technische Installationen im Leichtbau**

F 3161

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0383-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,  
Demonstration und Beratung auf  
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,  
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für  
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

**Institutsleitung**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

IBP-Bericht B-AK 6/2018

## **Geräuschübertragung durch technische Installationen im Leichtbau**

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-16.16 / IBP-422509)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Der Bericht umfasst

112 Seiten Text

5 Tabellen

80 Abbildungen

Dr. Lutz Weber

B.Eng. Agostino Troll

M.BP. Dipl.-Ing. (FH) Sven Öhler

Stuttgart, 26. März 2019

Institutsleiter

Abteilungsleiter

Bearbeiter

Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Philip Leistner

Dr.  
Peter Brandstät

Dr.  
Lutz Weber

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Methodik und Vorgehensweise</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Akustische Grundlagen</b>	<b>15</b>
4.1	Installations-Schallpegel	15
4.2	Luft- und Körperschalldämmung	17
4.3	Trittschalldämmung	20
4.4	Admittanz und Körperschall-Leistung	24
4.5	Kennzeichnung von Körperschallquellen	26
4.6	Wechselwirkung von Quelle und angeregter Struktur	27
4.7	Pegeldefinitionen	29
<b>5</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>30</b>
5.1	Bauakustische Prüfstände	30
5.2	Untersuchte Decken	31
5.3	Körperschallerreger	34
5.4	Schwingende Strukturen und Lagerungen	41
<b>6</b>	<b>Messbedingungen und Vorversuche</b>	<b>53</b>
6.1	Aussparungen im schwimmenden Estrich	53
6.2	Grundgeräusch und Grenzdämmung	55
6.3	Reproduzierbarkeit	57
<b>7</b>	<b>Messung und Auswertung</b>	<b>59</b>
7.1	Messprogramm und Messausrüstung	59
7.2	Messung von Luft- und Trittschalldämmung	61
7.3	Messung der Eingangsadmittanz	62
7.4	Direkte Messung der Körperschall-Leistung	63
7.5	Indirekte Messung der Körperschall-Leistung	64
7.6	Messung der Körperschalldämmung	65
7.7	Betrag der Quellenadmittanz	65
7.8	Real- und Imaginärteil der Quellenadmittanz	67
7.9	Messung der freien Schnelle	68

<b>8</b>	<b>Messergebnisse</b>	<b>70</b>
8.1	Luft- und Trittschalldämmung der Decken	70
8.2	Körperschalldämmung der Decken	72
8.3	Eingangsadmittanz der Decken	76
8.4	Installations-Schallpegel	80
<b>9</b>	<b>Charakterisierung der Körperschallquellen</b>	<b>89</b>
9.1	Freie Schnelle	89
9.2	Betrag der Quellenadmittanz	92
9.3	Real- und Imaginärteil der Quellenadmittanz	94
<b>10</b>	<b>Übertragung des Installations-Schallpegels</b>	<b>95</b>
<b>11</b>	<b>Prognose des Installations-Schallpegels</b>	<b>98</b>
<b>12</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>102</b>
<b>13</b>	<b>Verwendung der Forschungsmittel</b>	<b>106</b>
<b>14</b>	<b>Literatur</b>	<b>106</b>
<b>15</b>	<b>Danksagung</b>	<b>112</b>

# 1 Einleitung

Die Geräusche von haustechnischen Anlagen werden häufig als störend wahrgenommen und bilden deshalb vielfach den Anlass für Beschwerden und rechtliche Auseinandersetzungen. Dies gilt insbesondere für den Wohnungsbau und betrifft fast alle technischen Einrichtungen, die Körperschall in den Baukörper einleiten. Beispiele hierfür sind Heizungs- und Lüftungsanlagen, Aufzüge, elektrische Antriebe für Rollläden und Jalousien, aber auch Haushaltsgeräte wie Waschmaschinen oder Geschirrspüler. Als besonders kritisch sind Wasserinstallationen anzusehen, da sie einerseits in allen Gebäuden vorhanden sind und andererseits – wie z. B. im Fall von Abwassergeräuschen – häufig unerwünschte Informationen enthalten, die sich dem Verursacher zuordnen lassen und die Störwirkung zusätzlich verstärken. Das größte Konfliktpotenzial weisen hierbei zumeist Sanitärgeräusche auf, die deshalb auch im Zentrum des durchgeführten Forschungsvorhabens stehen.

Wegen ihrer Lästigkeit unterliegen die Geräusche haustechnischer Anlagen in Deutschland strengen Schallschutzanforderungen. Hierbei ist zwischen den Mindestanforderungen nach DIN 4109 [1] und den Vorschlägen für erhöhten Schallschutz nach VDI 4100 [2] zu unterscheiden. Während die Mindestanforderungen baurechtlich eingeführt und damit für alle Gebäude verbindlich sind, stellen die Vorschläge für erhöhten Schallschutz nur orientierende Angaben dar und müssen zwischen dem Auftraggeber und dem ausführenden Unternehmen zusätzlich vereinbart werden. Die Anforderungen beziehen sich in beiden Fällen auf den durch die vorhandenen Installationen im schutzbedürftigen Raum hervorgerufenen Schallpegel, der im folgenden gemäß dem üblichen Sprachgebrauch als Installations-Schallpegel  $L_{in}$  bezeichnet wird. Leider sind die Anforderungen aus DIN 4109 und VDI 4100 nicht direkt miteinander vergleichbar, da sich erstere auf eine äquivalente Schallabsorptionsfläche von  $10 \text{ m}^2$  und letztere auf eine Nachhallzeit von  $0,5 \text{ s}$  im Empfangsraum beziehen. Dies hat zur Folge, dass sich abhängig vom Volumen des Empfangsraums mehr oder weniger große Unterschiede zwischen den Anforderungen ergeben.

Unabhängig davon, ob DIN 4109 oder VDI 4100 herangezogen wird, ist die Einhaltung der Schallschutzanforderungen bei Sanitärinstallation in der Regel nur unter Verwendung zusätzlicher technischer Schallschutzmaßnahmen möglich. Da die Schallübertragung von der Installation ins Bauwerk normalerweise überwiegend durch Körperschall erfolgt, besteht die wichtigste Maßnahme in einer wirksamen Körperschallisolation mittels geeigneter elastischer Befestigungselemente oder Unterlagen. Als ergänzende Maßnahme kommen außerdem häufig körperschalldämpfende Beläge zum Einsatz, die auf die Oberfläche des Sanitärobjekts aufgeklebt werden und ihm durch innere Reibung Schwingungsenergie entziehen.

Die Schwierigkeit hierbei besteht darin, dass sich die geltenden Schallschutzanforderungen zwar nachträglich durch Geräuschmessungen am Bau überprüfen lassen, eine Vorherberechnung in der Planungsphase aber äußerst aufwändig und schwierig ist. Planer und Hersteller sind deshalb im wesentlichen auf Erfahrungswerte angewiesen, was aber zwangsläufig die Gefahr unnötiger Mehrausgaben oder – im Gegenzug – das

Risiko von Schallschutzmängeln aufgrund unzureichend dimensionierter Schutzmaßnahmen mit sich bringt.

Zwar existiert mit der DIN EN 12354-5 [3, 4] seit einigen Jahren eine europäische Norm, die zumindest in Gebäuden in Massivbauweise eine Vorherberechnung des Installations-Schallpegels ermöglicht. Die erforderlichen Rechenschritte sind jedoch äußerst aufwändig und kompliziert, so dass das Berechnungsverfahren – auch wenn in Forschungseinrichtungen und Hochschulen mittlerweile einige Erfahrungen vorliegen – bislang kaum Eingang in die bauliche Praxis gefunden hat. Die meisten Hersteller lassen statt dessen akustische Messungen in einem Musterbau vornehmen und verwenden den hierbei ermittelten Installations-Schallpegel als Orientierung, um den am Bau zu erwartenden Pegel abzuschätzen (ein Musterbau ist ein spezieller bauakustischer Prüfstand, der einem Ausschnitt aus einem üblichen Wohngebäude nachempfunden ist, im Gegensatz zur Situation am Bau jedoch optimale akustische Messbedingungen bietet). In vielen Fällen (wenn der Grundriss übereinstimmt und sich nur die flächenbezogenen Massen der vorhandenen Bauteile unterscheiden) lassen sich die im Musterbau ermittelten Messergebnisse verhältnismäßig einfach auf andere Bausituationen übertragen. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) verfügt über einen Musterbau im Massivbauweise und nimmt entsprechende Umrechnungen vor.

Im Gegensatz zum Massivbau, wo umfangreiche Erfahrungen vorliegen und – zumindest theoretisch – ein Berechnungsmodell existiert, ist über Installationsgeräusche im Holz- und Leichtbau nur wenig bekannt. Es gibt kaum Messergebnisse und aufgrund der mehrschaligen Bauweise der Gebäude auch keine Möglichkeit, den Installations-Schallpegel rechnerisch vorherzubestimmen. Eine zuverlässige bauliche Schallschutzplanung ist daher nicht möglich, so dass die Gefahr von Schallschutzmängeln besteht und vielfach starke Belästigungen der Bewohner durch Sanitärgeräusche zu verzeichnen sind.

Trotz dieses offensichtlichen Misstandes wurde dem Thema in der Vergangenheit nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Dies hat sich in den letzten Jahren deutlich geändert, so dass Installationsgeräusche in Gebäuden in Holz- und Leichtbauweise sowohl von den Herstellern und Planern als auch von den betroffenen Bewohner immer häufiger thematisiert werden. Für das zunehmende Interesse am Schallschutz im Holzbau gibt es verschiedene Gründe:

- Bislang handelte es sich bei Holzbauten vorwiegend um Einfamilienhäuser. Für Einfamilienhäuser bestehen keine gesetzlichen Schallschutzanforderungen, da sich die Vorgaben der DIN 4109 auf die Schallübertragung zwischen fremden Wohn- und Arbeitsbereichen beschränken. Mit der zunehmenden Errichtung mehrgeschossiger Holzbauten, die über mehrere getrennte Wohneinheiten verfügen, rückt der bauliche Schallschutz auch im Holzbau stärker in den Blickpunkt.
- Der Holzbau hatte in Deutschland bislang nur einen verhältnismäßig kleinen Marktanteil. Wegen der Entwicklung hin zu umweltschonenden und nachhaltigen Bauweisen haben Gebäude aus Holz in den vergangenen Jahren einen starken Aufschwung erfahren. Für die Hersteller von Sanitärinstallationen wird es daher

zunehmend interessant, auch für den Holz- und Leichtbau entsprechend angepasste Schallschutzlösungen zu entwickeln und anzubieten.

- Es ist allgemein bekannt, dass Gebäude in Holzbauweise im Vergleich zu Massivbauten zumeist ein niedrigeres Schallschutzniveau aufweisen. Von daher sind die Erwartungen vieler Bewohner von vornherein geringer, besonders bei Einfamilienhäusern, wo die vorhandenen Geräusche dem eigenen Umfeld entstammen. Bei Mehrfamilienhäusern trifft dies in dieser Weise nicht zu. Hier gelten für Holzbauten die gleichen akustischen Anforderungen und Erwartungen wie im Massivbau.
- Bei einem großen Teil der Holzbauten in Deutschland handelt es sich um Fertighäuser. Da Fertighäuser nur einmal geplant und dann in großer Stückzahl nahezu unverändert hergestellt werden, ist der Bedarf für bauakustische Prognoseverfahren nur verhältnismäßig gering. Mit der Entwicklung hin zu einem maßgeschneiderten, individuell gestalteten Wohnumfeld, die sich im Bereich des Komfortwohnbaus vollzieht, ändert sich dies jedoch zunehmend.

Es ist demnach zu konstatieren, dass im Holz- und Leichtbau vor allem im Bereich haustechnischer Installationen erheblicher Bedarf für bauakustische Untersuchungen besteht. Das durchgeführte Forschungsvorhaben soll einen Beitrag hierzu liefern. Wegen der großen Konstruktionsvielfalt im Holzbau und bei Sanitärinstallationen muss es sich dabei allerdings auf wenige repräsentative Bausituationen beschränken. Da hier ein besonderes Interesse der Hersteller und auch die größten akustischen Probleme bestehen, wurde als zentrales Untersuchungsthema die Geräuschanregung von Holzbalkendecken durch Duschwannen und bodenebene Duschelemente gewählt. Die Untersuchungen erfolgten auf experimenteller Basis in einem bauakustischen Prüfstand, wobei unterschiedliche Deckenkonstruktionen (einschließlich von Massivdecken) und verschiedene Körperschallquellen zum Einsatz kamen. Die wichtigsten Ziele der durchgeführten Untersuchungen waren:

- Aufbau eines bauakustischen Prüfstands zur Messung der Geräuschübertragung von Wasserinstallationen im Leichtbau. Hierbei wurde von einem Prüfstand zur Messung der Trittschalldämmung von Decken ausgegangen, in den eine repräsentative Holzbalken-Rohdecke (leichte Bezugsdecke C1 zur Messung der Trittschallminderung von Deckenauflagen nach DIN EN ISO 10140-5, Anhang C) eingebaut und der zusätzlich mit einer geeigneten Wasserversorgung versehen wurde. Neben der Montage unterschiedlicher Körperschallquellen auf der Deckenoberseite (vorwiegend natürlich Duschwannen und -flächen) erfolgte außerdem eine schrittweise Modifikation des Deckenaufbaus durch Einbau eines schwimmenden Estrichs und einer abgehängte Unterdecke.
- Mit den in dem beschriebenen Prüfstand durchgeführten Messungen sollen unter repräsentativen Bedingungen praktische Erfahrungen zur Entstehung und Übertragung von Installationsgeräuschen im Holz- und Leichtbau gesammelt werden. Die Ergebnisse können als Grundlage und Orientierungshilfe für die Schallschutzplanung in der baulichen Praxis herangezogen werden. Außerdem soll untersucht werden, wie sich die für die untersuchten Holzbalkendecken ermittelten Messergebnisse auf möglichst einfache Weise auf Deckenkonstruktionen mit unterschiedlichem Aufbau übertragen lassen.

- Da für den Massivbau bereits eine große Anzahl von Geräuschemessungen an Wasserinstallationen vorliegt, ist auch der Zusammenhang zwischen Installationsgeräuschen im Massiv- und Leichtbau ein wichtiges Thema. Konkret geht es darum, welche Unterschiede bestehen, wenn dieselbe Installation unter ansonsten gleichen Bedingungen zunächst auf einer Massiv- und dann auf einer Holzbalkendecke montiert wird. Wäre dabei ein klarer akustischer Zusammenhang erkennbar, ließen sich die vorhandenen Ergebnisse aus dem Massivbau zumindest teilweise auch für den Holzbau nutzen, was in der Praxis eine große Zeit- und Kostenersparnis bedeuten würde. Allerdings bestehen Zweifel, ob dies tatsächlich möglich ist, weshalb entsprechende Untersuchungen durchgeführt werden müssen.
- Obgleich das Berechnungsmodell nach DIN EN 12354-5 in seiner Gesamtheit nur im Massivbau verwendbar ist, ist nach den bisherigen Erkenntnissen davon auszugehen, dass sich der Teil des Modells, der die Körperschallübertragung zwischen Installation und Bauwerk beschreibt, auch auf den Leichtbau übertragen lässt. Ersetzt man die Schallausbreitungsberechnung im Gebäude (hierfür gibt es im Leichtbau derzeit kein geeignetes Berechnungsverfahren) durch eine gemessene Übertragungsfunktion, so ist auf diese Weise auch im Leichtbau eine Vorherbestimmung des Installations-Schallpegels möglich. Die Untersuchung dieses Ansatzes stellt gleichfalls ein wichtiges Ziel des Forschungsvorhabens dar.

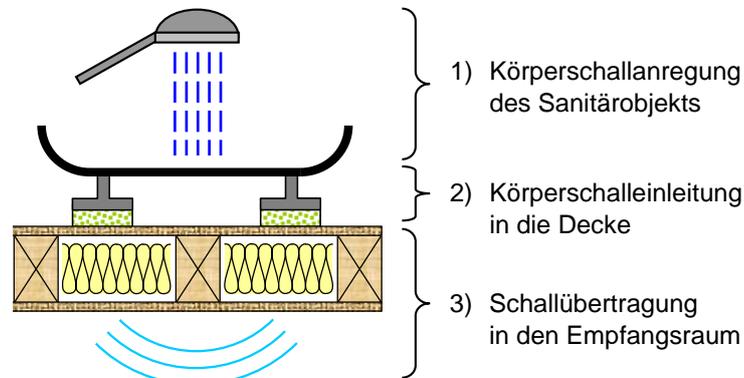
## 2 Methodik und Vorgehensweise

In dem durchgeführten Forschungsvorhaben wird die Entstehung und Übertragung von Installationsgeräuschen im Holz- und Leichtbau messtechnisch untersucht. Hierzu wird ein Prüfstand aufgebaut, in dem am Beispiel von praxisüblichen Holzbalkendecken akustische Messungen an unterschiedlichen Sanitärinstallation – insbesondere Duschwannen und bodenebenen Duschflächen sowie auch idealisierten Körperschallquellen – vorgenommen werden.

Wie aus dem Beispiel in Abb. 1 zu entnehmen ist, erfolgt die Entstehung und Übertragung von Sanitärgeräuschen in Bauten in drei Schritten:

- 1) Den Anfang bildet die Geräuschanregung der Sanitärinstallation. In dem dargestellten Beispiel einer Duschwanne erfolgt dies durch den aus einem Brausekopf austretenden Wasserstrahl, der auf die Oberfläche der Wanne trifft und diese zu Schwingungen anregt (Schwingungen im hörbaren Frequenzbereich bezeichnet man als Körperschall).
- 2) Die Schwingungen der Wanne werden über die Befestigungselemente (im Beispiel sind dies Wannenfüße, es kann sich jedoch ebenso um eine vollflächige Unterlage handeln) in die Decke übertragen. Im Normalfall verfügen die Befestigungselemente über elastische Einsätze, die die Übertragung von Körperschall herabsetzen. Neben der Körperschalleinleitung kann die Decke zusätzlich auch noch durch den von der Installation abgestrahlten Luftschall angeregt werden. Bei den meisten Sanitärinstallationen spielt die Luftschallanregung jedoch nur eine untergeordnete Rolle, weshalb sie hier nicht näher betrachtet wird.

- 3) Der in die Decke eingeleitete Körperschall breitet sich im Bauwerk aus, wird über Decken und Wände zum Empfangsraum übertragen und dort von den schwingenden Umfassungsbauteilen als Luftschall in den Raum abgestrahlt. Im einfachsten Fall, der in Abb. 1 wiedergegeben ist, befindet sich der Empfangsraum direkt unterhalb der angeregten Decke.



**Abb. 1:** Entstehung und Übertragung von Installationsgeräuschen am Beispiel einer auf einer Holzbalkendecke montierten Duschwanne. In dem vereinfachten Beispiel erfolgt die Schallübertragung senkrecht nach unten in den Raum unterhalb der Decke.

Da die Geräuschanregung der Installation zunächst außer Betracht bleiben kann (sie wird bei der messtechnischen Charakterisierung der Quelle mit erfasst) reduziert sich die Problematik im Wesentlichen auf zwei Themen: die Körperschallübertragung von der Installation ins Bauwerk und die Körperschallausbreitung im Bauwerk. Da die Körperschalleinleitung durch die Quelle sowohl von der Quelle selbst als auch von den Bauwerkseigenschaften abhängt (wird dieselbe Quelle auf einer anderen Decke montiert, ist auch die Schalleinleitung eine andere), ist es erforderlich, sowohl die Körperschallquelle als auch das angeregte Bauteil akustisch zu charakterisieren. Mit den hierbei ermittelten akustischen Kennwerten (den Admittanzen und der freien Schnelle) kann anschließend die von der Quelle in das Bauteil eingeleitete Körperschall-Leistung berechnet werden.

Anders verhält es sich mit der Körperschallausbreitung im Bauwerk. Bei Gebäuden in Holz- und Leichtbauweise, die überwiegend aus mehrschaligen Bauteilen bestehen, ist eine Berechnung der Schallausbreitung wie schon erwähnt bislang nicht möglich. Ersatzweise kann die Berechnung jedoch durch eine gemessene Übertragungsfunktion ersetzt werden, die im Sinne einer einheitlichen Darstellung und Nomenklatur in Analogie zur Luftschalldämmung zwischen Räumen als Körperschalldämm-Maß  $R_{KS}$  definiert wird.

Aufgrund der vorangehenden Überlegungen ergibt sich für die Bearbeitung des Forschungsvorhabens folgende Vorgehensweise:

- a) Aufbau eines bauakustischen Prüfstands zur Messungen der Geräusche von Wasserinstallationen in Verbindung mit leichten Deckenkonstruktionen. Dies erfolgte

durch den Umbau eines vorhandenen Deckenprüfstandes, d. h. eines Prüfstands zur Messung der Trittschalldämmung von Decken, der zusätzlich mit einer geeigneten Wasserversorgung (mit regelbarem Fließdruck und einstellbarer Durchflussmenge) versehen wurde.

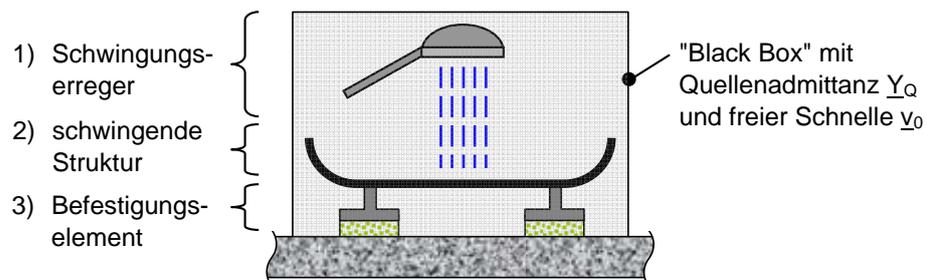
- b) Einbau einer Holzbalkendecke in den Prüfstand. Als Ausgangspunkt für alle weiteren Untersuchungen wurde die Bezugsdecke C1 für die Trittschallminderung von Deckenauflagen nach DIN EN ISO 10140-5, Anhang C [5] ausgewählt (bei der Bezugsdecke C1 handelt es sich um eine Rohdecke ohne Deckenauflage oder Unterdecke). Nachdem die Messungen an der Rohdecke abgeschlossen waren, wurde die Decke zunächst mit einem schwimmenden Estrich und anschließend zusätzlich mit einer abgehängten Unterdecke versehen, so dass das Messprogramm drei verschiedene Holzdecken umfasste. Genau genommen waren es sogar vier Decken, da der schwimmende Estrich an zwei Ecken 105 cm x 105 cm große Aussparungen für den Einbau bodenebener Duschelemente aufwies. Bei den in diesen Aussparungen montierten Installationen erfolgte die Schallübertragung von oben nach unten nur über die Rohdecke und die Unterdecke, so dass auch dieser Deckenaufbau (d. h. Rohdecke mit abgehängter Unterdecke) im Messprogramm vertreten war. Da sich die Messungen in den Aussparungen nur auf wenige Installationen beschränkten, konnte der Aufbau allerdings nur teilweise in die nachfolgenden Betrachtungen einbezogen werden. Zum Vergleich und zur Vervollständigung des Messprogramms wurden außerdem zwei Massivdecken (eine Stahlbetondecke mit und ohne schwimmenden Estrich) in die Untersuchungen einbezogen. Das Messprogramm umfasste somit insgesamt vier verschiedene Holzbalken- und zwei Massivdecken.
- c) Messtechnische Charakterisierung der untersuchten Decken. Neben den üblichen Kennwerten für die Luft- und Trittschalldämmung betraf dies außerdem die Eingangsadmittanz und das Körperschalldämm-Maß. Im Falle der Holzbalken-Rohdecke wurde außerdem die Ortsabhängigkeit der Eingangsadmittanz untersucht (bei einer Holzbalkendecke ohne Deckenauflage hängt die Eingangsadmittanz davon ab, ob sich der Anregungsort über einem Balken oder im Feld zwischen zwei Balken befindet).
- d) Auswahl und Herstellung der untersuchten Sanitärinstallationen und Körperschallquellen. Es wurden sowohl idealisierte Quellen (mit einem vereinfachten, gut reproduzierbaren Aufbau, der sich mit einfachen mathematischen Modellen beschreiben ließ) als auch praxismgerechte bauübliche Sanitärinstallationen betrachtet. Bei den Sanitärinstallationen handelte es sich um vier Duschwannen aus verschiedenen Werkstoffen (Stahl oder Acryl) und mit unterschiedlicher Montageweise (Polystyrol-Wannenträger oder Fußgestell) sowie drei bodenebene Duschelemente mit und ohne Körperschallisolation. Die idealisierten Quellen umfassten zwei teilflächige schwimmende Estriche in mineralischer und in Trockenbauweise und mit unterschiedlichen Abmessungen, eine verflieste Gefälleplatte aus Hartschaum mit und ohne elastische Unterlage sowie einen Kalksandstein, dessen Abmessungen so bemessen waren, dass er sich im interessierenden Frequenzbereich wie eine starre Masse ohne Eigenschwingungen verhielt. Zur Geräuschanregung der untersuchten Quellen dienten ein elektrodynamischer Schwingerreger (Shaker), ein Norm-Trittschallhammerwerk nach DIN EN ISO 10140-5, Anhang E, ein scharf gebündel-

ter auf die Bauteiloberfläche auftreffender Wasserstrahl (Körperschallgeräuschnormal, KGN) sowie ein Empa-Pendelfallhammer nach SIA 181, Anhang B.3.5 [6]. Da nicht alle möglichen Kombinationen der vier Erreger mit den verschiedenen Quellen Verwendung fanden, verblieben insgesamt etwa dreißig verschiedene Körperschallquellen, die in die Untersuchungen einbezogen wurden (nähere Erläuterungen hierzu siehe weiter unten).

- e) Akustische Charakterisierung der untersuchten Körperschallquellen. Um die Eigenschaften der Quellen zu beschreiben und Eingangsdaten für akustische Berechnungen bereitzustellen, mussten zunächst die erforderlichen schalltechnischen Kennwerte ermittelt werden. Dies erfolgte messtechnisch mit Hilfe spezieller Versuchsaufbauten. Benötigt werden zum einen die Quellenimpedanz  $Y_Q$  und zum anderen wahlweise die freie Schnelle  $v_0$  oder die Kurzschlusskraft  $E_K$  der Quelle. In dem durchgeführten Forschungsvorhaben wurde die freie Schnelle verwendet, da sie sich für die hier betrachteten Quellen einfacher bestimmen lässt. Wegen der aufwändigen Messungen, die zur Quellencharakterisierung erforderlich sind, wurde die Charakterisierung auf acht repräsentative Quellen beschränkt, die später in die durchgeführten akustischen Berechnungen Eingang fanden. Da die Quellen dabei jeweils in Verbindung mit den sechs oben erwähnten Decken betrachtet wurden, ergab sich trotz der zahlenmäßigen Beschränkung ein umfangreiches und repräsentatives Untersuchungsspektrum.
- f) Messung des Installations-Schallpegels. Nach der Ermittlung ihrer akustischen Eigenschaften wurden die untersuchten Körperschallquellen nacheinander auf den betrachteten Decken montiert und in Betrieb genommen. Die beiden wichtigsten Messgrößen waren die von der Quelle in die Decke eingeleitete Körperschall-Leistung sowie der resultierende Installations-Schallpegel im Raum unterhalb der Decke. Daneben wurden noch weitere Messgrößen erfasst, die hauptsächlich zur Kontrolle der Messdaten sowie als Grundlage für ergänzende Untersuchungen dienten. Beispiele hierfür sind der Luftschallpegel im Senderraum oberhalb der Decke (zur Überprüfung des Luftschallanteils an der Schallübertragung) sowie die Eingangsadmittanz der Quelle und die vom Erreger in die Quelle eingeleitete Körperschall-Leistung und Wechselkraft (die drei letztgenannten Messungen beschränkten sich auf die Geräuschanregung mit dem Shaker). Insgesamt (einschließlich Test- und Wiederholungsmessungen) ergaben sich auf diese Weise fast siebenhundert Einzelmessungen, wobei die zur akustischen Charakterisierung der untersuchten Decken und Quellen durchgeführten Untersuchungen nicht mit eingerechnet sind.
- g) Auswertung der Daten und Modellentwicklung. Nach dem Vorliegen der Messergebnisse wurden die ermittelten Daten systematisch gesichtet, geordnet und ausgewertet. Ziel dieses Arbeitsschrittes war es, akustische Zusammenhänge und Gemeinsamkeiten zwischen den untersuchten Bauteilen und Quellen aufzufinden und daraus wenn möglich Planungshinweise und Konstruktionsempfehlungen abzuleiten. Außerdem wurde versucht, ein einfaches Prognoseverfahren zu entwickeln, mit dem sich aus vorhandenen Messdaten aus dem Massivbau Rückschlüsse auf den für dieselbe Quelle im Holzbau zu erwartenden Installations-Schallpegel ziehen lassen. Dies erwies sich jedoch – zumindest in den meisten Fällen aus der baulichen Praxis – als schwierig. Erfolgreicher war hingegen der Versuch, das Be-

rechnungsverfahren nach DIN EN 12354-5 in entsprechend modifizierter Form auch im Holzbau zu verwenden. Dabei wurde auf Grundlage der akustischen Kennwerte von Quelle und Decke zunächst die in die Decke eingeleitete Körperschall-Leistung und daraus im zweiten Schritt unter Verwendung der gemessenen Körperschalldämmung der Decke der resultierende Schallpegel im Empfangsraum unter der Decke berechnet. Es handelte sich dabei wie schon erwähnt um keine eigenständige Entwicklung eines neuen Berechnungsverfahrens, sondern um die Anpassung und Erprobung eines aus dem Bereich des Massivbau bekannten Modells an die geänderten akustischen Verhältnisse im Holz- und Leichtbau.

Nach den vorangehenden Ausführungen zur Vorgehensweise des Forschungsvorhabens ist es zum besseren Verständnis erforderlich, die besondere Beschaffenheit von Körperschallquellen aus dem Sanitärbereich ein wenig genauer zu betrachten. Sanitärinstallationen unterscheiden sich von anderen Körperschallquellen unter anderem dadurch, dass die Geräuschanregung vielfach durch einen externen Erreger (bei den betrachteten Duschwannen z. B. durch einen auf die Wannenoberfläche auftreffenden Brausestrahl) erfolgt: Daher lässt sich die Quelle, wie in Abb. 2 schematisch dargestellt, in drei verschiedene Bestandteile unterteilen:



**Abb. 2:** Geräuschenstehung in einer Sanitärinstallation am Beispiel einer durch einen Brausestrahl angeregten Duschwanne.

- 1) Die Erzeugung des Körperschalls erfolgt zumeist durch einen äußeren Erreger, der im Falle der dargestellten Duschwanne typischerweise aus dem aus einem Brausekopf austretenden und auf die Wannenoberfläche aufprallenden Wasserstrahl besteht. Ebenso gut sind jedoch auch die Anregung durch einen menschlichen Geher oder eine Schlaganregung (z. B. beim Herabfallen eines Seifenstücks oder einer Shampooflasche) möglich. Die in dem Forschungsvorhaben eingesetzten Erreger (Wasserstrahl aus Körperschallgeräuschnormal, Norm-Trittschallhammerwerk und Pendelfallhammer) tragen diesen Anregungsarten Rechnung.
- 2) Durch die äußere Anregung wird die Duschwanne in Schwingungen versetzt. Das resultierende Körperschallfeld, das sich dadurch auf der Wanne ausbildet, hängt von zahlreichen verschiedenen Faktoren ab. Neben dem Material, der Wandstärke, der geometrischen Form und den Abmessungen der Wanne spielen auch die Lagerung der Wannenträger (elastische Auflagen, Kontakt zu Dichtfugen, etc.) sowie die innere Dämpfung des Systems (z. B. durch das in der Praxis vielfach übliche Bekleben der Wannenunderseite mit körperschalldämpfenden Belägen) eine wichtige Rolle. Zusätzlich haben auch noch die Anregeposition auf der Wannenoberfläche und eine mögliche statische Vorbelastung der Wanne – z. B. durch eine menschl-

che Person oder in der Wanne angestautes Wasser – Einfluss auf die akustischen Eigenschaften (bei den hier durchgeführten Messungen wurde des Gewicht eines menschlichen Nutzers durch ein Wasserfass nachgebildet, das auf zwei elastisch unterlegten Mauersteinen gelagert war und ein Gesamtgewicht von ca. 65 kg aufwies). Das Schwingungsverhalten von Wannen ist deshalb zumeist sehr kompliziert und lässt sich rechnerisch nicht vorherbestimmen (das im gilt im übrigen in ähnlicher Weise für die meisten Sanitärinstallationen).

- 3) Um die Schalleinleitung ins Bauwerk zu reduzieren, verfügen Sanitärobjekte im Normalfall über Körperschallisolierende Befestigungselemente. Die Auslegung dieser Elemente (insbesondere natürlich die dynamische Steifigkeit bzw. die resultierende Resonanzfrequenz) bestimmen in entscheidendem Maße die Qualität des baulichen Schallschutzes. Neben den in Abb. 2 dargestellten Wannenfüßen mit elastischen Kappen kommen bei bodenebenen Duschflächen in der Praxis häufig auch voll- oder teilflächige elastische Unterlagen aus Gummigranulatmatten oder Trittschalldämmplatten zum Einsatz.

Wie sich den obigen Ausführungen entnehmen lässt, ist das akustische Verhalten von Sanitärinstallationen oft sehr kompliziert. Es vorherzuberechnen wäre deshalb – falls überhaupt möglich – äußerst aufwändig. Es ist deshalb allgemein üblich, derartige Quellen vereinfachend als "Black Box" zu betrachten und die Körperschallübertragung ins Bauwerk vereinfachend mittels messtechnisch ermittelter akustischer Kennwerte zu beschreiben. Im Normalfall – unter der Annahme punktförmiger, senkrecht gerichteter Krafteinleitung ohne den Einfluss von Biegemomenten – werden als Kennwerte die Quellenimpedanz  $\underline{Y}_Q$  und die freie Schnelle  $\underline{v}_0$  herangezogen (die Unterstreichung der Formelzeichen weist darauf hin, dass es sich um komplexe Größen mit Real- und Imaginärteil handelt). Bei realen Sanitärinstallationen ist die wirkliche Situation natürlich komplizierter, denn die Schallübertragung erfolgt entweder linienförmig oder flächig oder auch an mehreren Punkten gleichzeitig. In erster Näherung kann jedoch erfahrungsgemäß auch hier mit der beschriebenen vereinfachten Darstellungsweise gerechnet werden.

Wird einer der drei Bestandteile der Körperschallquelle verändert, so ändern sich die Eigenschaften der Quelle insgesamt, so dass sich im Prinzip eine neue Quelle mit unterschiedlichen akustischen Eigenschaften ergibt. Dies führt zu einer großen Anzahl von Variationsmöglichkeiten bei der Auswahl der zu untersuchenden Quellen. Das durchgeführte Forschungsvorhaben konzentrierte sich dabei vor allem auf die Verwendung unterschiedlicher Erreger (wie schon oben erwähnt kamen vier verschiedene Erreger zum Einsatz) sowie die Variation der schwingenden Struktur (vier Duschwannen, drei bodenebene Duschflächen und sechs idealisierte Quellen mit unterschiedlichem Aufbau).

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen umfassten wie schon erwähnt vor allem Holzbalkendecken, wobei die Schallübertragung von der Oberseite zur Unterseite der Decke erfolgte. Dies stellt die einfachste in der Praxis auftretende Übertragungssituation dar und ist deshalb für den hier untersuchten Themenbereich, der vor allem die Charakterisierung von Körperschallquellen und die Wechselwirkung von Quelle und angeregter Struktur umfasste, in besonderer Weise geeignet. Die Übertragung von Installationsgeräuschen zwischen übereinanderliegenden Räumen

ist auch praktisch von Bedeutung, da hier oft besonders hohe Pegel auftreten, so dass ein erhöhter Bedarf für Schallschutzmaßnahmen besteht.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens lassen sich darüber hinaus auf einfache Weise auf andere bauliche Situationen übertragen, z. B. wenn sich der Empfangsraum neben oder diagonal über oder unter dem Installationsraum befindet. In diesem Fall muss lediglich die bauliche Übertragungsfunktion entsprechend angepasst werden (das Körperschalldämm-Maß der Decke wird durch die gemessene Körperschalldämmung zwischen dem angeregten Bauteil und dem Empfangsraum ersetzt). Das ift Rosenheim hat kürzlich ein Forschungsvorhaben zur Untersuchung von Übertragungsfunktionen im Holzbau abgeschlossen [7], das den vorliegenden Bericht in dieser Hinsicht gut ergänzt.

### 3 Stand der Forschung

Wie bei derartigen Forschungsvorhaben üblich, wurde vor dem Beginn der praktischen Bearbeitung zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt. Ziel der Recherche war es, den derzeitigen Kenntnisstand zu dem untersuchten Thema zusammenzutragen und die bereits vorhandenen Ergebnisse und Erfahrungen soweit möglich in die geplanten Untersuchungen einzubeziehen.

Die Geräusche von Wasserinstallationen werden im IBP schon seit vielen Jahren untersucht, unter anderem in der der Arbeitsgruppe Bauakustik angegliederten akkreditierten bauakustischen Prüfstelle, in der ständig Messungen an Wasserinstallationen aller Art erfolgen [8]. Obgleich sich die Untersuchungen vor allem auf den Massivbau konzentrieren, stehen außerdem auch Prüfstände zur Messung von Installationsgeräuschen in Verbindung mit Leichtbauwänden sowie neuerdings auch mit Holzbalkendecken zur Verfügung. Auch Forschungsvorhaben zu Installationsgeräuschen im Leichtbau gab es im IBP schon vor vielen Jahren [9 - 12]. Allerdings ging es damals weniger darum, die grundlegenden akustischen Vorgänge zu untersuchen und geeignete Prognoseverfahren zu erarbeiten. Das Ziel bestand viel mehr vor allem darin, auf empirischer Basis Schallschutzmaßnahmen zur Verringerung von Installationsgeräuschen in der baulichen Praxis zu entwickeln.

Seit damals wurden im IBP zahlreiche weitere Untersuchungen zum Thema Installationsgeräusche durchgeführt [13 - 25]. Der größte Teil dieser Arbeiten beschäftigte sich mit praktischer Fragestellung aus dem Bereich des baulichen Schallschutzes. Darüber hinaus wurden jedoch auch grundlegende Untersuchungen zur Körperschallübertragung in Bauten und zur Charakterisierung von Körperschallquellen durchgeführt [26 - 28]. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse fließen direkt in das aktuelle Forschungsvorhaben ein.

Die Entstehung und Übertragung von Körperschall in Bauten bildet schon seit mehreren Jahrzehnten den Gegenstand bauakustischer Forschungsaktivitäten. Viele grundlegende Forschungsergebnisse stammen aus der Arbeitsgruppe um Prof. Gibbs an der Universität Liverpool. Zahlreiche Absolventen und Doktoranden aus dieser Gruppe haben nach ihrem Ausscheiden die Forschungen an ihrer neuen Arbeitsstätte fortgeführt und

so gleichfalls zur Erweiterung des Kenntnisstandes beigetragen. So sind die Arbeiten aus diesem Personenkreis maßgeblich in die Erarbeitung der entsprechenden Mess- und Berechnungsnormen, wie z. B. DIN EN 12354-5 und DIN EN 15657 [29], eingeflossen und finden sich in den dortigen Literaturverzeichnissen wieder. Einige Beispiele unter vielen sind Veröffentlichungen von Gibbs, Moorhouse, Späh, Bonhoff und Höller [30 - 45]. Im Hinblick auf die akustische Charakterisierung von Körperschallquellen sind außerdem Untersuchungsergebnisse von Vercammen, Janssens und Lennström zu erwähnen [46 - 49]. In Deutschland findet neben dem IBP vor allem an der Hochschule für Technik in Stuttgart, der Technischen Hochschule Rosenheim sowie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig Forschung zum Thema Körperschall in Bauten statt [50 - 54]. Viele praktische Erfahrungswerte lieferte beispielsweise ein Forschungsvorhaben der PTB, in dem Installationsgeräusche im Fertighausbau untersucht wurden [55].

Nachdem die Eigenschaften einfacher Körperschallquellen (d. h. Quellen mit punktförmiger, senkrechter Krafteinleitung) weitgehend verstanden waren, wandten sich die Untersuchungen komplizierteren Quellen mit mehreren Kontaktpunkten zum Bauwerk sowie der Anregung durch Biegemomente zu [56 - 60]. Außerdem wurden Betrachtungen zur Unsicherheit der für die Körperschallübertragung im Massivbau entwickelten Berechnungsmodelle angestellt [61, 62].

Da auch der Holz- und Leichtbau zunehmend an Bedeutung gewann, wurde verstärkt auch in diesem Bereich mit Forschungsaktivitäten zur Einleitung und Übertragung von Körperschall begonnen [63 - 75]. Allerdings sind die akustischen Verhältnisse hier weitaus komplizierter als im Massivbau. Zum einen deshalb, weil sich die Körperschallübertragung in und zwischen mehrschaligen Bauteilen nicht ohne weiteres berechnen lässt. Zum anderen ist die Quellenadmittanz im Massivbau normalerweise weitaus größer als die Eingangsadmittanz des angeregten Bauteils, so dass die eingeleitete Kraft unabhängig vom Bauteil immer gleich bleibt (in der Fachwelt bezeichnet man eine Körperschallquelle, auf die dies zutrifft, als Kraftquelle). In Holzbau sind Quellen- und Eingangsadmittanz hingegen meist von gleicher Größenordnung, so dass eine Wechselwirkung zwischen Quelle und angeregtem Bauteil besteht, was akustische Berechnungen erheblich erschwert.

Die im Bereich des Holz- und Leichtbaus durchgeführten Untersuchungen konzentrierten sich deshalb bislang vorwiegend auf einfache Quellen mit punktförmigem Kontakt zum Bauwerk, während über Linien- und Flächenquellen bislang nur wenig bekannt ist. Außerdem fehlen vielfach noch praktische Erfahrungen darüber, wie sich reale Sanitärinstallationen im Kontakt mit leichten mehrschaligen Bauteilen verhalten und welche Wechselwirkung in diesem Fall zwischen Quelle und angeregter Struktur bestehen. Das durchgeführte Forschungsvorhaben soll einen Beitrag dazu leisten, die genannten Wissenslücken zu schließen und – analog zum Massivbau – ein einfaches und zuverlässiges Verfahren zur Prognose des Installations-Schallpegels im Holz- und Leichtbau zu entwickeln.

## 4 Akustische Grundlagen

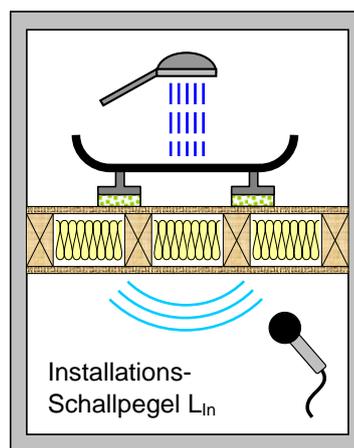
Im nachfolgenden Abschnitt sollen in kurzer Form die wichtigsten Grundlagen zum Verständnis der durchgeführten Untersuchungen und der ermittelten Ergebnisse dargestellt werden. Die Ausführungen umfassen ausschließlich den Bereich der Bauakustik und beschränken sich auf die Themen, die von zentraler Bedeutung für das Forschungsvorhaben sind.

### 4.1 Installations-Schallpegel

Als Installations-Schallpegel  $L_{in}$  bezeichnet man den von der betrachteten Installation im schutzbedürftigen Raum hervorgerufenen Schallpegel. Der Pegel ist in DIN 4109-4 [76] definiert und wird dort für Messungen am Bau durch das Formelzeichen  $L_{AF,max,n}$  beschrieben. Hierbei weisen die Indizes A und F darauf hin, dass die Messung mit der Zeitbewertung F (= Fast) erfolgt und dass das gemessene Terzspektrum mit der Frequenzbewertung A (zur Nachbildung der Frequenzempfindlichkeit des menschlichen Gehörs) gewichtet wird. Bei zeitlichen veränderlichen Geräuschen ist der maximale Pegel maßgebend, der innerhalb der Messzeit im Empfangsraum auftritt – deshalb der Index max im Formelzeichen. Der Index n weist schließlich darauf hin, dass es sich um einen normierten Pegel handelt, der auf eine fiktive Schallabsorptionsfläche von  $A_0 = 10 \text{ m}^2$  im Empfangsraum bezogen ist (auf diese Weise wird der raumakustische Einfluss des Empfangsraums aus dem Messergebnis eliminiert):

$$L_{AF,max,n} = L_{AF,max} + 10 \lg \left( \frac{A}{A_0} \right) \quad \text{mit } A_0 = 10 \text{ m}^2. \quad (1)$$

Hierbei  $A = 0,16 V/T$  die äquivalente Absorptionsfläche in  $\text{m}^2$ , während V und T das Volumen des Empfangsraums in  $\text{m}^3$  sowie die Nachhallzeit in s bezeichnen.



**Abb. 3:** Schematische Darstellung zur Definition des Installations-Schallpegels  $L_{in}$ . Es handelt sich um den von der Installation im Empfangsraum erzeugten A-bewerteten und auf  $A_0 = 10 \text{ m}^2$  bezogenen Schalldruckpegel.

Die Verwendung des maximal auftretenden Schallpegels hat bei Messungen am Bau den Sinn, den Höchstwert der auftretenden Lärmbelastung zu erfassen, damit ggfs. erforderliche Schallschutzmaßnahmen daran bemessen werden können. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist jedoch, dass der Maximalpegel starken Schwankungen unterliegt und sich zumeist nur schlecht reproduzieren lässt. Bei Messungen im Prüfstand verwendet man deshalb im Hinblick auf eine verbesserte Reproduzierbarkeit bei stationären Geräuschen statt des Maximalwertes in der Regel den zeitlich gemittelten Pegel (energieäquivalente Mittelung). Der Mittelungspegel ist zwar eine wenig geringer als der Maximalpegel (bei Abwassergeräuschen beträgt der Unterschied erfahrungsgemäß weniger als 3 dB, was in ähnlicher Weise auch für Anregung von Duschwannen mit einem Körperschallgeräuschnormal zutrifft). Andererseits kommt es bei Prüfstandsmessungen oft weniger auf den absoluten Wert des Pegels an, sondern vielmehr darauf, unterschiedliche Installationen miteinander zu vergleichen oder die Wirkung von Lärm-minderungsmaßnahmen zu ermitteln.

Ein weiterer Unterschied zu Messungen am Bau besteht darin, dass in der hierfür maßgebenden Norm DIN EN ISO 10052 [77] für die Messungen ein Frequenzbereich von mindestens 100 - 2500 Hz vorgesehen ist. Im Prüfstand verwendet man demgegenüber normalerweise den vollen bauakustischen Frequenzbereich von 50 - 5000 Hz. Wegen der erwähnten Unterschiede wird im folgenden für den Installations-Schallpegel statt des normgerechten Formelzeichens  $L_{AF,max,n}$  die kürzere Bezeichnung  $L_{In}$  herangezogen. Diese Bezeichnung, die der vorangehenden Ausgabe der DIN 4109 von 1989 entstammt, hat sich durch langen Gebrauch in der Fachwelt eingebürgert.

Der Installations-Schallpegel ist eine frequenzabhängige Größe und wird deshalb als Terzspektrum gemessen. Zum Vergleich mit den geltenden Schallschutzanforderungen wird jedoch eine Einzahlangabe benötigt. Deshalb müssen die einzelnen Terzen energetisch zu einem Gesamtschallpegel aufaddiert werden, wobei die Addition über die 21 Terzen von 50 - 5000 Hz erfolgt:

$$L_{In} = 10 \lg \left( \sum_{i=1}^{21} 10^{L_{In,i}/10} \right) \text{ dB.} \quad (2)$$

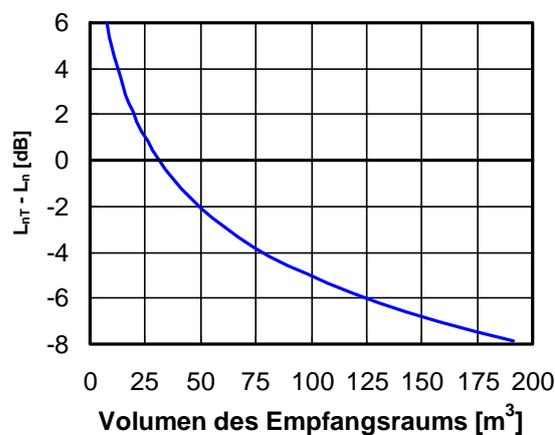
Bei den Schallschutzanforderungen für Installationsgeräusche ist zwischen den bau-rechtlich verbindlichen Mindestanforderungen nach DIN 4109-1 und den Vorschlägen für erhöhten Schallschutz nach VDI 4100 zu unterscheiden. Die Mindestanforderungen legen fest, dass in Wohn- und Schlafräumen ein Installations-Schallpegel von maximal 30 dB(A) zulässig ist (für Arbeits- und Unterrichtsräume gilt ein 5 dB höherer Wert). Bei den Vorschlägen für erhöhten Schallschutz nach VDI 4100 wird zwischen den Schallschutzstufen SSt I, SSt II und SSt III für geringen, durchschnittlichen und erhöhten Wohnkomfort unterschieden. Die zugehörigen Anforderungen betragen 30 dB(A), 27 dB(A) sowie 24 dB(A). Alle angegebenen Werte beziehen sich auf die Schallübertragung in einen fremden Wohn- oder Arbeitsbereich.

Leider lassen sich die Anforderungen nach DIN 4109 und VDI 4100 nicht direkt miteinander vergleichen, da die VDI 4100 den Installations-Schallpegel auf eine Nachhallzeit

von  $T_0 = 0,5$  s bezieht, während die DIN 4109 wie schon erwähnt eine äquivalente Absorptionsfläche von  $A_0 = 10$  m<sup>2</sup> verwendet. Der auf die Absorptionsfläche bezogene Pegel  $L_n$  und der auf die Nachhallzeit bezogenen Wert  $L_{nT}$  sind über das Volumen des Empfangsraums  $V$  (in der Einheit m<sup>3</sup>) miteinander verknüpft:

$$L_{nT} = L_n + 10 \lg \left( \frac{A_0 T_0}{0,16 V} \right) \text{ dB} \cong L_n - 10 \lg(V) \text{ dB} + 15 \text{ dB}. \quad (3)$$

Der durch die obige Gleichung beschriebene Zusammenhang ist im nachfolgenden Diagramm grafisch dargestellt. Für Räume mit einem Volumen von weniger als 31,2 m<sup>3</sup> weist  $L_{nT}$  einen höheren Wert als  $L_n$  auf, bei größeren Räumen verhält es sich umgekehrt. Die Grenze, bei der beide Werte übereinstimmen, liegt also bei einem Raumvolumen von  $V = 31,2$  m<sup>3</sup>.



**Abb. 4:** Differenz zwischen dem auf  $T_0 = 0,5$  s bezogenen Schallpegel  $L_{nT}$  nach VDI 4100 und dem auf  $A_0 = 10$  m<sup>2</sup> bezogenen Wert  $L_n$  nach DIN 4109 in Abhängigkeit vom Empfangsraumvolumen.

## 4.2 Luft- und Körperschalldämmung

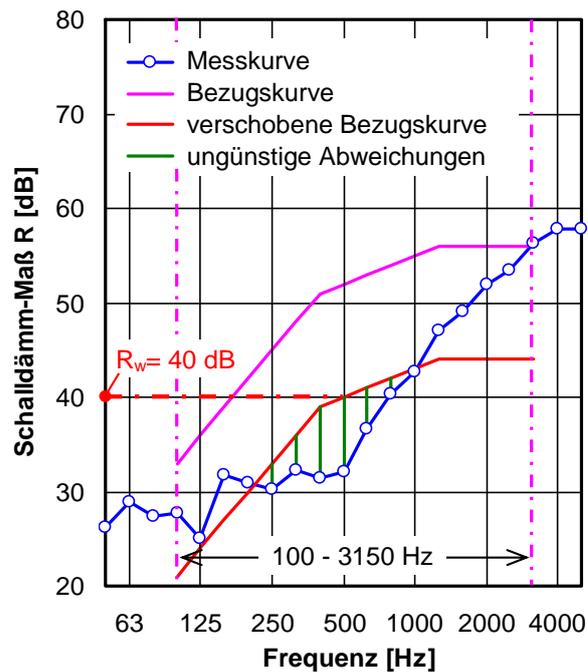
Die Schallschutzwirkung von Bauteilen gegenüber Luftschallanregung wird durch ihr Schalldämm-Maß  $R$  gekennzeichnet, das als logarithmisches Verhältnis zwischen der auftreffenden und der durchgelassenen Schall-Leistung,  $P_1$  und  $P_2$ , definiert ist:

$$R = 10 \lg \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \text{ dB}. \quad (4)$$

Die Schalldämmung ist eine frequenzabhängige Größe und steigt mit zunehmender Frequenz an. Der Anstieg erfolgt allerdings nicht gleichmäßig, sondern weist infolge unterschiedlicher akustischer Einflüsse, wie z. B. Koinzidenzeffekt und Bauteilresonanzen, mehr oder weniger ausgeprägte Strukturen (Minima und Maxima) auf. So weisen Holzbalkendecken (ebenso wie andere zweischalige Bauteile) im tief- und hochfrequenten Bereich zwei charakteristische Dämmungseinbrüche auf, die auf die Doppelschalenschalenresonanz der zweischaligen Konstruktion bzw. auf die Koinzidenzfrequenz der Beplankungsplatten zurückzuführen ist. Zwischen den beiden Einbrüchen steigt die Schall-

dämmkurve mit ca. 12 dB / Oktave an, was etwa der doppelten Steigung wie bei einer Massivwand entspricht.

Während die Messung der Schalldämmung frequenzabhängig (zumeist in Terzen) erfolgt, werden für die schalltechnische Planung und den Vergleich mit den Schallschutzanforderungen in der Regel Einzahlangaben verwendet. Die zentrale Einzahlangabe für die Luftschalldämmung von Bauteilen ist das bewertete Schalldämm-Maß  $R_w$ . Die Berechnung von  $R_w$  erfolgt gemäß DIN EN ISO 717-1 [78] durch Vergleich der Messkurve mit einer genormten Bezugskurve. Das verwendete Verfahren ist in der nachfolgenden Abbildung veranschaulicht:



**Abb. 5:** Beispiel für die Berechnung des bewerteten Schalldämm-Maßes  $R_w$ . Die Berechnung erfolgt durch vertikale Verschiebung der Bezugskurve in ganzzahligen Schritten. Die Verschiebung wird so lange fortgesetzt, bis die Summe der ungünstigen Abweichungen so groß wie möglich wird, aber nicht mehr als 32,0 dB beträgt (eine ungünstigste Abweichung liegt vor, wenn der Messwert unter der Bezugskurve liegt). Das bewertete Schalldämm-Maß entspricht dem Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz (im dargestellten Beispiel ergibt sich  $R_w = 40$  dB).

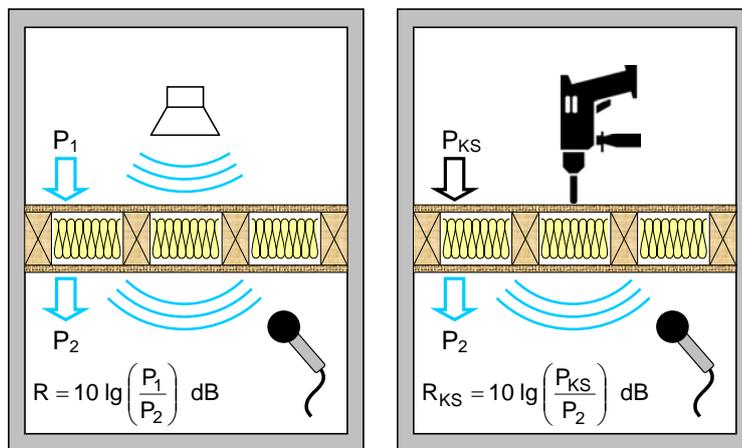
Für die akustische Planung in der baulichen Praxis wird das bewertete Schalldämm-Maß zumeist als ganzzahliger Wert gebildet. Da dies jedoch zwangsläufig eine Berechnungsunsicherheit von  $\pm 0,5$  dB nach sich zieht, wird  $R_w$  im vorliegenden Bericht durchweg mit einer Genauigkeit von 0,1 dB angegeben, indem die Bezugskurve gemäß DIN EN ISO 717-1 in Schritten von 0,1 dB anstatt 1 dB verschoben wird.

Die Körperschallübertragung in Gebäuden in Holz- und Leichtbauweise wird in der Bauakustik zumeist durch eine Übertragungsfunktion beschrieben, die die durch die Quelle in das angeregte Bauteil eingeleitete Körperschall-Leistung und die in den Emp-

fangsraum abgestrahlte Luftschall-Leistung zueinander in Beziehung setzt. Im Sinne einer einheitlichen Darstellungsweise bietet es sich an, die Übertragungsfunktion analog zur Luftschalldämmung als Körperschalldämm-Maß zu definieren:

$$R_{KS} = 10 \lg \left( \frac{P_{KS}}{P_2} \right) \text{ dB} . \quad (5)$$

Hierbei bezeichnet  $P_{KS}$  die in das Bauwerk eingeleitete Körperschall-Leistung und  $P_2$  die resultierende Luftschall-Leistung, die in den Empfangsraum abgestrahlt wird. Die Analogie zwischen den Schalldämm-Maßen für die Luft- und Körperschalldämmung,  $R$  und  $R_{KS}$ , ist in der nachfolgenden Abbildung zur besseren Veranschaulichung schematisch dargestellt:



**Abb. 6:** Definition der Schalldämm-Maße für die Luftschalldämmung,  $R$ , und für die Körperschalldämmung,  $R_{KS}$ .

In dem in der obigen Weise definierten Körperschalldämm-Maß sind alle zwischen der Einleitungsstelle des Körperschalls und dem Empfangsraum vorhandenen Übertragungswege innerhalb des Bauwerks enthalten (also z. B. auch flankierende Wände). Es entspricht damit dem Bau-Schalldämm-Maß mit Nebenwegen aus dem Bereich der Luftschalldämmung, dem in DIN 4109 das Symbol  $R'$  zugeordnet ist.

Das Körperschalldämm-Maß wird im Normalfall immer als frequenzabhängige Größe, d. h. in der Regel als Terzspektrum eingesetzt. Eine Einzahlangabe, wie das bewertete Schalldämm-Maß bei der Luftschalldämmung, wäre hier nicht sinnvoll und existiert daher für die Körperschalldämmung nicht.

Möchte man unter Verwendung des Körperschalldämm-Maßes aus der in das Bauwerk eingeleiteten Körperschall-Leistung den resultierenden Installations-Schallpegel im Empfangsraum berechnen, so erhält man nach kurzer Rechnung den Ausdruck

$$L_{In} = L_{W,KS} - R_{KS} - 4 \text{ dB} + K_A . \quad (6)$$

Hierbei bezeichnen  $L_{W,K5}$  den Pegel der eingeleiteten Körperschall-Leistung und  $R_{K5}$  das Körperschalldämm-Maß. Die Konstante mit dem Wert von 4 dB und die Frequenzbewertung  $K_A$  erscheinen in der Gleichung, weil der Installations-Schallpegel A-bewertet und auf eine Absorptionsfläche von 10 m<sup>2</sup> bezogen wird.

### 4.3 Trittschalldämmung

Grundlegende Messgröße für die Trittschalldämmung von Deckenkonstruktionen ist der Norm-Trittschallpegel  $L_n$ . Die Bestimmung des Norm-Trittschallpegels erfolgt gemäß DIN EN ISO 10140-3 (bei Messungen im Prüfstand) bzw. DIN EN ISO 16283-2 (bei Messungen am Bau) [79, 80]. Bis auf kleinere Unterschiede ist die Vorgehensweise in beiden Fällen gleich: Die Oberseite der Decke wird mit einem Norm-Hammerwerk nach DIN EN ISO 10140-5, Anhang E angeregt und der resultierende Schallpegel  $L_i$  im Empfangsraum (gemittelt über mehrere verschiedene Positionen des Hammerwerks) unter der Decke gemessen. Zur Bestimmung des Norm-Trittschallpegels wird zu  $L_i$  eine Korrektur zur Berücksichtigung der Nachhallzeit im Empfangsraum addiert:

$$L_n = L_i + 10 \lg \left( \frac{A}{A_0} \right) \text{ dB} = L_i + 10 \lg \left( \frac{0,016 V}{T} \right) \text{ dB}, \quad (7)$$

mit  $A = 0,16 V / T =$  äquivalente Schallabsorptionsfläche in m<sup>2</sup>,  
 $A_0 = 10 \text{ m}^2$  (Bezugs-Absorptionsfläche),  
 $V =$  Volumen des Empfangsraums in m<sup>3</sup>,  
 $T =$  Nachhallzeit im Empfangsraum in s.

Die Messung ist so vorzunehmen, dass ausschließlich der von der Decke in den Empfangsraum abgestrahlte Trittschall erfasst wird. Da bei der Anregung der Decke durch das Norm-Hammerwerk jedoch im Senderaum ein hoher Luftschallpegel entsteht, der teilweise auch in den Empfangsraum übertragen wird, ist gegebenenfalls (wenn sich Trittschall- und Luftschallpegel um weniger als 10 dB unterscheiden) eine rechnerische Korrektur vorzunehmen. Hierbei ist folgendermaßen vorzugehen:

- Zunächst wird die Decke wie üblich mit dem Hammerwerk angeregt. Dabei werden die im Sende- und Empfangsraum erzeugten Schallpegel  $L_{TS}$  und  $L_i$  gemessen.
- Anschließend wird im Senderaum ein Lautsprecher in Betrieb genommen, wobei die durch den Lautsprecher im Sende- und Empfangsraum hervorgerufenen Schallpegel,  $L_{LS}$  und  $L_{LR}$ , bestimmt werden. Aus den gemessenen Werten wird die Differenz  $D = L_{LS} - L_{LR}$  gebildet.

Unter Verwendung der bei den Messungen ermittelten Ergebnisse wird der Norm-Trittschallpegel  $L_n$  wie folgt berechnet:

$$L_n = 10 \lg \left( 10^{L_i/10 \text{ dB}} - 10^{(L_{TS}-D)/10 \text{ dB}} \right) \text{ dB} + 10 \lg \left( \frac{A}{A_0} \right) \text{ dB}. \quad (8)$$

Beträgt die Differenz zwischen dem Trittschall- und dem Luftschallanteil des Messsignals,  $L_i - (L_{TS} - D)$ , weniger als 3 dB, so ist eine rechnerische Korrektur nicht möglich

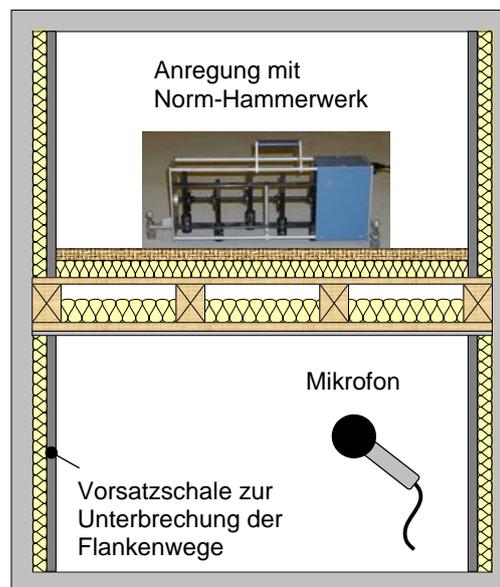
und die Trittschalldämmung kann nicht fehlerfrei gemessen werden. Wird die Messung durch Hintergrundgeräusche beeinträchtigt, so sind die Messwerte vor dem Einsetzen in die obigen Gleichungen einer Fremdgeräuschkorrektur nach DIN EN ISO 10140-4 [81] zu unterziehen:

$$L = 10 \lg \left( 10^{L_{sb}/10\text{dB}} - 10^{L_b/10\text{dB}} \right) \text{dB}, \quad (9)$$

mit  $L$  = korrigierter Signalpegel,  
 $L_{sb}$  = Gesamtpegel aus Signal und Hintergrundgeräusch,  
 $L_b$  = Hintergrundgeräuschpegel.

Gleichung (9) ist anzuwenden, wenn sich die Differenz zwischen Gesamtpegel und Hintergrundgeräuschpegel,  $L_{sb} - L_b$ , im Bereich von  $6 \text{ dB} < L_{sb} - L_b < 15 \text{ dB}$  bewegt. Für  $L_{sb} - L_b \leq 6 \text{ dB}$  ist vom Messwert eine Korrektur von 1,3 dB zu subtrahieren, d. h. es gilt  $L = L_{sb} - 1,3 \text{ dB}$ .

Der Messaufbau zur Bestimmung des Norm-Trittschallpegels ist in der nachfolgenden Abbildung vereinfacht dargestellt:



**Abb. 7:** Messung des Norm-Trittschallpegels einer Holzbalkendecke in einem bauakustischen Deckenprüfstand (schematisch). Um die Schall-Längsleitung über die flankierenden Bauteile zu unterbinden, sind die Wände in Send- und Empfangsraum mit Vorsatzschalen versehen.

Wie aus der obigen Abbildung zu ersehen ist, erfolgt die Trittschallübertragung im Prüfstand wegen der an den Wänden angebrachten Vorsatzschalen im Wesentlichen nur über die untersuchte Decke. Am Bau sind hingegen normalerweise keine Vorsatzschalen vorhanden, so dass zusätzlich Schall über die flankierenden Wände übertragen wird. Der Trittschallpegel einer Decke am Bau ist deshalb stets höher als der im Prüfstand gemessene Wert. Da das Vorhandensein von Flankenwegen durch einen an das

Formelzeichen angehängten Apostroph gekennzeichnet wird, gilt demnach für den im Prüfstand und am Bau gemessenen Norm-Trittschallpegel  $L_n \leq L'_n$ .

Um die akustische Wirkung von Deckenauflagen, wie z. B. schwimmenden Estrichen, zu kennzeichnen, verwendet man die Trittschallminderung

$$\Delta L = L_{n0} - L_n, \quad (10)$$

wobei  $L_n$  und  $L_{n0}$  den gemessenen Norm-Trittschallpegel der Rohdecke mit und ohne Auflage bezeichnen. Die genaue Vorgehensweise, die bei der Messung der Trittschallminderung anzuwenden ist, ist in DIN EN ISO 10140-1, Anhang H [82] beschrieben.

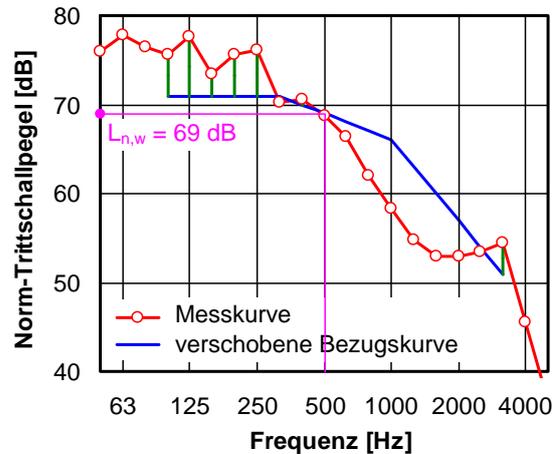
Der Norm-Trittschallpegel und die Trittschallminderung sind frequenzabhängig und werden zumeist in Terzen gemessen. Statt der ermittelten Frequenzspektren werden für die praktische Anwendung jedoch vielfach Einzahlangaben benötigt, beispielsweise um die Einhaltung der geltenden Schallschutzanforderungen zu überprüfen oder um die Trittschalldämmung unterschiedlicher Konstruktionen direkt miteinander zu vergleichen. Deshalb werden aus den gemessenen Terzspektren nach DIN EN ISO 717-2 [83] Einzahlangaben gebildet, die als zentrale Grundlage für den baulichen Schallschutznachweis nach DIN 4109 dienen.

Die wichtigste Einzahlangabe für den Trittschallschutz ist der bewertete Norm-Trittschallpegel  $L_{n,w}$ , der nach DIN EN ISO 717-2 mittels einer genormten Bezugskurve aus dem gemessenen Norm-Trittschallpegel  $L_n$  berechnet wird. Die Berechnung erfolgt in folgenden Schritten:

- a) Darstellung der Messwerte und der genormten Bezugskurve als Terzspektren. Die Bezugskurve umfasst den Frequenzbereich von 100 - 3150 Hz. Frequenzen außerhalb dieses Bereichs werden bei der Bildung des bewerteten Norm-Trittschallpegels nicht berücksichtigt.
- b) Verschiebung der Bezugskurve in 1 dB-Schritten in Richtung der Ordinaten-Achse bis die Summe der ungünstigen Abweichungen in den einzelnen Terzen so groß wie möglich ist, aber höchstens 32,0 dB beträgt. Eine ungünstigste Abweichung liegt dann vor, wenn der Messwert über der Bezugskurve liegt.
- c) Ablesung des Wertes der verschobenen Bezugskurve bei einer Frequenz von 500 Hz. Der abgelesene Wert entspricht dem bewerteten Norm-Trittschallpegel  $L_{n,w}$ .

Der bewertete Norm-Trittschallpegel ist per definitionem normalerweise ein ganzzahliger Wert. Dies reicht von der Genauigkeit her für die meisten praktischen Anwendungen völlig aus. In machen Fällen, wie z. B. beim Vergleich verschiedener Konstruktions- oder Produktvarianten, können jedoch genauere Werte erforderlich sein. In diesem Fall kann  $L_{n,w}$  auch mit einer Genauigkeit von 0,1 dB berechnet werden, indem die Verschiebung der Bezugskurve in Schritten von 0,1 dB anstatt 1 dB erfolgt. Dies gilt in ähnlicher Weise auch für andere Einzahlangaben, wie z. B. die bewertete Trittschallminderung oder die verschiedenen Spektrum-Anpassungswerte, die im vorliegenden Bericht durchgängig mit 0,1 dB Genauigkeit angegeben werden.

Die Berechnung des bewerteten Norm-Trittschallpegels ist in der nachfolgenden Abbildung am Beispiel einer Holzbalkendecke veranschaulicht:



**Abb. 8:** Bestimmung des bewerteten Norm-Trittschallpegels am Beispiel einer typischen Holzbalken-Rohdecke (leichte Bezugsdecke C1 nach DIN EN ISO 10140-5, Anhang C). Die vertikalen grünen Balken bezeichnen die ungünstigen Abweichungen zwischen Mess- und Bezugskurve. Der bewertete Norm-Trittschallpegel beträgt  $L_{n,w} = 69$  dB.

Die Trittschallminderung von Deckenauflagen ist zwar im Prinzip unabhängig von der Rohdecke, dies gilt jedoch nur für die Terzpegel und nicht für die resultierende Verbesserung des Norm-Trittschallpegels der Rohdecke [84]. Um dennoch eine aussagefähige Einzahlangabe für die Trittschallminderung zu erhalten, wird die bewertete Trittschallminderung  $\Delta L_w$  unter Verwendung einer fiktiven Bezugsdecke berechnet, die in DIN EN ISO 717-2 definiert ist. Zur Berechnung von  $\Delta L_w$  wird die gemessene Trittschallminderung der betrachteten Deckenaufgabe terzweise zum Norm-Trittschallpegel der Bezugsdecke addiert. Anschließend wird der bewertete Norm-Trittschallpegel der Bezugsdecke mit und ohne Auflage berechnet und die Differenz der beiden Werte gebildet:

$$L_{n,r} = L_{n,r,0} - \Delta L, \quad (11a)$$

$$\Delta L_w = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,w}, \quad (11b)$$

- mit  $L_{n,r}$  = Norm-Trittschallpegel der Bezugsdecke mit Deckenaufgabe,  
 $L_{n,r,0}$  = Norm-Trittschallpegel der Bezugsdecke,  
 $\Delta L$  = gemessene Trittschallminderung der Deckenaufgabe,  
 $L_{n,r,0,w}$  = bewerteter Norm-Trittschallpegel für  $L_{n,r,0}$ ,  
 $L_{n,r,w}$  = bewerteter Norm-Trittschallpegel für  $L_{n,r}$ .

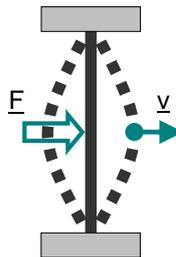
Die Bezugsdecke (mit dem Index r für reference) ist ein fiktives Bauteil mit idealisierter Trittschalldämmung. Neben einer schweren Bezugdecke für den Massivbau (entspricht in etwa einer 120 mm dicken massiven Betondecke) gibt es drei leichte Bezugsdecken für den Holzbau. Sie repräsentieren unterschiedliche Typen von Holzbalkendecken und entsprechen den in DIN EN ISO 10140-5, Anhang C beschriebenen Konstruktionen. Zur

Unterscheidung von der schweren Bezugsdecke werden die drei leichten Decken mit dem Index t (für timber) und der Nummer der jeweiligen Decke gekennzeichnet.

Die in dem hier beschriebenen Forschungsvorhaben durchgeführten Messungen erfolgten zu einem großen Teil auf einer Holzbalkendecke, deren Aufbau der leichten Bezugsdecke Typ 1 nach DIN EN ISO 10140-5 entsprach. Für die bewertete Trittschallminderung der Deckenauflagen müsste somit nach DIN EN ISO 717-2 bei korrekter Schreibweise eigentlich die Bezeichnung  $\Delta L_{t,1,w}$  verwendet werden. Im Sinne einer einfachen Nomenklatur und da keine Verwechslungsgefahr besteht, wird die Trittschallminderung im folgenden jedoch in verkürzter Form vereinfachend mit  $\Delta L_w$  bezeichnet.

#### 4.4 Admittanz und Körperschall-Leistung

Wirkt eine äußere Wechselkraft auf ein Bauteil ein, so wird das Bauteil in Schwingungen versetzt. Den Quotienten aus der einwirkenden Kraft und der resultierenden Schnelle bezeichnet man als Impedanz, den Kehrwert als Admittanz. Obwohl es im Prinzip keinen Unterschied macht, hat es sich in der Bauakustik eingebürgert, die dynamischen Eigenschaften von Strukturen durch ihre Admittanz zu beschreiben. Daher wird im folgenden ebenfalls diese Darstellungsweise verwendet. Die Admittanz bildet ein Maß dafür, wie leicht sich ein Bauteil durch eine äußere Kraft mechanisch anregen lässt. Schwere, steife Bauteile weisen deshalb eine geringe Admittanz auf, bei leichten, weichen Bauteilen ist die Admittanz hingegen hoch.



**Abb. 9:** Schematische Darstellung zur Veranschaulichung der Anregung eines plattenförmigen Bauteils durch eine Wechselkraft  $F$ . Durch die Einwirkung der Kraft schwingt das Bauteil mit der Schnelle  $v$ .

Da zwischen der anregenden Kraft  $F$  und der resultierenden Schnelle  $v$  abhängig von Quelle und angeregtem Bauteil eine Phasenverschiebung bestehen kann, werden sie als komplexe Größen (kenntlich durch Unterstreichung der Symbole) dargestellt. Damit ergibt sich für die Admittanz  $Y$  folgender Ausdruck:

$$\underline{Y} = \underline{v} / \underline{F} . \quad (12)$$

Je nachdem, ob man die Schnelle am Anregungsort oder an einer entfernten Stelle der angeregten Struktur betrachtet, spricht man von Eingangs- oder Transferadmittanz. Für die hier durchgeführten Untersuchungen ist vor allem die Eingangsadmittanz des angeregten Bauteils von Interesse. Wenn im folgenden von Admittanz gesprochen wird, ist deshalb immer die Eingangsadmittanz gemeint, es sei denn, es handelt sich um die Quellenadmittanz einer Körperschallquelle.

In der üblichen Pegelschreibweise lässt sich die Admittanz in der Form

$$L_Y = 20 \lg (|Y|/Y_0) \text{ dB} \quad (13)$$

mit dem Bezugswert  $Y_0 = 0,05 \text{ m/Ns} = 0,05 \text{ s/kg}$  darstellen, wobei sich der Admittanzpegel  $L_Y$  natürlich nicht für komplexe Zahlen berechnen lässt und deshalb zumeist auf den Betrag der Admittanz bezieht.

Die durch die äußere Kraft in das angeregte Bauteil eingeleitete Körperschall-Leistung  $P_{KS}$  ergibt sich aus dem Realteil des Produkts von Kraft und konjugiert komplexer Schnelle:

$$P_{KS} = \text{Re}\{\underline{F} \underline{v}^*\}, \quad (14)$$

wobei für Kraft und Schnelle jeweils der Effektivwert (also z. B.  $F_{\text{eff}} = F_{\text{max}} / \sqrt{2}$ ) heranzuziehen ist. Messtechnisch lässt sich die Leistung auf Grundlage der obigen Gleichung aus dem Realteil des komplexen Kreuzleistungsspektrums der für Kraft und Schnelle simultan gemessenen Werte ermitteln. Voraussetzung ist hierfür ist natürlich eine zweikanalige Messeinrichtung mit entsprechender messtechnischer Ausstattung.

Setzt man Gl. (12) in Gl. (14) ein, so erhält man die alternative Darstellungsweise

$$P_{KS} = |\underline{F}|^2 \text{Re}\{\underline{Y}_B\} = |\underline{v}|^2 / \text{Re}\{\underline{Y}_B\} \quad (15)$$

mit dem Betrag von Kraft  $F$  und Schnelle  $v$ . Der Index  $B$  hinter dem Symbol für die Admittanz bringt zum Ausdruck, dass es sich dabei um die Eingangsadmittanz des angeregten Bauteils handelt (im Gegensatz zur Quellenadmittanz der vorhandenen Körperschallquelle). Die obige Gleichung dient häufig als Grundlage, um die in das Bauteil eingeleitete Körperschall-Leistung zu berechnen. Ist die Eingangsadmittanz des Bauteils bekannt (z. B. aus Messungen oder bei einfachen plattenförmigen Bauteilen näherungsweise auch rechnerisch), wird zur Berechnung der Leistung nur noch der Betrag von Kraft oder Schnelle benötigt, der in vielen Fällen (bei sogenannten Kraft- oder Schnellequellen) eine intrinsische Eigenschaften der Körperschallquelle darstellt.

Als Beispiel sei abschließend noch die Formel für die Eingangsadmittanz einer großflächigen dünnen Platte aufgeführt:

$$\underline{Y} = |\underline{Y}| = \frac{1}{8\sqrt{B'} \rho d} \quad (16)$$

mit  $B' = Ed^3/[12(1-\mu^2)] =$  Biegesteifigkeit je Breite [Nm],  
 $\rho =$  Dichte des Plattenmaterials [kg/m<sup>3</sup>],  
 $d =$  Plattendicke [m].

Die Eingangsadmittanz einer solchen Platte ist demnach real und hängt nicht von der Frequenz ab. Obgleich dies in der Praxis zumeist nur näherungsweise zutrifft (aufgrund der endlichen Abmessungen und der Randeinspannung der Bauteile bilden sich oft

mehr oder weniger deutliche Eigenschwingungen aus), kann die obige Gleichung doch in vielen Fällen zumindest eine Abschätzung für die Admittanz realer Bauteile, wie z. B. Decken oder Wände liefern. Auch bei Holzbalkendecken ist die Gleichung näherungsweise anwendbar, sofern man sie auf die oberseitige Bekleidung der Balken (bei Rohdecken) bzw. die Estrichplatte (bei Fertigdecken mit schwimmendem Estrich) bezieht. So ergibt sich für die Eingangsadmittanz einer 14 cm dicken Stahlbetondecke mit einer flächenbezogenen Masse von  $m'' = 320 \text{ kg/m}^2$  beispielsweise ein Wert von  $Y_B = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ s/kg}$ , was einem Admittanzpegel von  $L_Y \cong -85 \text{ dB}$  entspricht. Für eine 22 mm dicke Spanplatte mit  $m'' = 15 \text{ kg/m}^2$  erhält man  $Y_B = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ s/kg}$  bzw.  $L_Y \cong -39 \text{ dB}$ .

#### 4.5 Kennzeichnung von Körperschallquellen

Körperschallquellen sind häufig akustisch äußerst komplizierte Systeme. Um schalltechnische Berechnungen dafür durchführen zu können, ist es erforderlich, die Eigenschaften der Quellen durch eine vereinfachte Beschreibung zu ersetzen. In der Bauakustik verwendet man zur Kennzeichnung von Körperschallquellen die komplexe Quellenadmittanz  $\underline{Y}_Q$  in Verbindung mit der freien Schnelle  $\underline{v}_0$ . Unter der freien Schnelle versteht man den Wert der Schwingungsgeschwindigkeit, der sich ergibt, wenn man die Körperschallquelle von der angeregten Struktur trennt, so dass die Quelle ohne äußere Last frei schwingen kann. Statt der freien Schnelle kann man zur Kennzeichnung von Körperschallquellen ersatzweise auch die Kurzschlusskraft  $\underline{F}_K$  verwenden. Das ist die Kraft, die die Quelle erzeugt, wenn man sie an einem schweren, starren Bauteil mit geringer Eingangsadmittanz anbringt, so dass sie unbeweglich eingespannt ist. Die Bezeichnung Kurzschlusskraft erscheint für die beschriebene Einbausituation auf den ersten Blick unzutreffend gewählt (die englische Bezeichnung "blocked force" passt hier sehr viel besser). Aus den nachfolgenden Erläuterungen wird die Herkunft der Bezeichnung jedoch deutlich.

Zwischen der Quellenadmittanz, der freien Schnelle und der Kurzschlusskraft besteht der Zusammenhang

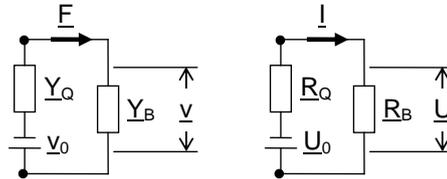
$$\underline{Y}_Q = \underline{v}_0 / \underline{F}_K, \quad (17)$$

so dass der zwei der drei Größen ausreichen, um die Quelle akustisch vollständig zu charakterisieren. Im folgenden werden dazu die Quellenadmittanz und die freie Schnelle verwendet. Der Grund dafür ist, dass die Messung der freien Schnelle bei den hier untersuchten Quellen mit flächigem Kontakt zum Bauwerk erheblich einfacher als die Bestimmung der Kurzschlusskraft ist.

Das akustische Verhalten von Körperschallquellen lässt sich leicht verständlich am Beispiel eines elektromechanischen Ersatzschaltbildes veranschaulichen. In dem Ersatzschaltbild bestehen folgende Analogien:

- Schnelle  $\underline{v}$  entspricht elektrischer Spannung  $\underline{U}$ ,
- Kraft  $\underline{F}$  entspricht elektrischem Strom  $\underline{I}$ ,
- Admittanz  $\underline{Y}$  entspricht elektrischem Widerstand  $\underline{R}$ .

Unter Verwendung dieser Analogien lassen sich Körperschallquellen gemäß Abb. 10 als ideale Schnellequelle mit der freien Schnelle  $\underline{v}_0$  und der Quellenadmittanz  $\underline{Y}_Q$  auffassen (übersetzt in eine elektrische Darstellungsweise entspricht dies einer idealen Spannungsquelle mit der Spannung  $\underline{U}_0$  und dem Innenwiderstand  $\underline{R}_Q$ ). Die Befestigung der Körperschallquelle an einem Bauteil mit der Eingangsadmittanz  $\underline{Y}_B$  ist dabei gleichbedeutend mit dem Anschluss der Spannungsquelle an einen Lastwiderstand  $\underline{R}_B$ .



**Abb. 10:** Veranschaulichung des akustischen Verhaltens einer Körperschallquelle mittels eines elektromechanischen Ersatzschaltbildes (links im Bild). Auf der rechten Seite des Bildes ist die Entsprechung in Form einer elektrischen Wechselstromschaltung wiedergegeben.

Aus Abb. 10 wird auch die Herkunft der Bezeichnung Kurzschlusskraft deutlich: die Kurzschlusskraft ist die Kraft, die sich ergibt, wenn die Körperschallquelle an einem Bauteil mit der Eingangsadmittanz  $\underline{Y}_B = 0$  befestigt wird, die Spannungsquelle in der elektrischen Darstellungsweise also kurzgeschlossen wird. Aus dem gleichen Grund wird die freie Schnelle von Körperschallquellen gelegentlich auch als Leerlaufschnelle bezeichnet.

#### 4.6 Wechselwirkung von Quelle und angeregter Struktur

Wird eine Körperschallquelle an einem Bauteil befestigt, so treten die beiden Systeme in Wechselwirkung. Die dabei geltenden Zusammenhänge sind aus dem Ersatzschaltbild in Abb. 10 ersichtlich. Für die in das Bauteil eingeleitete Kraft ergibt sich der Ausdruck

$$F = \underline{E}_K \frac{1}{1 + \underline{Y}_B / \underline{Y}_Q}. \quad (18)$$

Für die Schnelle am Anregungsort gilt analog

$$v = \underline{v}_0 \frac{1}{1 + \underline{Y}_Q / \underline{Y}_B}. \quad (19)$$

Der Wert der Schnelle ist demnach um so höher, je größer die Eingangsadmittanz des angeregten Bauteils im Verhältnis zur Quellenadmittanz ist. Für  $|\underline{Y}_Q| \gg |\underline{Y}_B|$  geht die Schnelle hingegen gegen Null. Bei Anwendung der obigen Gleichungen in der Praxis sind deshalb zwei Grenzfälle zu unterscheiden:

- Für  $|\underline{Y}_Q| \gg |\underline{Y}_B|$  spricht man von Kraftanregung, da die eingeleitete Kraft unabhängig vom angeregten Bauteil konstant bleibt (es gilt  $E = \underline{E}_K$  und  $v = \underline{v}_0 \underline{Y}_B / \underline{Y}_Q$ ). Kraftanregung liegt dann vor, wenn eine leichte Quelle an einem schweren Bauteil an-

gebracht wird. Ein Beispiel hierfür sind Sanitärinstallationen im Massivbau, bei denen diese Voraussetzung im Normalfall erfüllt ist.

- b) Bei  $|\underline{Y}_Q| \ll |\underline{Y}_B|$  handelt es sich um Schnelleanregung, da hier eine konstante Schnelle am Einleitungsort vorliegt (es gilt  $\underline{v} = \underline{v}_0$  und  $\underline{F} = \underline{F}_K \underline{Y}_Q / \underline{Y}_B$ ). Schnelleanregung ergibt sich bei schweren Quellen in Verbindung mit leichten Bauteilen. Dieser Fall kommt in der Praxis zwar gelegentlich vor, bildet in der Bauakustik bei haustechnischen Anlagen aber eher eine Ausnahme.

Im Holz- und Leichbau sind die Admittanzen der vorhandenen Quellen und Bauteile in der Regel etwa von gleicher Größenordnung, so dass keiner der beiden beschriebenen Grenzfälle vorliegt. Eine vereinfachte Berechnung ist hier daher meist nicht möglich, sondern es müssen die genauen Formeln in Gl. (18) und Gl. (19) verwendet werden.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass auch Gl. (18) und Gl. (19) nur Näherungen darstellen, deren Herleitung auf idealisierenden Voraussetzungen beruht. So wird z. B. eine punktförmige Krafteinleitung mit einer senkrecht zur Bauteiloberfläche gerichteten Kraft unter Vernachlässigung von Biegemomenten vorausgesetzt. Obgleich diese Voraussetzungen für die hier betrachteten Körperschallquellen mit flächigem Kontakt zum Bauwerk zumindest teilweise nicht zutreffen (Biegemomente spielen bei flächigem Kontakt normalerweise keine Rolle), wird das beschriebene Modell mangels praktikabler Alternativen im folgenden auch für diese Quellen verwendet. Wie groß die hierdurch hervorgerufenen Abweichungen sind, wird der Vergleich von Berechnung und Messung zeigen.

Für die von der Quelle in das Bauteil eingeleitete Körperschall-Leistung lässt sich aus den oben aufgeführten Formeln die Beziehung

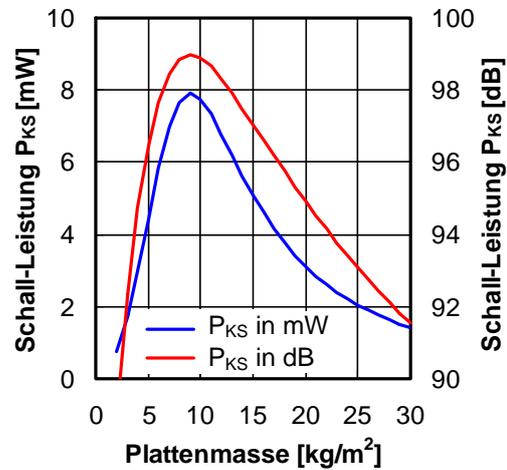
$$P_{KS} = |\underline{v}_0|^2 \left| \frac{\underline{Y}_B}{\underline{Y}_B + \underline{Y}_Q} \right|^2 \frac{1}{\operatorname{Re}\{\underline{Y}_B\}} \quad (20)$$

ableiten. Da bei plattenförmigen Bauteilen zumeist – zumindest näherungsweise – von einer vorwiegend realen Eingangsadmittanz ausgegangen werden kann, gilt  $|\underline{Y}_B| \cong \operatorname{Re}\{\underline{Y}_B\}$ , so dass sich die obige Gleichung entsprechend vereinfachen lässt:

$$P_{KS} \cong |\underline{v}_0|^2 \frac{\operatorname{Re}\{\underline{Y}_B\}}{|\underline{Y}_B + \underline{Y}_Q|^2}. \quad (21)$$

Da man es Gebäuden in den meisten Fällen mit plattenförmigen Bauteilen zu tun hat, hat Gl. (21) in der baulichen Praxis einen weiten Anwendungsbereich. Wie aus der Gleichung zu entnehmen ist, hängt die eingeleitete Leistung sowohl von der Quelladmittanz als auch von der Admittanz des angeregten Bauteils ab. Die meiste Leistung wird übertragen, wenn die beiden Admittanzen übereinstimmen. In DIN EN 12354-5 wird dieser Maximalwert als charakteristische Körperschall-Leistung bezeichnet. Er beträgt  $P_{KS,c} = |\underline{v}_0|^2 / (4 \operatorname{Re}\{\underline{Y}_Q\})$ .

Die Abhängigkeit der in ein plattenförmiges Bauteil eingeleiteten Körperschall-Leistung von der flächenbezogenen Masse des Bauteils ist in der nachfolgenden Abbildung an einem vereinfachten rechnerischen Beispiel dargestellt. Es ist gut zu erkennen, wie die Schall-Leistung bei Übereinstimmung der Admittanzen ein Maximum durchläuft.



**Abb. 11:** Körperschall-Einleitung einer Duschwanne in eine Holzbalken-Rohdecke in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse der oberseitigen Beplankung (Spanplatte). Vereinfachte frequenzunabhängige Berechnung der Körperschall-Leistung mit einer Quellenadmittanz von  $Y_Q = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ s/kg}$  und einer freien Schnelle von  $v_0 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ . Darstellung der Leistung als native Größe in mW (blaue Kurve, linke Größenachse) und als Pegel in dB (rote Kurve, rechte Achse).

#### 4.7 Pegeldefinitionen

Die in den nachfolgenden Abschnitten aufgeführten Ergebnisse werden, wie in der Bauakustik üblich, in logarithmischer Darstellungsweise als Pegel in dB angegeben.

Messgröße	Pegeldefinition	Bezugswert
Schalldruck $p$	$L_p = 20 \lg(p/p_0) \text{ dB}$	$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
Schallschnelle $v$	$L_p = 20 \lg(v/v_0) \text{ dB}$	$v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$
Kraft $F$	$L_F = 20 \lg(F/F_0) \text{ dB}$	$F_0 = 10^{-6} \text{ N}$
Schall-Leistung $P^*$	$L_W = 10 \lg(P/P_0) \text{ dB}$	$P_0 = 10^{-12} \text{ W}$
Admittanz $Y$	$L_Y = 20 \lg(Y/Y_0) \text{ dB}$	$Y_0 = 0,05 \text{ s/kg}$

\* sowohl für die Luft- als auch für die Körperschall-Leistung

**Tab. 1:** Definition der im vorliegenden Bericht für die verschiedenen Messgrößen angegebenen Pegel.

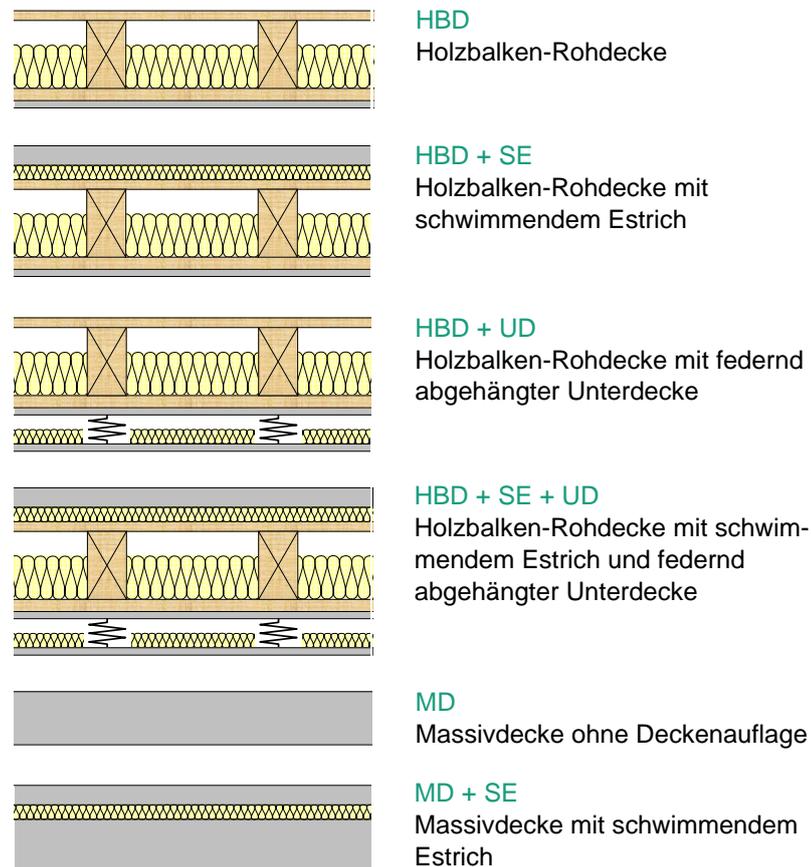
Während sich bei häufig verwendeten Messgrößen, wie z. B. dem Schalldruckpegel, eine einheitliche Darstellungsweise eingebürgert hat, ist das im Bereich des Körperschalls bislang leider nicht der Fall. Da hier z. T. unterschiedliche Definitionen und Bezugswerte



Abgesehen von den unterschiedlichen Decken waren die beiden Prüfstände P8 und P9 weitgehend gleich aufgebaut. Die Schallübertragung in den Empfangsraum unterhalb der Decke erfolge in beiden Fällen ausschließlich über die Decke selbst (Die Flankenübertragung war jeweils durch Vorsatzschalen unterbunden). Geringe Unterschiede bestanden hinsichtlich des Empfangsraumvolumens (ca. 50 m<sup>3</sup> in P8 und 54 m<sup>3</sup> in P9) und der Deckenfläche (4,0 m × 5,0 m = 20,0 m<sup>2</sup> in P8 und 3,7 m × 4,7 m = 17,4 m<sup>2</sup> in P9). Auf die Messergebnisse hatte dies jedoch keinen Einfluss (beide Prüfstände entsprachen den Anforderungen der hierfür maßgebenden Norm DIN EN ISO 10140-5).

## 5.2 Untersuchte Decken

Im Rahmen des Forschungsvorhabens fanden Untersuchungen an sechs verschiedenen Decken statt. Bei vier davon handelte es sich um Holzbalkendecken, bei den restlichen beiden um Massivdecken. Da in der Folge noch öfter auf die verschiedenen Decken Bezug genommen wird, wurden sie mit Kurzbezeichnungen versehen, aus denen der jeweilige Deckenaufbau hervorgeht. Eine Übersicht über die verschiedenen Decken mit den verwendeten Kurzbezeichnungen ist der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen:

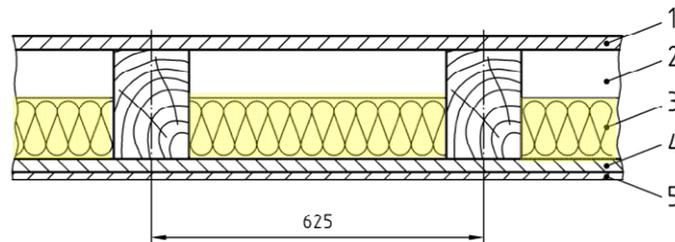


**Abb. 13:** Übersicht über die sechs untersuchten Decken mit den verwendeten Kurzbezeichnungen.

Nachfolgend ist der Aufbau der oben aufgeführten Decken mit Angaben zu den wichtigsten technischen Daten genauer beschrieben:

## 1) HBD

Die Holzbalken-Rohdecke, an der die durchgeführten Untersuchungen erfolgten, entspricht der leichten Bezugsdecke C1 zur Messung der Trittschallminderung von Deckenauflagen nach DIN EN ISO 10140-5, Anhang C. Der Aufbau der Decke und die wichtigsten technischen Daten sind der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen:



- 1 Spanplatten,  $d = 22 \text{ mm}$
- 2 Balken,  $B \times H = 120 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ , Mittenabstand 625 mm
- 3 Mineralwolle,  $d = 100 \text{ mm}$ , längenbezogener Strömungswiderstand  $r \geq 5 \text{ kPas/m}^2$
- 4 Lattung,  $B \times H = 48 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ , Mittenabstand 625 mm
- 5 Gipskartonplatten,  $d = 12,5 \text{ mm}$

**Abb. 14:** Aufbau der untersuchten Holzbalken-Rohdecke (Kurzbezeichnung HBD, leichte Bezugsdecke C1 nach DIN EN ISO 10140-5, Anhang C).

Die obige Decke stellt ein typisches Beispiel für die in Deutschland im Holzbau verwendeten Deckenkonstruktionen dar. Andererseits handelt es sich natürlich um eine Rohdecke, die in der vorliegenden Form (d. h. ohne trittschallmindernde Deckenauflage) in der Praxis im Normalfall nicht gebrauchsfähig ist. Der für diese Decke im Prüfstand gemessene Trittschallpegel liegt daher deutlich über den Werten, die in fertig ausgeführten Bauten üblich sind (der bewertete Norm-Trittschallpegel beträgt  $L_{n,w} = 73,3 \text{ dB}$ ). Gleiches gilt auch für den ermittelten Installations-Schallpegel. Eine Ausnahme stellen lediglich bodenebene Duschflächen dar, die zur Schaffung einer barrierefreien Bodenoberfläche direkt auf der Rohdecke montiert werden, so dass Deckenauflagen, wie z. B. schwimmende Estriche, fast keinen Einfluss auf die entstehenden Geräusche haben.

## 2) HBD + SE

Durch den Einbau eines schwimmenden Estrichs wird aus der Holzbalken-Rohdecke HBD eine gebrauchsfertige Decke. Der für die Untersuchungen verwendete Estrich war folgendermaßen aufgebaut (von oben nach unten):

- durchgehende Estrichplatte aus Zementestrich, Dicke  $d = 60 \text{ mm}$ , flächenbezogene Masse  $m'' \cong 120 \text{ kg/m}^2$ ,
- Trittschalldämmplatte Isover Akustic EP 1 aus Glaswolle, Dicke  $d = 40 \text{ mm}$ , dynamische Steifigkeit  $s' \leq 6 \text{ MN/m}^3$  (Herstellerangabe).

Obgleich der schwimmende Estrich die Schalldämmung der Rohdecke beträchtlich verbessert, liegt der resultierende Wert des bewerteten Norm-Trittschallpegels mit  $L_{n,w} = 55,0 \text{ dB}$  noch immer über den Mindestanforderung für Wohnungstrenndecken nach

DIN 4109-1 in Höhe von  $L'_{n,w} \leq 50$  dB. Der Deckenaufbau kann daher nur in Gebäuden ohne gesetzliche Schallschutzanforderungen, wie z. B. Einfamilienhäusern, zum Einsatz kommen. Um den Einbau von bodenebenen Duschflächen zu ermöglichen, wurde der schwimmende Estrich in der linken und rechten hinteren Ecke des Raums mit zwei jeweils 105 cm x 105 cm großen Aussparungen versehen (näheres hierzu ist Abschnitt 5.4 zu entnehmen).

### 3) HBD + UD

Auch eine federnd abgehängte Unterdecke verbessert die Schalldämmung der Rohdecke beträchtlich, mit  $L_{n,w} = 63,3$  dB allerdings nicht in gleichem Maße wie der oben beschriebene schwimmende Estrich. Im vorliegenden Fall wurde die Unterdecke unterhalb der vorhandenen unterseitigen Beplankung aus Gipskartonplatten montiert und hatte folgenden Aufbau (von oben nach unten):

- Knauf Federschienen 60/27 (Flanschbreite: 60 mm, Gesamtbreite 130 mm, Steghöhe 27 mm, Blechdicke 0,6 mm),
- Trennwand-Dämmplatten aus Mineralfaser (Knauf Insulation TP 115, Nenndicke  $d = 40$  mm) vollflächig im Zwischenraum,
- unterseitige Beplankung aus 12,5 mm dicken GKB-Platten mit einer flächenbezogenen Masse von  $m'' = 8,5$  kg/m<sup>2</sup>.

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Aufbau und die Montage der verwendeten Federschienen



**Abb. 15:** Federschienen zur Befestigung der abgehängten Unterdecke. Im unteren Teil des Bildes sind die Schienen im eingebauten Zustand (vor Montage der unterseitigen Beplankung) zu sehen.

Der Aufbau mit der abgehängten Unterdecke stellt insofern eine Besonderheit dar, als die Unterdecke nur in Kombination mit dem oben beschriebenen schwimmenden Estrich zum Einsatz kam. Befindet sich die Körperschallquelle in einer der beiden Ausspa-

rungen des Estrichs, erfolgt die Schallübertragung jedoch so, als ob der Estrich gar nicht vorhanden wäre (siehe Messergebnisse in Abschnitt 6.1). Da an dem Aufbau mit der abgehängten Unterdecke nur verhältnismäßig wenige Messungen erfolgten, enthält nur ein Teil der nachfolgend dargestellten Diagrammen entsprechende Ergebnisse.

#### 4) HBD + SE + UD

Werden der schwimmende beschriebene Estrich und die abgehängte Unterdecke aus der obigen Beschreibung miteinander kombiniert, so erhält man eine Holzbalkendecke mit einem bewerteten Norm-Trittschallpegel von  $L_{n,w} = 51,2$  dB. Selbst diese Decke erfüllt die Mindestanforderung der DIN 4109-1 für Wohnungstrenndecken also noch nicht ganz.

#### 5) MD

Die untersuchte Massivdecke (genauer gesagt die massive Rohdecke) bestand aus einer 140 mm dicken Stahlbetonplatte mit einer flächenbezogenen Masse von  $ca. m'' = 320$  kg/m<sup>2</sup>. Der bewertete Norm-Trittschallpegel dieser Decke ist mit  $L_{n,w} = 74,2$  dB etwa ebenso hoch wie der für die obige Holzbalken-Rohdecke gemessene Wert.

#### 6) MD + SE

Wird die massive Rohdecke mit einem schwimmenden Estrich mit dem gleichen Aufbau wie bei der Holzbalkendecke versehen, erreicht der bewertete Norm-Trittschallpegel einen Wert von  $L_{n,w} = 39,7$  dB. Dies ist der bei weitem beste Wert aller im durchgeführten Forschungsvorhaben untersuchten Decken und erfüllt sogar die erhöhten Anforderungen für die Schallschutzstufe SSt II nach DIN 4100. Zur Verringerung des Herstellungsaufwandes wurde der schwimmende Estrich nicht auf der gesamten Fläche der Massivdecke, sondern vielmehr nur teilflächig verlegt. Eine Beschreibung der verwendeten Estrich-Teilstücke ist in Abschnitt 5.4 dargestellt.

### 5.3 Körperschallerreger

Wie in Abschnitt 2 beschrieben, bestehen die verwendeten Körperschallquellen aus drei verschiedenen Bestandteilen: dem Schwingungserreger, der schwingenden Struktur und den zwischen der schwingenden Struktur und dem Bauwerk befindlichen Befestigungselementen. Im folgenden werden zunächst die verwendeten Schwingungserreger beschrieben. In Abschnitt 5.4 erfolgt dann anschließend die Betrachtung der schwingenden Strukturen und der Befestigungselemente.

Die Körperschallanregung in dem durchgeführten Forschungsvorhaben erfolgte mit vier verschiedenen Schwingungserregern, die sich in ihren Eigenschaften voneinander unterschieden und gegenseitig ergänzten. Während der Shaker zur Messung der Admittanz der untersuchten Bauteile eingesetzt wurde und gleichzeitig als gut reproduzierbare Referenzschallquelle diente, hatten die drei übrigen Erreger vor allem die Aufgabe, die verschiedenen Anregungsarten von Sanitärinstallationen praxisgerecht nachzubilden. Eine Übersicht über die vier Erreger mit den verwendeten Kurzbezeichnungen ist in der nachfolgenden Tabelle wiedergegeben. Im Anschluss an die tabellarische Darstel-

lung erfolgt dann eine genaue Beschreibung der Erreger und ihrer technischen Eigenschaften.

Nr.	Kurzbezeichnung	Beschreibung
1	Shaker	Elektrodynamischer Schwingerreger (Inertial-Shaker Data Physics IV40/PA30E)
2	NHW	Norm-Trittschallhammerwerk nach DIN EN ISO 10140-5
3	KGN	Körperschallgeräuschnormal (entspricht IGN nach DIN EN ISO 3822-1 [85])
4	Hammer	Empa-Pendelfallhammer nach SIA 181

**Tab. 2:** Übersicht über die vier in dem Forschungsvorhaben verwendeten Körperschallerreger.

### 1) Shaker

Bei dem verwendeten Shaker handelt es sich im Prinzip um einen in einer Tauchspule federnd gelagerten Magneten. Wird die Spule von einem elektrischen (Wechsel)strom durchflossen, erfährt der Magnet eine Kraft, die er auf das mit ihm verbundene Bauteil überträgt. Als starres Verbindungselement zwischen dem Shaker und der angeregte Struktur diente eine Gewindescheibe aus Aluminium, die mit einem Klebstoff mit besonders hoher Steifigkeit (Zwei-Komponenten-Harz) auf das Bauteil aufgeklebt und mittels einer Gewindestange mit dem Shaker verschraubt wurde. Bei den meisten Messungen befand sich zwischen Bauteil und Shaker zusätzlich noch ein piezoelektrischer Sensor zur Messung der in das Bauteil eingeleiteten Kraft.

Als Gegenlager für die auf das Bauteil ausgeübte Kraft diente – nach dem Prinzip "Actio gleich Reactio" – die Eigenmasse des Shakers (deshalb auch die Bezeichnung Inertial-Shaker, da neben dem Kontakt zum angeregten Bauteil keine weitere Befestigung des Shakers erforderlich war). Als Anregungssignal für die Messungen wurde zumeist rosa Rauschen verwendet. In manchen Fällen (z. B. bei geringem Signal-Rausch-Abstand) erfolgten die Messungen alternativ mit Terzrauschen oder einem Sinussignal. Indem die am Eingang des Shakers anliegende Spannung gemessen und bei Bedarf am Leistungsverstärker nachjustiert wurde, war sichergestellt, dass alle Messungen mit der gleichen konstanten Anregungsstärke erfolgten. Eine Darstellung des Shakers und die wichtigsten technischen Daten sind Abb. 16 zu entnehmen.

Der Shaker ermöglichte es als einziger der vier verwendeten Erreger, die auf die angeregte Struktur ausgeübte Kraft messtechnisch zu bestimmen. Da dies die Voraussetzung zur Messung der Eingangsadmittanz sowie zur direkten Ermittlung der in das Bauteil eingeleiteten Körperschall-Leistung (aus dem Kreuzleistungsspektrum von Kraft und Schnelle) bildete, war der Shaker für die durchgeführten Untersuchungen unverzichtbar. Er hatte allerdings den Nachteil, dass das erzeugte Anregungssignal nur verhältnismäßig schwach war. Unter ungünstigen Bedingungen (gut isolierte Körperschallquelle auf Decke mit hoher Schalldämmung) lag der resultierende Installations-Schallpegel – trotz der wirksamen Abschirmung des Prüfstands gegen Störgeräusche von außen – nicht selten unter dem im Empfangsraum vorhandenen Fremdgeräuschpegel, so dass

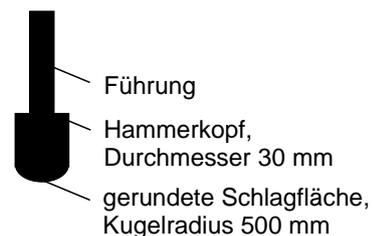
die Messwerte in starkem Maße verfälscht wurden. Glücklicherweise waren hiervon hauptsächlich nur die Signalanteile bei hohen Frequenzen betroffen. Da die hohen Frequenzen nur in geringem Maße zum Installationsgeräusch beitragen, konnte der Gesamtpegel der Installationsgeräusche trotz dieses Problems weiterhin verwendet werden.



**Abb. 16:** Darstellung des bei den Messungen verwendeten Inertial-Shakers vom Typ Data Physics IV40/PA30E. Die vom Shaker erzeugte Kraft beträgt maximal 30 N (Effektivwert), die Inertialmasse liegt bei 1,21 kg und die Eigenresonanz erfolgt bei 30 Hz.

## 2) Norm-Hammerwerk (NHW)

Das Norm-Hammerwerk nach DIN EN ISO 10140-5, Anhang E ist die wichtigste genormte Trittschallquelle, auf das sich alle gesetzlichen Schallschutzanforderungen beziehen. Es besteht aus fünf nebeneinander angeordneten Hämmer mit einer Masse von je 500 g, die abwechselnd aus einer Höhe von 40 mm senkrecht auf die Decke herabfallen. Zur Betätigung der Hämmer dient eine motorisch betriebene Drehachse mit Exzentrerscheiben, welche die Hämmer zunächst anheben und dann in freiem Fall auf die Decke herabfallen lassen. Der Zeitabstand zwischen zwei aufeinander folgenden Schlägen liegt bei 100 ms. Die zylindrischen Hammerköpfe bestehen aus gehärtetem Stahl und weisen an der Schlagfläche eine sphärische Rundung mit einem Durchmesser von 500 mm auf.



**Abb. 17:** Beispiel für ein praxisübliches Norm-Trittschallhammerwerk. Die Skizze rechts im Bild enthält Angaben zur Ausführung der Hämmer.

Das Norm-Hammerwerk erzeugt ein gleichförmiges, gut messbares und reproduzierbares Signal. Der Schallpegel ist so hoch, dass im Allgemeinen auch unter schwierigen Bedingungen (d. h. bei Decken mit hoher Trittschalldämmung und bei Einwirkung von

Fremdgeräuschen) mit hinreichender Genauigkeit gemessen werden kann. Ein Beispiel für ein Norm-Hammerwerk ist in Abb. 17 dargestellt.

Ein Nachteil des Hammerwerks besteht darin, dass es neben der Körperschalleinleitung in die Decke in erheblichem Maße Luftschall in den Senderaum des Prüfstandes abstrahlt und auf diese Weise eine zusätzliche Luftschallanregung der Decke bewirkt. Da sich das durchgeführte Forschungsvorhaben auf die Entstehung und Übertragung von Körperschall konzentriert, ist die Luftschallanregung im vorliegenden Fall nicht erwünscht. Sie würde Abweichungen zwischen Messungen und Berechnungen hervorrufen und muss deshalb unterbunden werden.

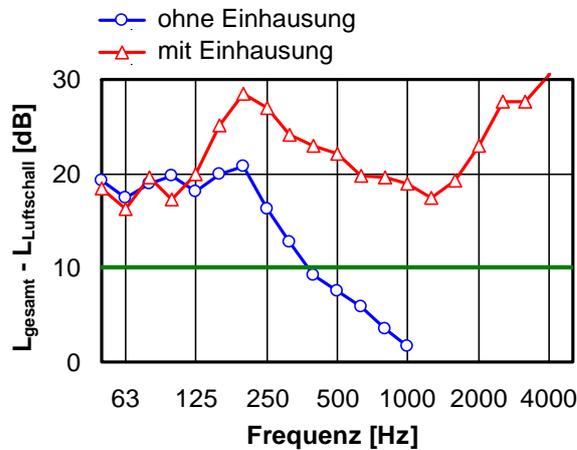
Um zu verhindern, dass die Luftschallanregung der Decke die Untersuchungsergebnisse verfälscht, wurde daher eine Abdeckhaube gebaut, die die Körperschallquelle (d. h. das Norm-Hammerwerk und die Duschwanne bzw. schwingende Struktur) vollständig umschließt und die Luftschallabstrahlung in den Senderaum herabsetzt. Die Abdeckhaube bestand aus einem rechteckigen unten offenen Kasten aus 13 mm dicken Spanplatten mit den Innenmaßen  $L \times B \times H = 104 \text{ cm} \times 104 \text{ cm} \times 46 \text{ cm}$ , der über den Messaufbau gestellt wurde und ihn ohne Berührung vollständig umschloss. Um den Schallpegel im Kasten herabzusetzen, war die Innenseite im oberen Bereich mit 5 cm dicken Platten aus schallabsorbierendem Schaumstoff (Basotect Melaminharzschaum) ausgekleidet. Die Abdichtung zu Boden hin erfolgte über Schaumstoffstreifen (gleichfalls aus Basotect), die zugleich als elastische Entkopplung zwischen Haube und Decke dienten. Ein Foto der Abdeckhaube ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:



**Abb. 18:** Schallabsorbierende Abdeckhaube zur Verminderung der Luftschallabstrahlung des Norm-Hammerwerks. Im linken Bild ist die Haube in geöffnetem Zustand zu sehen, im rechten Bild ist sie geschlossen.

Durch Verwendung der oben beschriebenen Abdeckhaube konnte die Luftschallabstrahlung des Hammerwerks so weit abgesenkt werden, dass sie praktisch zu vernachlässigen ist. Dies wird durch entsprechende Messungen an einem bauüblichen Trockenestrich belegt, deren Ergebnisse in Abb. 19 wiedergegeben sind. Ohne Haube setzt bereits bei einer Frequenz von 400 Hz eine Verfälschung der Messergebnisse infolge der vorhandenen Luftschallübertragung ein und oberhalb von etwa 1000 Hz sind die Er-

gebnisse gar nicht mehr verwendbar. Mit der Abdeckhaube sind demgegenüber im gesamten bauakustischen Frequenzbereich störungsfreie Messungen ohne Luftschalleinfluss möglich.



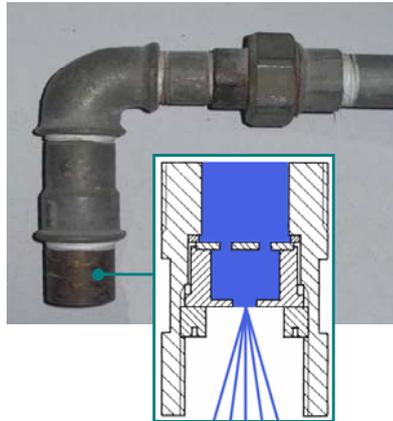
**Abb. 19:** Differenz zwischen dem gemessenen Gesamtpegel (Summe aus Trittschall- und Luftschallanteil) und dem durch das Norm-Hammerwerk im Empfangsraum hervorgerufenen Luftschallpegel in Abhängigkeit von der Frequenz. Die blaue Kurve wurde ohne Abdeckhaube gemessen, bei der roten Kurve war das Hammerwerk mit der oben beschriebenen Haube eingehaust. Die Messungen erfolgten an einem bauüblichen Trockenestrich.

### 3) Körperschallgeräuschnormal (KGN)

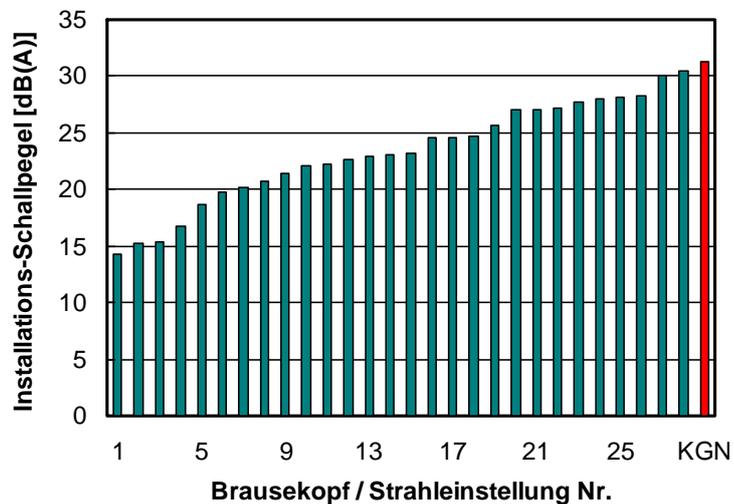
Beim Körperschallgeräuschnormal handelt es sich um einen genormten Wasserauslass, der als Referenzschallquelle zur Messung der Geräusentwicklung von Wasserarmaturen nach DIN EN ISO 3822-1 eingesetzt wird. In DIN EN ISO 3822-1 wird für den Auslass die Bezeichnung Installationsgeräuschnormal (IGN) verwendet. Das IGN wird an Stelle der zu prüfenden Auslaufarmatur an die Wasserleitung angeschlossen, wobei an der offenen Seite des IGN ein starker, scharf gebündelter Wasserstrahl austritt. Bei der Verwendung als Körperschallgeräuschnormal wird dieser Strahl zur Anregung von Sanitärobjekten wie z. B. Duschwannen genutzt und repräsentiert dort den aus einem Brausekopf austretenden Wasserstrahl. Der Aufbau des KGN und seine wichtigsten technischen Eigenschaften sind in der nachfolgenden Abb. 20 aufgeführt.

Das KGN erzeugt einen konstanten Wasserstrahl, der unter genau definierten geometrischen Bedingungen auf das Prüfobjekt trifft und so eine praxisgerechte und reproduzierbare Geräuschanregung (ähnlich wie bei dem aus einem handelsüblichen Brausekopf austretenden Wasserstrahl) ermöglicht. Die mit dem KGN gemessenen Werte liegen an der oberen Grenze des durch übliche Brauseköpfe erzeugten Installations-Schallpegels. Werden die Schallschutzanforderungen bei KGN-Anregung eingehalten, ist daher davon auszugehen, dass dies auch für die meisten Brauseköpfe zutrifft. Wegen der Vielzahl der im Handel erhältlichen Brauseköpfe und ihrer umfangreichen Einstellmöglichkeiten (von den Strahlarten "Soft" bis "Massage") ist hierbei allerdings keine allgemein gültige Aussage über die Höhe des Installations-Schallpegels möglich. Ein Vergleich zwischen dem durch das KGN erzeugten Installations-Schallpegel und den für

eine Reihe von handelsüblichen Brauseköpfen gemessenen Werten ist Abb. 21 zu entnehmen.



**Abb. 20:** Darstellung eines Körperschallgeräuschnormal (KGN). Das KGN besteht aus einem hohlen Messingzylinder, der mittels eines integrierten Gewindes an Stelle einer Auslaufarmatur an die vorhandene Wasserleitung geschraubt wird. Im Inneren des Zylinders befinden sich zwei Scheiben mit versetzten Löchern, die den Wasserdurchfluss regulieren und einen scharf gebündelten Wasserstrahl erzeugen. Zur Körperschallanregung von Duschwannen wird der Strahl aus 50 cm Höhe senkrecht von oben auf den Wannensboden gerichtet (die Anregungsstelle befindet sich einheitlich in etwa 10 cm Abstand vom Wannensablauf). Das KGN wird mit einem Fließdruck von 0,3 MPa betrieben, wobei sich ein Wasserdurchfluss von 0,25 l/s ergibt.



**Abb. 21:** Installations-Schallpegel einer Duschwanne bei Anregung mit unterschiedlichen Brauseköpfen / Strahleinstellungen im Vergleich zu dem mit dem Körperschallgeräuschnormal (KGN) ermittelten Wert (roter Balken). Die Messbedingungen waren in allen Fällen gleich.

#### 4) Empa-Pendelfallhammer

Der Empa-Pendelfallhammer ist in der SIA 181 (grundlegende Norm für den baulichen Schallschutz in der Schweiz) definiert und wird dort zur Nachbildung von Benutzungsgerauschen im Sanitärbereich (z. B. dem Herabfallen einer Shampooflasche auf den Boden einer Duschwanne eingesetzt). Die Bezeichnung "Empa" weist darauf hin, dass der Hammer ursprünglich in der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) in Dübendorf entwickelt wurde.

Der Pendelfallhammer besteht aus einem rückschlagfreien Hammerkopf mit einer Kappe aus Kunststoff (Typ KBS SwissMade G35, rückschlagfrei), der an einem drehbar gelagerten Stiel mit Winkelanschlag befestigt ist. Durch die drehbare Lagerung kann der Hammer sowohl zur Anregung von horizontalen als auch von vertikalen Flächen verwendet werden. Die kinetische Energie, mit der der Hammerkopf auf das Prüfobjekt auftrifft, ist dabei immer gleich und entspricht einem freien Fall des Kopfes aus 100 mm Höhe. Die bewegliche Masse des Pendelfallhammers (Hammerkopf und Stiel) liegt bei etwa 560 g.



**Abb. 22:** Empa-Pendelfallhammer nach SIA 181 zur Nachbildung von Benutzungsgerauschen im Sanitärbereich.

Ebenso wie das Norm-Hammerwerk (NHW) erzeugt auch der Pendelfallhammer ein starkes, gut mess- und reproduzierbares Signal. Im Detail bestehen zwischen den beiden Erregern jedoch erhebliche Unterschiede:

- Sowohl beim Norm-Hammerwerk als auch beim Pendelfallhammer erfolgt die Anregung durch einen aus einer vorgegebenen Höhe herabfallenden Hammerkopf. Wegen der größeren Fallhöhe von 100 mm anstatt 40 mm (bei etwa gleichem Gewicht der Hämmer) ist die kinetische Energie beim Aufprall des Pendelfallhammers jedoch höher, was sich in einem entsprechenden Anstieg des Installations-Schallpegels äußert. Gleichzeitig weist der Anregungsvorgang ein anderes Frequenzspektrum auf, da die Schlagfläche beim Pendelfallhammer im Gegensatz zum Norm-Hammerwerk aus Kunststoff besteht, der im Vergleich zu Stahl eine geringere Härte aufweist.
- Während das Norm-Hammerwerk mit 10 Schlägen pro Sekunde ein quasi stationäres Geräusch erzeugt, sind mit dem Pendelfallhammer nur einzelne Schläge möglich. Statt eines zeitlich gemittelten Wertes muss deshalb der Maximalpegel ge-

messen werden, was Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit merklich herabsetzt. Die Messungen erfolgen nach den Vorgaben der SIA 181, wobei über mehrere Geräuscheignisse und Messpositionen gemittelt wird (arithmetische Mittelung). Im Gegensatz zur SIA 181, die eine Normierung der Werte auf eine Nachhallzeit von 0,5 s vorsieht, werden die Messwerte im vorliegenden Fall jedoch – analog zu allen anderen untersuchten Körperschallquellen – auf eine äquivalente Schallabsorptionsfläche von 10 m<sup>2</sup> bezogen. Auch die in der SIA 181 zur Angleichung an reale Nutzergeräusche vorgesehene pauschale rechnerische Korrektur K4 (mit K4 = 12 dB(A) bei Duschwannen) wird bei den hier durchgeführten Untersuchungen nicht angewandt. Die Vorgehensweise zur Umrechnung der Messwerte ist in Abschnitt 4.1 beschrieben.

- Ebenso wie beim Norm-Hammerwerk kann es auch bei Verwendung des Pendelfallhammers in manchen Fällen (abhängig von der Beschaffenheit und der Lagerung des angeregten Bauteils) in erheblichem Maße zur Abstrahlung von Luftschall kommen. Im Gegensatz zum Norm-Hammerwerk ist eine Verminderung der Luftschallabstrahlung durch eine Abdeckhaube hier jedoch nicht möglich, da das Auslösen des Hammerschlages manuell erfolgen muss, was in eingehaustem Zustand nicht möglich ist. Insofern ist beim Pendelfallhammer teilweise mit einer verstärkten Beeinträchtigung der Messergebnisse durch Luftschallübertragung zu rechnen.

Wegen der angesprochenen Probleme ist der Pendelfallhammer für die durchgeführten Untersuchungen im Vergleich zu den anderen verwendeten Körperschallerregern insgesamt gesehen weniger gut geeignet. Die Aussagekraft der mit dem Pendelfallhammer gemessenen Werte ist deshalb nur begrenzt.

## 5.4 Schwingende Strukturen und Lagerungen

Die verwendeten Körperschallquellen setzen sich wie bereits erwähnt aus einem Schwingerreger, einer schwingenden Struktur und einer – zumeist körperschallisierenden – Lagerung oder Befestigung zusammen, die die Struktur mit dem Bauwerk verbindet (bei den hier verwendeten Quellen besteht die Lagerung oft einfach nur aus einer elastischen Unterlage). Nachdem im vorangehenden Abschnitt auf die Schwingerreger eingegangen wurde, sollen im folgenden die schwingenden Strukturen und die Verbindungselemente betrachtet werden.

Die Untersuchungen erfolgten sowohl an vollständigen bauüblichen Installationen als auch an vereinfachten idealisierten Aufbauten. Die Verwendung von bauüblichen Installationen (im vorliegenden Fall handelte es sich um Duschwannen und bodenebene Duschräume) hat den Vorteil, dass die Messung im Prüfstand unter genau den gleichen Bedingungen wie am Bau erfolgt, so dass sich die Messergebnisse direkt in die Praxis übertragen lassen. Der Nachteil besteht darin, dass die praxisgerechte Montage einer Duschwanne verhältnismäßig aufwändig ist und dass die akustischen Eigenschaften in starkem Maße von den Ausführungsdetails, wie z. B. der Untermauerung, der Verfließung und den elastischen Fugendichtungen abhängt. Die Montage einer Duschwanne auf zwei verschiedenen Decken unter genau gleichen Randbedingungen ist daher schwierig, was die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Messergebnisse beeinträchtigen kann.

Durch den Einsatz vereinfachter Körperschallquellen werden die beschriebenen Probleme vermieden, da die Quellen einfach nur auf die Decke aufgelegt werden und weitere bauliche Maßnahmen, wie Verklebung, Untermauerung und Abdichtung entfallen. Dies verringert den baulichen Aufwand erheblich und bewirkt eine deutlich verbesserte Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Außerdem erleichtert die vereinfachte Ausführung die akustische Interpretation der Messungen. Natürlich haben die gemessenen Werte keinen direkten Bezug zur baulichen Praxis. Da das Ziel des durchgeführten Forschungsvorhaben jedoch vor allem darin besteht, das akustische Verhalten von Körperschallquellen in Verbindung mit unterschiedlichen Deckenkonstruktionen zu vergleichen, ist der Praxisbezug hier nur von zweitrangiger Bedeutung.

Analog zu den Erregern werden zur Benennung der Strukturen und Lagerungen gleichfalls Kurzbezeichnungen verwendet. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die verwendeten Bezeichnungen und die zugehörigen Konstruktionen. Im Anschluss erfolgt dann eine detaillierte Beschreibung der untersuchten Aufbauten mit ihren technischen Eigenschaften.

Nr.	Kurzbezeichnung	Beschreibung
1	AE	Anhydrit-Estrich
2	TE klein	Trockenestrich, L x B = 25 cm x 75 cm
3	TE groß	Trockenestrich, L x B = 100 cm x 100 cm
4	GP o. U.	Gefälleplatte ohne Unterlage
5	GP m. U.	Gefälleplatte mit elastischer Unterlage
6	Stein	Kalksandstein
7	BD1 o. U.	bodenebene Duschfläche Nr. 1 ohne Unterlage
8	BD1 m. U.	bodenebene Duschfläche Nr. 1 mit elastischer Unterlage
9	BD2	bodenebene Duschfläche Nr. 2
10	DW1 a. WT	Duschwanne Nr. 1 auf Wannenträger
11	DW1 a. FG	Duschwanne Nr. 1 auf Fußgestell
12	DW2	Duschwanne Nr. 2
13	DW3	Duschwanne Nr. 3

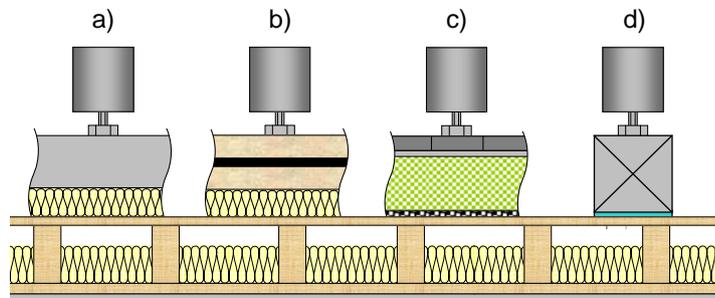
**Tab. 3:** Übersicht über die in dem Forschungsvorhaben verwendete Körperschallquellen (schwingende Strukturen und Lagerungen).

Im folgenden werden die in der obigen Tabelle aufgeführten Konstruktionen genauer beschrieben, wobei zunächst die idealisierten Körperschallquellen (Quellen Nr. 1 bis 6) und dann die bauüblichen Installationen (Quellen Nr. 7 bis 13) betrachtet werden. Abbildung 23 zeigt die idealisierten Quellen in schematischer Darstellung im Überblick.

#### 1) Anhydrit-Estrich (AE)

Beim Anhydrit-Estrich handelt es sich um ein 100 cm x 100 cm großes Teilstück eines schwimmenden Estrichs, dessen Bodenplatte aus Anhydrit, d. h. mit Gesteinskörnung vermischtem Calciumsulfat, besteht. Die Bodenplatte hat eine Dicke von  $d \cong 40$  mm und eine flächenbezogene Masse von  $m'' = 85$  kg/m<sup>2</sup>. Als elastische Unterlage dient ei-

ne 20 mm dicke Trittschalldämmplatte aus Steinwolle (Isover Akustic EP 3) mit einer dynamischen Steifigkeit von  $s' \leq 40 \text{ MN/m}^3$  (Herstellerangabe). Wegen der Härte und geringen inneren Dämpfung der Bodenplatte sind beim Anhydrit-Estrich im Frequenzbereich von etwa 125 - 500 Hz ausgeprägte Eigenschwingungen zu verzeichnen, die sich in entsprechenden Schwankungen des gemessenen Installations-Schallpegels bemerkbar machen.

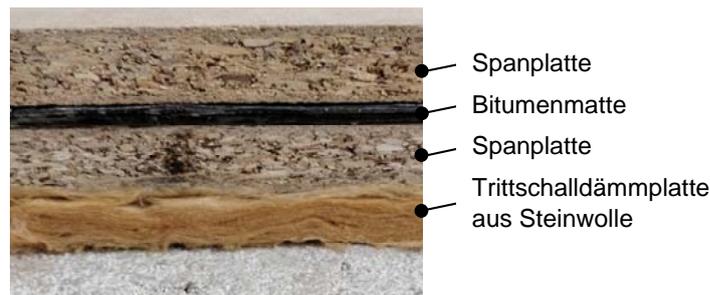


- a) Anhydrit-Estrich (AE)
- b) Trockenestrich mit Bitumenkern (TE klein bzw. TE groß)
- c) verfließte Gefälleplatte mit elastischer Unterlage (GP m. U.)
- d) Kalksandstein auf Elastomerplatte (Stein)

**Abb. 23:** Überblick über die in dem Forschungsvorhaben verwendeten idealisierten Körperschallquellen (schematische Darstellung am Beispiel des Shakers als Schwingungserreger). Die Gefälleplatte wurde sowohl mit als auch ohne elastische Unterlage untersucht.

## 2) Kleiner Trockenestrich (TE klein)

Da bei Sanitärinstallationen nicht selten schwimmende Estriche in Trockenbauweise zum Einsatz kommen, wurde ein solcher Estrich mit in das Untersuchungsprogramm aufgenommen.



**Abb. 24:** Aufbau des untersuchten Trockenestrichs (Ausschnitt, seitliche Ansicht).

Im Gegensatz zu dem oben beschriebenen Anhydrit-Estrich sollten unerwünschte Eigenschwingung der Bodenplatte beim Trockenestrich so weit wie möglich vermieden werden. Deshalb wurde die Bodenplatte in Sandwichbauweise aus zwei Spanplatten (mit  $d = 2 \times 22 \text{ mm}$  und  $m'' = 2 \times 14 \text{ kg/m}^2$ ) hergestellt, zwischen denen sich als Dämpfungskern ein Schwermatte aus Bitumen (Plastodem, einseitig selbstklebend,  $d = 6 \text{ mm}$ ,  $m'' = 10 \text{ kg/m}^2$ ) befand. Die Bitumenmatte war mit beiden Spanplatten verklebt, wobei

zum einen die auf der Unterseite der Matte werkseitig vorhandene Klebstoffschicht und zum anderen doppelseitiges Klebeband zum Einsatz kamen. Um einen vollflächigen kraftschlüssigen Kontakt sicherzustellen, wurden die Spanplatten darüber hinaus mittels versenkter Holzschrauben zusammengepresst (ca. 80 Schrauben pro Quadratmeter). Die Abmessungen der Bodenplatte waren mit 25 cm x 75 cm so bemessen, dass das verwendete Norm-Trittschallhammerwerk gerade noch auf der Platte Platz fand. Als elastische Unterlage wurde die gleiche Trittschalldämmplatte wie beim Anhydrit-Estrich verwendet (Isover Akustic EP 3 mit  $d = 20$  mm und  $s' \leq 40$  MN/m<sup>3</sup>). Der Aufbau des Trockenestrichs ist in Abb. 24 dargestellt:

### 3) Großer Trockenestrich (TE groß)

Um die Formatabhängigkeit der akustischen Eigenschaften von Körperschallquellen zu untersuchen, wurde der in Ziffer 2 beschriebene kleine Trockenestrich (TE klein) zusätzlich auch noch mit Abmessungen von 100 cm x 100 cm (also einer etwa 5,3-fach größeren Fläche) hergestellt. Abgesehen von den Maßen stimmte die Konstruktion vollständig mit dem Aufbau des kleinen Trockenestrichs überein.

### 4) Gefälleplatte ohne Unterlage (GP o. U.)

Ein wichtiger Bestandteil von bodenebenen Duschelementen ist die sogenannte Gefälleplatte, die mit den darauf befindlichen Fliesen die oberste begehbare Schicht des Aufbaus bildet. Die Bezeichnung Gefälleplatte ist darauf zurückzuführen, dass die Platte ein leichtes Gefälle in Richtung des Boden- oder Wandablaufs aufweist, so dass das beim Duschen auf die Platte herabregnende Wasser abfließen kann. Eine verflieste Gefälleplatte stellt somit eine stark vereinfachte Variante einer bodenebenen Duschfläche dar und wurde als solche ebenfalls mit in das Messprogramm aufgenommen. Die verwendete Platte bestand aus Polystyrol-Hartschaum, hatte eine Dicke von ca. 50 mm und war oberseitig praxisgerecht mit 8 mm dicken Keramikfliesen (Abmessungen 12 cm x 12 cm) belegt. Die Plattenfläche betrug 100 cm x 100 cm, die flächenbezogene Masse lag bei insgesamt ca. 22 kg/m<sup>2</sup>. Wie in der Praxis (bei Deckenaufbauten mit hoher Schalldämmung) teilweise üblich, wurde die verflieste Gefälleplatte ohne elastische Unterlage direkt auf die Deckenoberfläche aufgelegt. Für den resultierenden Installations-Schallpegel ergaben sich dabei erwartungsgemäß verhältnismäßig hohe Werte, wozu neben der fehlenden Körperschallisolation zwischen Platte und Decke auch die ausgeprägten Eigenschwingungen der Gefälleplatte beitrugen.

### 5) Gefälleplatte mit elastischer Unterlage (GP m. U.)

Um die Körperschalldämmung der oben beschriebenen Gefälleplatte ohne Unterlage (GP o. U.) zu verbessern, wurde eine zweite Variante des Aufbaus untersucht, bei der die Platte mit einer 5 mm dicker Gummigranulatmatte (EBA 40089 Silencio) unterlegt wurde. Diese Art der elastischen Lagerung ist bei bodenebenen Duschflächen in der Praxis häufig anzutreffen und vermindert die Körperschallübertragung in die Decke beträchtlich. Abgesehen von der Gummigranulatmatte wurden an der Platte keine weiteren Veränderungen vorgenommen. Der Aufbau der Gefälleplatte und die elastische Unterlage aus Gummigranulat sind in Abb. 25 dargestellt.



**Abb. 25:** Aufbau der Gefälleplatte mit elastischer Unterlage (GP m. U.) von der Seite her gesehen. Von oben nach unten sind in dem gezeigten Bildausschnitt die Fliesen, die Gefälleplatte aus Polystyrol-Hartschaum sowie (mit etwas seitlichem Überstand) die als elastische Unterlage verwendete Gummigranulatmatte zu erkennen.

#### 6) Kalksandstein (Stein)

Der für die Untersuchungen verwendete Stein wurde mit einer Steinsäge aus einem größeren Kalksandsteinblock herausgeschnitten, so dass sich ein Würfel mit einer Kantenlänge von 20 cm und einer Masse von ca. 15 kg ergab. Die Abmessungen des Steins ergaben sich aus einer vorangehenden Berechnung und waren so bemessen, dass im bauakustischen Frequenzbereich unterhalb von etwa 3000 Hz keine Eigenschwingungen der Steinstruktur erfolgten. Der Stein verhielt sich in diesem Bereich demnach wie eine ideale starre Masse bzw. – in Verbindung mit der zur elastischen Lagerung des Steins verwendeten Elastomermatte – wie ein einfaches Masse-Feder-System mit einer (berechneten) Resonanzfrequenz von etwa 60 Hz. Die unter dem Stein angeordnete Elastomermatte bestand aus einer vollflächigen 12 mm dicken Schicht aus blauem Sylomer SR 28 (offenporiger Polyurethanschaum, Produkt der Getzner Werkstoffe GmbH, statischer Elastizitätsmodul laut Hersteller ca. 0,6 N/mm<sup>2</sup>).

Natürlich weist der elastisch gelagerte Stein nur wenig Ähnlichkeit mit praxisüblichen Körperschallquellen, wie sie in Gebäuden normalerweise anzutreffen sind, auf. Wegen seiner einfachen, klar definierten akustischen Eigenschaften eignet er sich aber hervorragend, um Messverfahren zu verifizieren oder theoretische Berechnungen messtechnisch zu überprüfen. In dieser Weise kam er auch in dem durchgeführten Forschungsvorhaben vorwiegend zum Einsatz.

#### 7) Bodenebene Duschfläche Nr. 1 ohne Unterlage (BD1 o. U.)

Die bodenebene Duschfläche Nr. 1 wurde – so wie auch die nachfolgend beschriebenen Sanitärinstallationen – von einem der am Projekt beteiligten Industriepartner zur Verfügung gestellt. Auch der Einbau in den Prüfstand erfolgt durch die Industriepartner, wobei die Montage in genau der gleichen Weise wie am Bau vorgenommen wurde (d. h. mit Untermauerung, Verfliesung, elastischer Abdichtung der Fugen mit Silikon, etc.). Im Gegensatz zu den Messungen an den zuvor beschriebenen idealisierten Körperschallquellen lagen hier also bauübliche praxisnahe Versuchsbedingungen vor. Da die untersuchten Konstruktionen dem aktuellen Produktprogramm der beteiligten Hersteller entstammen, werden zur Wahrung der Vertraulichkeit nachfolgend keine Namen

oder Produktbezeichnungen genannt. Auch die genauen Konstruktionsdetails, wie z. B. spezielle Schallschutzlösungen, unterliegen der Vertraulichkeit. Die nachfolgende Beschreibung der Aufbauten beschränkt sich deshalb auf eine allgemeine Darstellung der akustisch maßgeblichen Konstruktionsmerkmale, was für die Zielsetzung des durchgeführten Forschungsvorhabens jedoch völlig ausreichend ist.

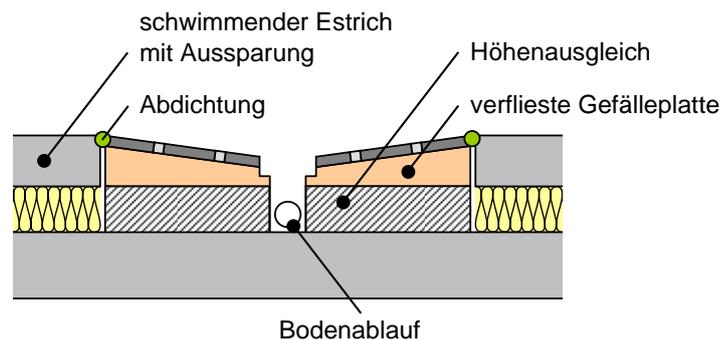
Der Einbau bodenebener Duschflächen erfolgt grundsätzlich in der Aussparung eines schwimmenden Estrichs, da nur auf diese Weise an den Bauteilrändern ebene Übergänge ohne Absatz oder Schwelle realisierbar sind. Dies gilt sowohl für Holzbalken- als auch für Massivdecken, so dass die Duschfläche in beiden Fällen direkt auf der Rohdecke aufliegt. Die hier untersuchten Duschflächen hatten einheitlich Abmessungen von 100 cm x 100 cm, weshalb die erforderlichen Aussparungen im Estrich mit 105 cm x 105 cm ein wenig größer ausgeführt wurden. Hierdurch war genügend Platz zur Abdichtung und Verfließung der Elemente vorhanden. Die Aussparungen befanden sich – wie auch am Bau in den meisten Fällen üblich – in den Raumecken.

Bei der Massivdecke wurden aus Zeit- und Kostengründen statt eines vollflächigen schwimmenden Estrichs zur Durchführung der Untersuchungen Estrich-Teilstücke eingebaut. Die Fläche der Estrich-Teilstücke war je nach Aufbau unterschiedlich und lag bei etwa 2 - 5 m<sup>2</sup> (die Abmessungen wurden so gewählt, dass um die untersuchte Installation herum ein Estrichstreifen mit einer Breite von mindestens 40 cm verblieb). Abgesehen von der verringerten Fläche entsprachen die Estrich-Teilstücke dem in Abschnitt 5.2 beschriebenen Aufbau (60 mm Zementestrich auf 40 mm Glaswolle Isover Akustic EP 1), wie er – in vollflächiger Ausführung – auch auf der untersuchten Holzbalkendecke zum Einsatz kam. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 26 dargestellt. Den durchgeführten Voruntersuchungen zufolge ist bei der Verwendung genügend großer Estrich-Teilstücke gegenüber einem vollflächigen schwimmenden Estrich mit keinen merklichen Unterschieden bei der Trittschalldämmung und dem Installations-Schallpegel zu rechnen. Dies trifft sowohl auf Estriche in mineralischer Bauweise als auch auf Trockenestriche zu.



**Abb. 26:** Teilflächiger schwimmender Estrich (Ausschnitt) auf der Massivdecke im Prüfstand P9. Der dargestellte Aufbau bestand aus einer 60 mm dicken Bodenplatte aus Zementestrich, die auf einer 40 mm dicken Trittschalldämmplatte aus Glaswolle (Isover Akustic EP 1) gelagert war.

Im einfachsten Fall (d. h. bei Elementen ohne elastische Unterlage) wird bei der Montage von bodenebenen Duschelementen zunächst eine Hartschaumplatte auf die Rohdecke aufklebt (die Verklebung erfolgt zumeist mit Montageschaum oder auch mit Fliesenkleber). Die Platte dient als Höhenausgleich und enthält Aussparungen für den Ablaufsiphon und das Ablaufrohr. Auf den Unterbau wird dann anschließend, wie in Abb. 27 schematisch dargestellt, eine Gefälleplatte mit Fliesen aufgebracht. Das hier untersuchte Element verfügte über einen zentralen Bodenablauf (in der Praxis sind durchaus auch andere Konstruktionen, wie z. B. Rinnen oder Wandabläufe üblich) und hatte eine Gesamthöhe von etwa 140 mm, weshalb der vorhandene schwimmende Estrich um des Element herum noch etwas angehoben werden musste (siehe Abb. 28).



**Abb. 27:** Schematischer Aufbau der untersuchten bodenebenen Duschfläche ohne elastische Unterlage (BD1 o. U.) im Schnitt.

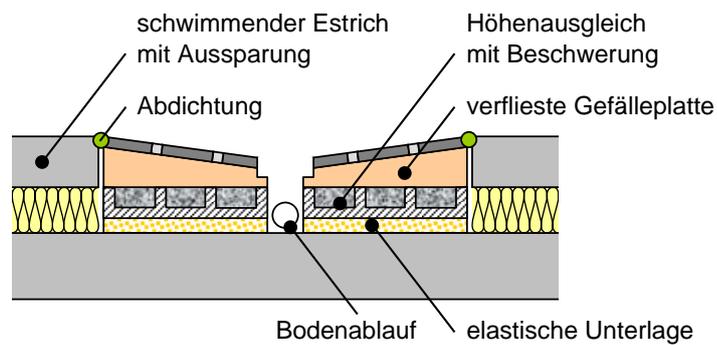


**Abb. 28:** Aussparung im vollflächigen schwimmenden Estrich auf der Holzbalkendecke (linkes Bild) und bodenebene Duschfläche BD1 o. U. in fertigem Zustand nach dem Einbau in die Aussparung (rechtes Bild). Die Duschfläche umfasst hierbei nur den mit weißen Fliesen belegten Bereich, während die umgebenden grauen Fliesen den Bodenbelag des schwimmenden Estrichs bilden.

#### 8) Bodenebene Duschfläche Nr. 1 mit elastischer Unterlage (BD1 m. U.)

Mit der in Ziffer 7 beschriebenen Duschfläche ohne Unterlage (BD1 o. U.) ist die Einhaltung der Schallschutzanforderungen in der Praxis häufig nicht möglich. Eine wirksame Möglichkeit, um die Körperschalldämmung der Konstruktion zu verbessern, besteht darin, die Platte für den Höhenausgleich durch ein mit Estrichbeton gefülltes Schalungselement zu ersetzen und das Element mit einer elastischen Matte zu unterlegen (siehe Skizze in Abb. 29). Das auf diese Weise entstehende Masse-Feder-Masse System setzt die Körperschallübertragung von der Duschfläche in die Decke – bei etwa gleich-

bleibender Bauhöhe – deutlich herab. Die elastische Matte unter dem Schalungselement (im vorliegenden Fall mit einer Dicke von ca. 15 mm) stellt dabei einen Kompromiss dar. Um eine optimale Körperschallisolation zu erreichen, sollte sie an und für sich eine möglichst geringe dynamische Steifigkeit aufweisen. Ist sie jedoch zu weich, so kann es bei statischer Belastung der Duschfläche zu einer übermäßig starken Einsenkung und damit zum Abriss der Fugendichtungen und zu Undichtigkeiten kommen. Die Auswahl einer geeigneten Elastomerunterlage ist deshalb Entwicklungs- und Erfahrungssache.



**Abb. 29:** Schematischer Aufbau der untersuchten bodenebenen Duschfläche mit elastischer Unterlage (BD1 m. U.) im Schnitt.



**Abb. 30:** Verfüllung des Schalungselements der Duschfläche BD1 m. U. mit Estrichbeton (linkes Bild). Im rechten Bild ist die fertige Duschfläche (weiß verflieser Bereich) auf der Massivdecke zu sehen. Die Montage auf der Decke erfolgte in der Aussparung eines Estrich-Teilstücks (Bereich mit grauen Fliesen).

Wie aus den Bildern 28 und 30 zu entnehmen ist, besteht zwischen der Duschfläche Nr. 1 mit und ohne elastische Unterlage (BD1 m. U. und BD1 o.. U.) in fertigem Zustand äußerlich kaum ein Unterschied. Das Bild in Abb. 30 hat deshalb hauptsächlich den Sinn, die oben erwähnte Montage der Duschfläche in Verbindung mit einem teilflächigen schwimmenden Estrich zu veranschaulichen.

#### 9) Bodenebene Duschfläche Nr. 2 (BD2)

Bei der bodenebenen Duschfläche BD2 handelt es sich gleichfalls um einen 100 cm x 100 cm großes Element, das unter Verwendung eines Unterbauplatte aus Polystyrol-

Hartschaum in der Aussparung eines schwimmenden Estrichs montiert wird. Gegenüber der zuvor beschriebenen Duschfläche BD1 bestehen jedoch folgende Unterschiede:

- Die Bauhöhe beträgt insgesamt nur etwa 90 mm und ist damit ca. 50 mm geringer als bei der Duschfläche BD1.
- Zwischen der Duschfläche und der Decke befindet sich zwar eine körperschallisierende Gummigranulatmatte, eine zusätzliche Beschwerung mit Estrichbeton ist jedoch nicht vorhanden.
- Statt aus Fliesen besteht die Oberseite der Duschfläche aus einer speziellen Mineralwerkstoffplatte.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die fertig eingebaute Duschfläche auf der Holzbalkendecke:



**Abb. 31 :** Bodenebene Duschfläche BD2 auf der Holzbalkendecke (Montage in einer Aussparung des auf der Decke verlegten schwimmenden Estrichs). Die Duschfläche besteht aus einer fugenlosen Mineralwerkstoffplatte, die bis zur umgebenden Umrandung aus grauen Fliesen reicht.

#### 10) Duschwanne Nr. 1 auf Wannenträger (DW1 a. WT)

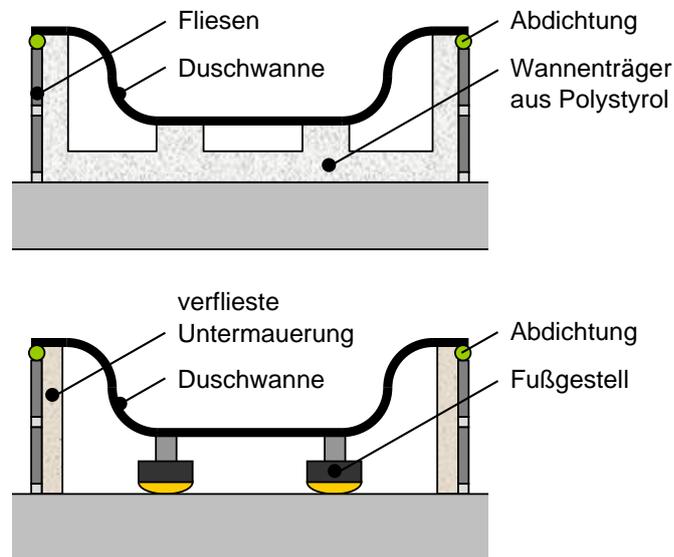
Für die durchgeführten Untersuchungen wurden unterschiedliche Arten von Duschwannen verwendet. Bei der Wanne DW1 handelt es sich um eine Duschwanne in klassischer Bauweise. Sie besteht aus Sanitär-Acryl, hat die Abmessungen  $L \times B \times H = 90 \text{ cm} \times 90 \text{ cm} \times 7,5 \text{ cm}$  und wiegt ca. 11 kg. Da derartige Wannens nicht für barrierefreie Bäder bestimmt sind, werden sie – auch aus Schallschutzgründen – häufig auf schwimmende Estriche gestellt. Diese Art der Aufstellung wurde auch in dem durchgeführten Forschungsvorhaben verwendet.

Der Einbau von Duschwannen in Sanitärräume kann auf unterschiedliche Art erfolgen. In der Praxis sind vor allem die beiden nachfolgend beschriebenen Montageweisen gebräuchlich, die in Abb. 32 schematisch veranschaulicht sind:

- a) Bei der Verwendung eines Wannenträgers wird die Duschwanne in vorgefertigtes Formteil aus Polystyrol gelegt und dort mit geeignetem Klebstoff (zumeist Zwei-

komponenten-Montageschaum) befestigt. Zur Befestigung des Wannenträgers am Boden wird gleichfalls Montageschaum verwendet. Nach der Verfliesung der Seitenflächen des Wannenträgers (die Fliesen werden mit Fliesenkleber direkt auf das Polystyrol geklebt) werden die Fugen abschließend mit einem geeigneten elastischen Dichtstoff (in der Regel Sanitärsilikon) versiegelt.

- b) Bei der Verwendung eines Fußgestells stützt sich die Wanne auf Füßen ab, die auf dem Boden des Sanitärraums stehen. Die Zahl der Füße ist unterschiedlich, in der Regel sind aber mindestens vier Füße vorhanden. Häufig verfügen die Füße über elastische Kappen, die die Körperschallübertragung in den Boden herabsetzen. Nach dem Ausrichten der Wanne werden die Wannenträger untermauert, wobei statt der früher üblichen Leichtbetonplatten (daher auch der Begriff "untermauern") heute in der Regel Hartschaumplatten verwendet werden. Das Verfliesen der Untermauerung und das Abdichten der Fugen erfolgen analog zur Vorgehensweise bei Wannenträgern.



**Abb. 32:** Einbau einer Duschwanne unter Verwendung eines Wannenträgers (oben) und eines Fußgestells (unten). Schematische Darstellung zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Montageweisen.

Um die akustischen Unterschiede zwischen den beschriebenen Montageweisen zu untersuchen, erfolgte der Einbau der Duschwanne DW1 sowohl mit einem Wannenträger als auch mit einem Fußgestell, wobei zwei baugleiche Wannen (Beschreibung siehe oben) zum Einsatz kamen. Die Einbausituation unter Verwendung des Wannenträgers (Duschwanne Nr. 1 auf Wannenträger, DW1 a. WT) ist in Abb. 33 dargestellt:



**Abb. 33:** Duschwanne mit Wannenträger (DW1 a. WT) auf der Holzbalkendecke. Die Montage erfolgte auf dem vorhandenen schwimmenden Estrich, wobei der Wannenträger direkt (d. h. ohne elastische Unterlage) auf den Estrich aufgeklebt wurde.



**Abb. 34:** Duschwanne mit Fußgestell (DW1 a. FG) auf der Holzbalkendecke mit schwimmendem Estrich. Im oberen Bild ist das verwendete Fußgestell, im unteren die fertig eingebaute Wanne dargestellt.

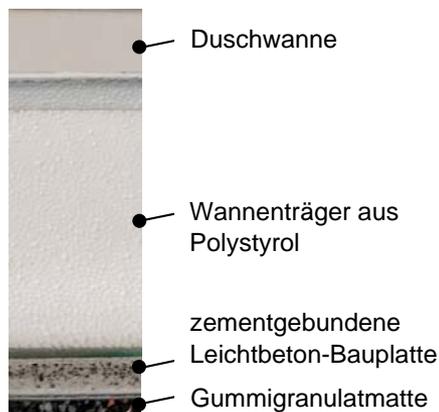
#### 11) Duschwanne Nr. 1 auf Fußgestell (DW1 a. FG)

Wie oben erwähnt, wurde die Duschwanne DW1 neben dem Einbau mit einem Wannenträger außerdem auch in Verbindung mit einem Fußgestell untersucht. Das verwendete Fußgestell und die fertig eingebaute und verflieste Wanne sind in Abb. 34

dargestellt. Im Gegensatz zum Aufbau mit dem Wannenträger, der sich etwa in Wandmitte befand, wurde das Fußgestell in einer Ecke des Installationsraums eingebaut. Dies war aufgrund der Raumbelagung nicht anders möglich, hat aber den vorliegenden Erfahrungen zufolge nur geringen Einfluss auf den resultierenden Installations-Schallpegel.

#### 12) Duschwanne Nr. 2 (DW2)

Wie die Wanne DW1 besteht auch die Duschwanne DW2 aus Sanitäracryl. Mit den ihren Abmessungen von  $L \times B \times H = 100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm}$  ist sie aber etwas größer und gleichzeitig deutlich flacher. Das Gewicht beträgt etwa 21 kg und ist damit fast doppelt so hoch wie bei der Wanne DW1. Durch die flache Bauform ist die Wanne insbesondere für den bodenebenen Einbau geeignet. Deshalb wurde sie für die Untersuchungen nicht auf dem Estrich, sondern vielmehr – in ähnlicher Weise wie die untersuchten Duschflächen – in einer Aussparung des Estrichs montiert. Dabei wurde der in der Abb. 35 dargestellte Aufbau verwendet. Eine Darstellung der fertig eingebauten Wanne ist in Abb. 36 wiedergegeben.



**Abb. 35:** Einbau der Duschwanne DW2 in die Aussparung des auf der Holzbalkendecke vorhandenen schwimmenden Estrichs. Schnittdarstellung mit Bezeichnung der einzelnen Schichten.



**Abb. 36:** Duschwanne DW2 in fertig eingebautem Zustand in der Aussparung des schwimmenden Estrichs.

### 13) Duschwanne Nr. 3 (DW3)

Bei der Duschwanne DW3 handelt es sich um eine 90 cm x 90 cm große Wanne, die im Gegensatz zu den übrigen untersuchten Duschwannen statt aus Sanitäracryl aus Stahl-Email besteht. Daher weist sie auch mit ca. 22 kg das höchste Gewicht auf. Obgleich es sich um eine Wanne mit flacher Bauform handelt (Wannenhöhe 2,5 cm), wurde sie nicht bodeneben eingebaut, sondern unter Verwendung eines Wannenträgers auf den für die Untersuchungen verwendeten schwimmenden Estrich montiert. Dabei wurde der Wannenträger nicht direkt auf dem Estrich befestigt (dies war bei der zuvor untersuchten Duschwanne DW1 der Fall), sondern mit einer zusätzlichen Körperschallisolation versehen, die aus einer zwischen Wannenträger und Estrich eingeklebten Gummi-granulatmatte bestand. In der nachfolgenden Abbildung ist die Wanne in fertig eingebautem und verfliesem Zustand zu sehen:



**Abb. 37:** Duschwanne DW3 in fertig eingebautem und verfliesem Zustand. Die dargestellte Montage erfolgte auf dem schwimmenden Estrich der Holzbalkendecke.

## 6 Messbedingungen und Vorversuche

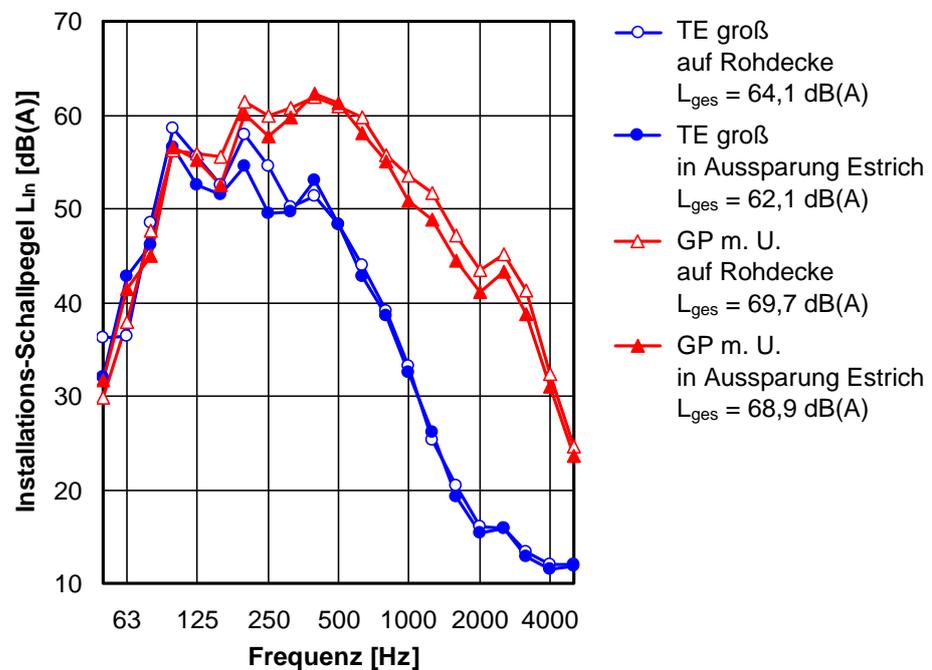
In dem Forschungsvorhaben wurden teilweise Messverfahren und Versuchsaufbauten eingesetzt, zu denen es bislang nur wenig Erfahrung gab. Daher war es erforderlich, die vorhandenen Messbedingungen zu untersuchen und ihren Einfluss auf die Messergebnisse zu bestimmen. Die wichtigsten Ergebnisse der hierzu durchgeführten Vorversuche sind nachfolgend dargestellt.

### 6.1 Aussparungen im schwimmenden Estrich

Wegen der gewünschten Barrierefreiheit und auch aus gestalterischen Gründen werden Duschelemente heute vielfach als bodenebene Duschflächen ausgeführt. Dazu wird der im Sanitärraum normalerweise vorhandene schwimmende Estrich im Bereich des Duschelements ausgespart und das Element – zumeist mit integrierter Körperschalldämmung – in der Aussparung direkt auf der Rohdecke montiert. Eine Beschreibung der geschilderten Einbausituation findet sich in Abschnitt 5.4.

Zur akustischen Bewertung der beschriebenen Einbausituation ist es wichtig, zu wissen, ob sich der schwimmende Estrich in diesem Fall überhaupt auf den Installations-Schallpegel auswirkt, oder ob er in akustischer Hinsicht zu vernachlässigen ist. Falls die Schallübertragung überwiegend durch Körperschall erfolgt und die Luftschallabstrahlung der Duschfläche – wie in der Praxis zumeist der Fall – nur eine untergeordnete Rolle spielt, ist Letzteres zu vermuten, da ein mineralischer Estrich die statische Masse einer Holzbalkendecke zwar beträchtlich erhöht, durch die Trittschalldämm-Matte jedoch schwingungstechnisch weitgehend von der Decke entkoppelt ist.

Da zu dieser Fragestellung bislang nur wenige Erfahrungen vorlagen, wurden Vergleichsmessungen durchgeführt, bei denen ein Prüfobjekt zunächst in der Aussparung eines schwimmenden Estrichs montiert wurde. Nach Messung des Installations-Schallpegels wurde der Estrich entfernt und die Messung – mit demselben Prüfobjekt an der gleichen Stelle der Rohdecke – wiederholt. Die ermittelten Messergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:



**Abb. 38:** Installations-Schallpegel einer Körperschallquelle bei Einbau in die Aussparung eines schwimmenden Estrichs und – unter ansonsten gleichen Bedingungen – auf der Rohdecke ohne Estrich. Die Messungen erfolgten an dem 100 cm x 100 cm großen Trockenestrich (TE groß) sowie der verfliesen Gefälleplatte mit Unterlage aus Gummigranulat (GP m. U.). Zur Körperschallanregung diente jeweils das Normhammerwerk. Die untersuchte Holzbalkendecke und der Estrich sind in Abschnitt 5.2 beschrieben.

Wie den in der obigen Abbildung dargestellten Ergebnissen zu entnehmen ist, unterscheidet sich der Installations-Schallpegel mit und ohne Estrich nur geringfügig voneinander (maximale Abweichung im Gesamtschallpegel  $\Delta L_{ges} \cong \pm 1,0$  dB). Vermutlich sind die Abweichungen weniger auf den akustischen Einfluss des Estrichs als vielmehr auf

unvermeidliche kleine Unterschiede bei der Positionierung der Prüfobjekte und des Hammerwerks zurückzuführen.

Es ist daher davon auszugehen, dass beim Einbau einer Körperschallquelle in die Aussparung eines schwimmenden Estrichs die restliche Fläche des Estrichs keinen nennenswerten Einfluss auf das Schwingungsverhalten des Aufbaus hat. Hinsichtlich der Körperschallübertragung verhalten sich die Quelle und die Decke so, als ob der Estrich gar nicht vorhanden wäre. Obgleich dieses Ergebnis für eine Holzbalkendecke mit einem schwimmenden Estrich in mineralischer Bauweise ermittelt wurde, lässt es sich sinngemäß auch auf Trockenestriche sowie schwimmende Estriche auf Massivdecken übertragen.

## 6.2 Grundgeräusch und Grenzdämmung

Da der im Empfangsraum gemessene Installations-Schallpegel teilweise nur verhältnismäßig gering war, war eine Beeinträchtigung der Messergebnisse durch das im Raum vorhandene Fremdgeräusch leider nicht immer zu vermeiden. Die für die Messungen verwendeten Prüfstände verfügten zwar über eine gute akustische Abschirmung nach außen und wiesen deshalb einen niedrigen Grundgeräuschpegel auf. Bei den meisten Messungen spielte das Grundgeräusch deshalb nur eine untergeordnete Rolle [86]. Bei Körperschallquellen mit geringer Schall-Leistung (vor allem bei Anregung mit dem Shaker), die auf einer Decke mit hoher Körperschalldämmung angebracht wurden, ergaben sich jedoch erhebliche Probleme.

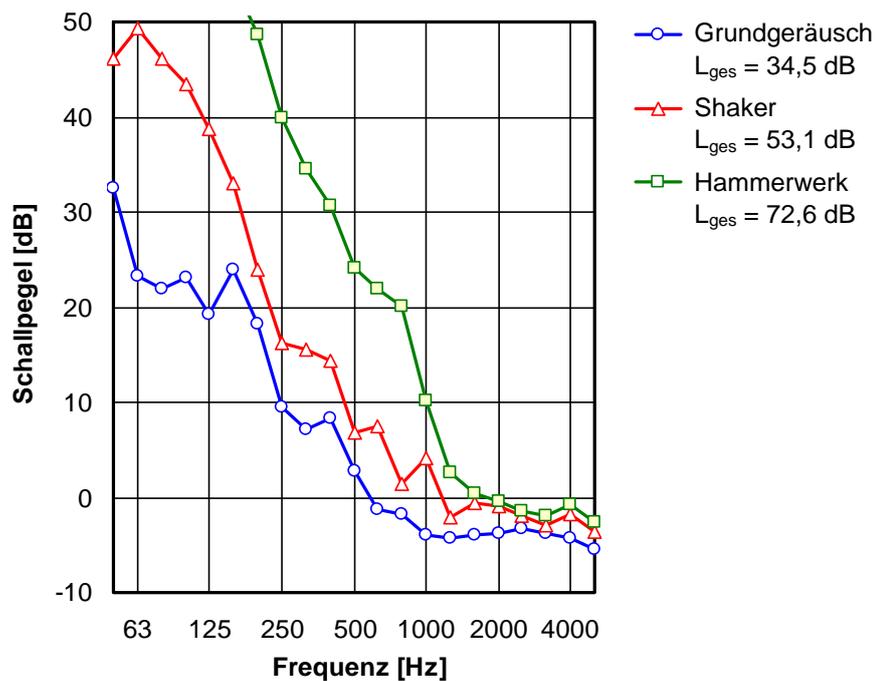
In Abb. 39 ist die Problematik am Beispiel der Holzbalkendecke mit schwimmendem Estrich und abgehängter Unterdecke (HBD + SE + UD) veranschaulicht. Diese Decke weist von allen verwendeten Deckenkonstruktionen im oberen Frequenzbereich die höchste Körperschalldämmung auf und ist deshalb in Bezug auf den Einfluss des Grundgeräuschs als besonders kritisch anzusehen. Als repräsentative Körperschallquelle wurde der Trockenestrich mit den Abmessungen 100 cm x 100 cm (TE groß) ausgewählt, wobei die Geräuschregung zum einen mit dem Shaker und zum anderen mit Norm-Trittschallhammerwerk erfolgte.

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, ist bei Shaker-Anregung bereits oberhalb von etwa 160 Hz eine starke Beeinträchtigung der Messergebnisse durch Fremdgeräusche zu verzeichnen. Bei Frequenzen über 1000 Hz liefert das Grundgeräusch den maßgebenden Anteil zu dem gemessenen Schallpegel, so dass sich die für den Shaker ermittelten Messergebnisse in diesem Frequenzbereich nicht mehr verwenden lassen. Bei der Anregung mit dem Norm-Trittschallhammerwerk ist die Situation weniger kritisch, da das Hammerwerk – zumindest bei tiefen und mittleren Frequenzen – ein weitaus stärkeres Anregungssignal als der Shaker erzeugt. Ab einer Frequenz von etwa 1000 Hz wird jedoch auch hier die Messung in erheblichem Maße durch Fremdgeräusche beeinträchtigt.

Es ist daher zu konstatieren, dass der bei hohen Frequenzen gemessene Installations-Schallpegel vielfach nur beschränkt aussagefähig ist, da er in erheblichem Maße durch Fremdgeräusche beeinflusst wird. Bei der Anregung mit dem Shaker, der für die durch-

geführten Untersuchungen unverzichtbar ist, trifft dies sogar teilweise schon im Bereich mittlerer Frequenzen zu. Glücklicherweise ist für die Untersuchungen im vorliegenden Fall hauptsächlich der Gesamtschallpegel der Installationsgeräusche maßgebend, der durch energetische Addition aller Terzwerte gebildet wird. Da die pegelbestimmenden Geräuschanteile vor allen aus dem unteren Bereich des Spektrums stammen, ist der Einfluss des Grundgeräuschs beim Gesamtschallpegel weitaus geringer, als dies für die hochfrequenten Terzwerte der Fall ist. Dies ist auch aus der Legende in Abb. 39 ersichtlich, wenn man die Gesamtschallpegel für das Grundgeräusch und die Shaker-Anregung miteinander vergleicht (die Pegeldifferenz beträgt  $53,1 \text{ dB} - 34,5 \text{ dB} = 18,6 \text{ dB}$ ).

Die obige Aussage trifft auch auf den gemessenen Installations-Schallpegel zu, obgleich der Installations-Schallpegel aus dem A-bewerteten Frequenzspektrum gebildet wird und die A-Abwertung den Pegel der tieffrequenten Geräuschanteile absenkt. Der Abstand zwischen Mess-Signal und Grundgeräusch fällt deshalb beim Installations-Schallpegel nicht ganz so hoch wie beim unbewerteten Gesamtschallpegel aus, ist aber in der Praxis noch immer ausreichend. Für das in Abb. 39 betrachtete Beispiel beträgt der Fremdgeräuschabstand beim Installations-Schallpegel bei Anregung mit dem Shaker  $15,0 \text{ dB}$ .



**Abb. 39:** Grundgeräuschpegel im Empfangsraum des Prüfstands P8 im Vergleich zu dem von zwei verschiedenen Körperschallquellen erzeugten Empfangsraumpegel. Im Prüfstand war die Decke HBD + SE + UD (Holzbalkendecke mit schwimmendem Estrich und abgehängter Unterdecke) eingebaut. Als Körperschallquelle diente der  $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$  große Trockenestrich (TE groß), der mit dem Shaker oder dem Norm-Trittschallhammerwerk angeregt wurde. In der Legende zu den Messkurven ist jeweils der zugehörige Gesamtschallpegel  $L_{\text{ges}}$  mit angegeben.

Alles in allem ist der Einfluss des Grundgeräuschs auf den gemessenen Installations-Schallpegel im vorliegenden Fall also durchaus als Störfaktor anzusehen. Andererseits betreffen die Störungen im Wesentlichen nur die Anregung mit dem Shaker und beschränken sich auch dort vor allem auf den Bereich hoher Frequenzen, weshalb die betreffenden Messwerte nur bedingt verwendbar sind. Bezogen auf den Gesamtschallpegel der Installationsgeräusche – also den für das Forschungsvorhaben maßgebenden akustischen Kennwert – ist der Einfluss des im Messraum vorhandenen Grundgeräuschs hingegen als unbedenklich anzusehen. Dies gilt um so mehr, als bei Bedarf eine rechnerische Fremdgeräuschkorrektur nach DIN EN ISO 10140-4 erfolgte, die die Problematik zwar nicht vollständig aber doch zumindest teilweise entschärft.

Die Grenzdämmung der verwendeten Prüfstände ist für den gemessenen Installations-Schallpegel nicht von Bedeutung, sondern betrifft nur das Schalldämm-Maß und den Norm-Trittschallpegel der untersuchten Decken. Da es sich bei den betrachteten Decken um keine hochschalldämmenden Konstruktionen handelte, war die Grenzdämmung der Prüfstände im allgemeinen ausreichend. In den Terzen, in denen der Abstand zwischen Messwert und Grenzdämmung weniger als 10 dB betrug, wurde eine rechnerische Korrektur nach DIN EN ISO 10140-2 [87] durchgeführt. Dies war jedoch nur in wenigen Fällen nötig. Da die für das Schalldämm-Maß und den Norm-Trittschallpegel gemessenen Werte überdies nur zur Kennzeichnung der Decken dienten (im Rahmen des Forschungsvorhabens als keine weitere Funktion hatten), ist eine nähere Betrachtung der Thematik hier nicht erforderlich.

### 6.3 Reproduzierbarkeit

Wie umfangreiche Erfahrungen mit der Messung von Installationsgeräuschen in Prüfständen zeigen, hängt die Reproduzierbarkeit der ermittelten Messergebnisse weniger von der Messung selbst (bei Verwendung gleichbleibender Mikrofonpositionen sind die akustischen Messwerte nahezu exakt reproduzierbar) als vielmehr von der handwerklichen Ausführung der Montagearbeiten beim Einbau der Installation in den Prüfstand ab. Dies gilt in ähnlicher Weise auch für Körperschallmessungen (d. h. der Messung von Kraft oder Schnelle), sofern die Befestigung der Körperschallaufnehmer an der schwingenden Struktur in sachgerechter Weise erfolgt. Weist die Verbindung zwischen Aufnehmer und Struktur nicht die nötige Festigkeit auf, kann dies bei hohen Frequenzen allerdings erhebliche Abweichungen zur Folge haben.

Da in dem Forschungsvorhaben viele verschiedene Installationen mit unterschiedlicher Einbauweise untersucht wurden, sind Aussagen zu Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit, die gleichermaßen für alle Aufbauten zutreffen, im vorliegenden Fall nicht möglich. Vielmehr ist grundsätzlich zwischen bauüblichen und vereinfachten Aufbauten zu unterscheiden:

- Bei den idealisierten Aufbauten beschränkt sich die Montage darauf, die Körperschallquelle an der vorher festgelegten Stelle auf die Deckenoberfläche aufzulegen. Abgesehen von der Position auf der Decke, die sich sehr genau reproduzieren lässt, sind hier keine Montageeinflüsse vorhanden. Von daher ist hier, wie die Er-

fahrungen im Rahmen des Forschungsvorhabens bestätigen, von einer sehr guten Reproduzierbarkeit der Messergebnisse auszugehen.

- Bei bauüblichen Installationen, wie z. B. untermauerten und verfliesen Duschwannen, liegt demgegenüber eine andere Situation vor. Hier beeinflusst die Ausführung der Montage die Messergebnisse in erheblichem Maße, so dass sich die Ergebnisse nur in beschränktem Maße reproduzieren lassen. Bezogen auf den A-bewerteten Gesamtschallpegel ist in diesem Fall den vorliegenden Erfahrungen zufolge von einer Reproduzierbarkeit der Messwerte in der Größenordnung von etwa  $\pm 2$  dB auszugehen [61, 62].

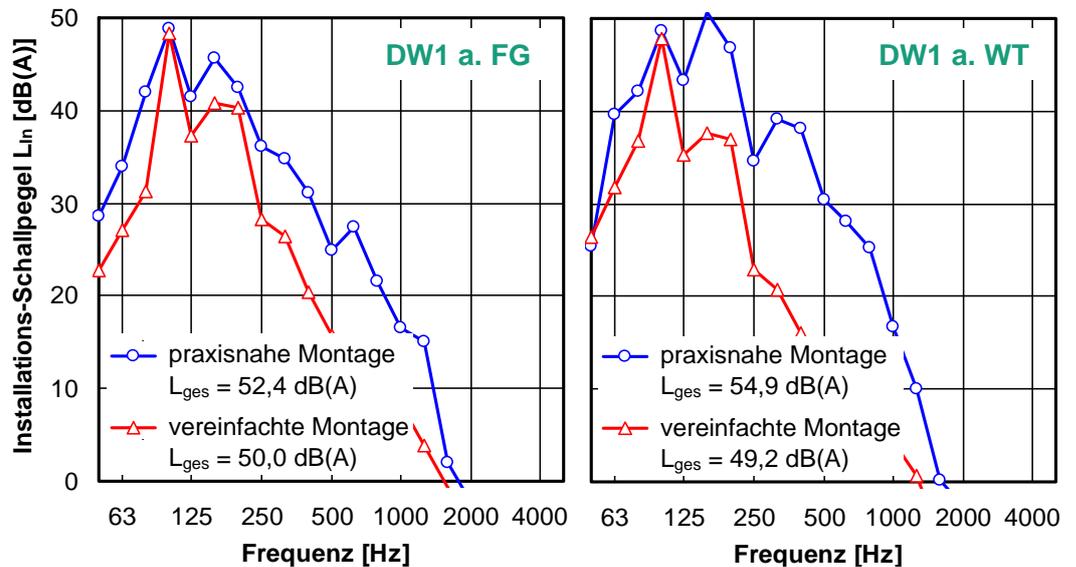
Da die praxisgerechte Montage von Duschwannen mit Untermauerung, Verfliesung und elastischer Abdichtung der Fugen einen erheblichen handwerklichen Aufwand und auch entsprechend viel Zeit erfordert, musste ein Teil der Messungen (wie z. B. die Messungen zur Quellencharakterisierung und zur Überprüfung des verwendeten Berechnungsmodells) an Duschwannen mit vereinfachten Montagebedingungen durchgeführt werden. Dies bedeutete, dass Untermauerung, Fliesen und Fugendichtungen weggelassen wurden und die Wanne mit dem jeweiligen Unterbau – d. h. Fußgestell oder Wannenträger – einfach auf die Decke gestellt wurde (der Wannenträger wurde zusätzlich mit doppelseitigem Klebeband auf der Decke befestigt). In Abb. 41 ist dies am Beispiel einer Duschwanne auf einem Fußgestell dargestellt:



**Abb. 40:** Duschwanne DW1 a. FG bei praxisgerechtem Einbau mit Untermauerung, Verfliesung und elastischer Abdichtung der Fugen (links) und bei vereinfachter Montage (rechts). Bei der vereinfachten Montage wurde die Wanne mit dem Fußgestell nur lose auf der Decke aufgestellt.

Da sich die akustischen Randbedingungen bei praxisgerechter und vereinfachter Montage erheblich voneinander unterscheiden (so bilden sich z. B. aufgrund der unterschiedlichen Randeinspannung der Wanne verschiedene Schwingungsmoden aus und auch die innere Dämpfung der Systeme unterscheidet sich erheblich), sind auch bei den Messergebnissen entsprechende Unterschiede zu erwarten. Die in Abb. 41 dargestellten Messkurven bestätigen diese Erwartung. Bei Verwendung eines Fußgestells ergibt sich zwischen praxisgerechter und vereinfachter Montage der Wanne bezogen auf den A-bewerteten Gesamtschallpegel der Installationsgeräusche ein Unterschied von 2,4 dB. Bei Montage auf einem Wannenträger beträgt der Unterschied sogar 5,7 dB. In beiden Fällen ist, wie aufgrund der verminderten Körperschallübertragung zwischen

Wanne und Decke auch zu erwarten, bei der vereinfachten Montage ein geringerer Wert des Installations-Schallpegels zu verzeichnen.



**Abb. 41:** Vergleich des bei praxisgerechtem Einbau und vereinfachter Montage gemessenen Installations-Schallpegels. Die Messungen erfolgten an der Duschwanne DW1, die zum einen unter Verwendung eines Fußgestells (DW a. FG, linkes Bild) und zum anderen mittels eines Wannenträgers (DW a. WT, rechtes Bild) eingebaut wurde. Die Messungen erfolgten auf der Holzbalkendecke mit schwimmendem Estrich und abgehängter Unterdecke (Decke HBD + SE + UD). Als Anregungsquelle diente das Norm-Hammerwerk.

## 7 Messung und Auswertung

Das durchgeführte Forschungsvorhaben umfasste ein umfangreiches Messprogramm an unterschiedlichen Körperschallquellen und Decken. Darüber hinaus kamen mehrere verschiedene Messverfahren zum Einsatz, die sich nicht nur hinsichtlich der eingesetzten Messtechnik, sondern teilweise zusätzlich auch bei der Durchführung und Auswertung der Ergebnisse voneinander unterschieden. Der nachfolgende Abschnitt gibt einen Überblick über das Messprogramm und die verwendeten Messverfahren.

### 7.1 Messprogramm und Messausrüstung

Wie aus den Ausführungen in den vorangehenden Abschnitten hervorgeht, kamen bei den durchgeführten Untersuchungen vier verschiedene Schwingungserreger und dreizehn unterschiedliche schwingende Strukturen (idealisierte Aufbauten, bodenebene Duschflächen sowie Duschwannen) zum Einsatz. In Verbindung mit den sechs verwendeten Decken ergab sich auf diese Weise durch Kombination der verschiedenen Varianten ein äußerst umfangreiches Messprogramm von theoretisch mehr als dreihundert Messungen.

Natürlich waren nicht alle möglichen Kombinationen auch praktisch sinnvoll (z. B. war eine Anregung des verwendeten Kalksandsteins mit dem Norm-Hammerwerk schon deshalb nicht möglich, weil der Stein zu klein war, um das Hammerwerk darauf aufzustellen). Andere Kombinationen von Körperschallquellen und Deckenaufbauten waren für das Forschungsvorhaben nur von geringem Interesse oder lieferten nur wenige neue Informationen. Nach Aussonderung dieser Varianten verblieb ein Untersuchungsprogramm mit etwa 140 verschiedenen Messaufbauten. Für alle diesen Aufbauten wurden Messungen des resultierenden Installations-Schallpegels durchgeführt. Darüber hinaus erfolgten zahlreiche weitere Messungen, die z. B. zur Charakterisierung der untersuchten Körperschallquellen und Decken oder zur Bestimmung der in die Decke eingeleiteten Körperschall-Leistung dienten. Hier eine kurze Übersicht über die im Rahmen des Forschungsvorhabens erfassten Messgrößen:

- Luft-, Tritt- und Körperschalldämmung der sechs untersuchten Decken,
- Eingangsadmittanz der Decken,
- von der Körperschallquelle in die Decke eingeleitete Körperschall-Leistung (für etwa dreißig verschiedene Körperschallquellen),
- von den Körperschallquellen im Empfangsraum unterhalb der Decke erzeugter Installations-Schallpegel,
- Quellenadmittanz und freie Schnelle (für acht ausgewählte Körperschallquellen),
- vom Erreger in die schwingende Struktur eingeleitete Körperschall-Leistung sowie Eingangsadmittanz der schwingenden Struktur (nur zur Ergänzung bei einem Teil der untersuchten Körperschallquellen),
- verschiedene weitere Messungen, wie z. B. Voruntersuchungen, Wiederholungsmessungen, Messung der Fremdgeräusche im Prüfstand, etc.

Wegen der großen Anzahl der durchgeführten Messungen und untersuchten Konstruktionen können in dem vorliegenden Bericht nicht alle Ergebnisse dargestellt werden. Die Darstellung beschränkt sich daher auf die wichtigsten Ergebnisse, die unter Verwendung repräsentativer Beispiele veranschaulicht werden.

Aufgrund der Vielzahl der verwendeten Messverfahren kam eine entsprechend umfangreiche und vielfältige Messausrüstung zum Einsatz. Die nachfolgende Aufzählung beschränkt sich deshalb auf die wichtigsten Geräte und Sensoren:

- als akustische Messelektronik wurde größtenteils das PULSE-System der Firma Brüel & Kjær verwendet (Multichannel PULSE Frontend type 3560-E in Verbindung mit der Software PULSE LabShop),
- für die Messung der eingeleiteten Kraft und der resultierenden Schnelle bzw. Beschleunigung wurden piezoelektrische Sensoren vom Typ 8200 und 4371 / 4383 in Verbindung mit einem Ladungsverstärker Nexus 2692-A-014 (alle Firma Brüel & Kjær) eingesetzt,
- die Messung der freien Schnelle erfolgte mit dem Laser-Vibrometer Polytec OFV 3001 / OFV 303,

- zur Messung des Luftschallpegels dienen ½"-Mikrofone Typ 46 AE der Firma G.R.A.S sowie ein 1"-Mikrofon Typ 4179 in Verbindung mit einem rauscharmen Vorverstärker Typ 2660 von Brüel & Kjær,
- zur Erzeugung der Anregungssignale wurde ein Signalgenerator vom Typ Minirator MR-Pro der Firma NTI eingesetzt.

Sowohl die Mikrofone als auch die Körperschallsensoren wurden vor den Messungen mittels geeigneter Vergleichsquellen kalibriert.



**Abb. 42:** Übersicht über die wichtigsten Komponenten der verwendeten akustischen Messausrüstung.

## 7.2 Messung von Luft- und Trittschalldämmung

Zur Messung der Luft- und Trittschalldämmung der untersuchten Decken gibt es im vorliegenden Fall nicht viel zu sagen. Die Messung der Luftschalldämmung erfolgte nach DIN EN ISO 10140-2, indem im Raum oberhalb der Decke mit einem Lautsprecher ein Luftschallfeld erzeugt und die resultierenden Schallpegel im Sende- und Empfangsraum,  $L_1$  und  $L_2$ , gemessen wurden. Das Schalldämm-Maß der Decke ergibt sich aus den gemessenen Werten gemäß

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \left( \frac{S}{A} \right) \text{ dB} \quad \text{mit} \quad A = \frac{0,16 V}{T}, \quad (22)$$

wobei  $S$  die Fläche der Decke in  $\text{m}^2$ ,  $V$  das Volumen des Empfangsraums unterhalb der Decke in  $\text{m}^3$  und  $T$  die Nachhallzeit im Empfangsraum in  $\text{s}$  bezeichnen.

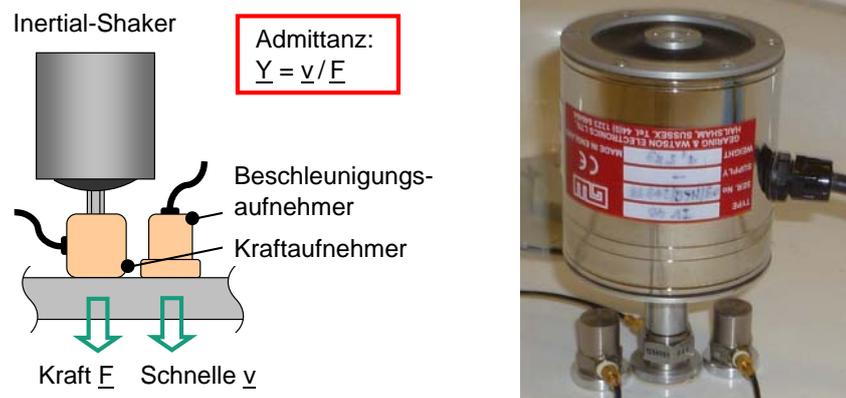
Die Trittschalldämmung der Decke wurde nach dem in DIN EN ISO 10140-3 festgelegten Verfahren bestimmt, dessen Prinzip bereits in Abschnitt 4.3 erläutert wurde. Weder bei der Luftschalldämmung noch beim Norm-Trittschallpegel gab es messtechnische Besonderheiten oder andere Abweichungen vom genormten Messverfahren. Auch die

Flankenübertragung, das Fremdgeräusch im Empfangsraum und die Luftschallanregung durch das Norm-Hammerwerk bereiteten bei den durchgeführten Messungen keine außergewöhnlichen Probleme.

### 7.3 Messung der Eingangsadmittanz

Um die Eingangsadmittanz von Bauteilen zu bestimmen, wurde die untersuchte Struktur durch eine punktförmig einwirkende, senkrecht zur Bauteiloberfläche gerichtete Wechselkraft angeregt, die mit dem verwendeten Inertial-Shaker erzeugt wurde. Die Admittanz  $\underline{Y}$  ergibt sich gemäß Gl. (12) als Kehrwert des Quotienten aus der einwirkenden Kraft  $\underline{F}$  und der resultierenden Schnelle an der Anregungsstelle  $\underline{v}$  (da zwischen Kraft und Schnelle im allgemeinen eine Phasenverschiebung besteht, müssen bei der Messung Real- und Imaginärteil erfasst werden).

Die Messung der einwirkenden Kraft erfolgte durch einen zwischen Shaker und Bauteil angebrachten piezoelektrischen Kraftaufnehmer. Zur Messung der Schnelle wurden zwei Beschleunigungsaufnehmer verwendet, die links und rechts unmittelbar neben der Anregungsstelle an der Bauteiloberfläche befestigt wurden (durch Mittelung der Signale der beiden Aufnehmer wird gegenüber der Verwendung eines einzelnen Aufnehmers eine Verbesserung der Messgenauigkeit erreicht). Die Umwandlung der gemessenen Beschleunigung in ein Schnellesignal erfolgte im Ladungsverstärker durch zeitliche Integration. Zur Befestigung der Aufnehmer am angeregten Bauteil dienten Aluminium-Scheiben, die über ein Innengewinde verfügten, in das die Aufnehmer eingeschraubt wurden. Die Aluminium-Scheiben wurden mit Zwei-Komponenten-Harz (in manchen Fällen auch mit Hartwachs) auf die Bauteiloberfläche geklebt. Das Messprinzip und der tatsächlich verwendete Aufbau sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:



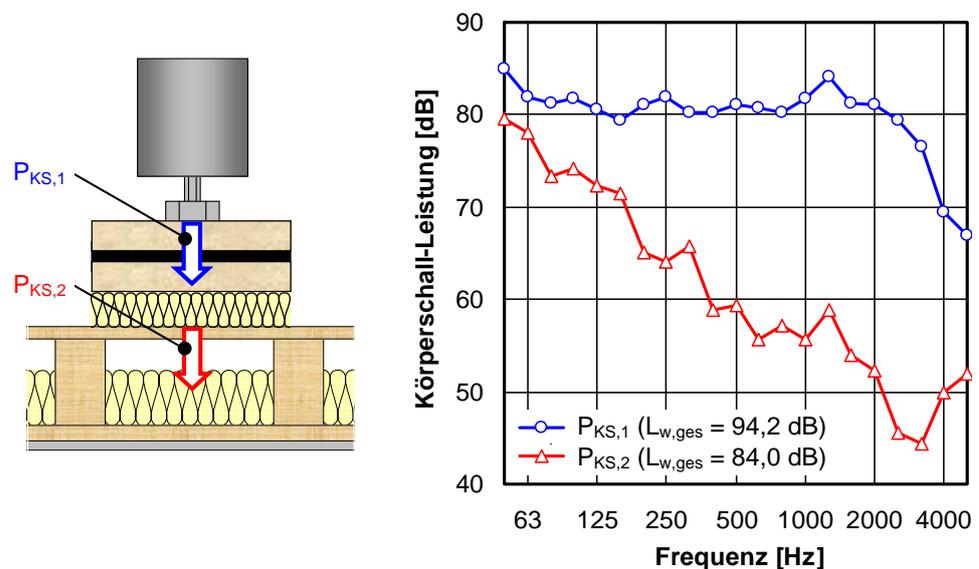
**Abb. 43:** Messprinzip zur Bestimmung der Eingangsadmittanz von Strukturen am Beispiel eines plattenförmigen Bauteils (links) und für die Messungen verwendeter Aufbau mit dem Inertial-Shaker als Anregungsquelle (rechts). Der Einsatz von zwei Beschleunigungsaufnehmern links und rechts von der Anregungsstelle verbessert die Messgenauigkeit.

## 7.4 Direkte Messung der Körperschall-Leistung

Die direkte Messung der in die Decke eingeleiteten Körperschall-Leistung erfolgt mit dem gleichen Messaufbau, der auch zur Bestimmung der Eingangsadmittanz der Decke verwendet wird (siehe Abb. 43). Wie bei der Bestimmung der Admittanz werden auch hier die durch den Shaker in die Decke eingeleitete Wechselkraft und die resultierende Schnelle an der Anregungsstelle gemessen. Aus diesen beiden Werten kann dann über das Kreuzleistungsspektrum gemäß Gl. (14) die Körperschall-Leistung berechnet werden.

Das beschriebene Verfahren stellt die einfachste und genaueste Methode zur Bestimmung der in ein Bauteil eingeleiteten Körperschall-Leistung dar. Es ist jedoch nur unter bestimmten Voraussetzungen anwendbar:

- Die Körperschallanregung des Bauteils muss mit einer Quelle erfolgen, die eine punktförmige einwirkende Kraft erzeugt, die senkrecht zur Bauteiloberfläche gerichtet ist. Diese Bedingungen erfüllt normalerweise nur ein Shaker.
- Wenn der Shaker als Bestandteil einer Körperschallquelle verwendet wird (z. B. zur Anregung einer auf der Decke aufliegenden Duschwanne), erhält man mit dem obigen Messverfahren zwar die in die Duschwanne eingeleitete Leistung. Diese unterscheidet sich jedoch im allgemeinen beträchtlich von der in die Decke übertragenen Leistung, da sich zwischen Wanne und Decke normalerweise eine körperschallisierende Auflage befindet. Außerdem wird ein Teil der in die Duschwanne eingeleiteten Leistung durch innere Dämpfung in der Wanne absorbiert. Das hat zur Folge, dass die in die Decke übertragene Körperschall-Leistung im allgemeinen – von Resonanzeffekten abgesehen – deutlich kleiner als die in die Wanne eingeleitete Leistung ist. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 44 dargestellt.



**Abb. 44:** Vergleich zwischen der vom Shaker in die schwingende Struktur eingeleiteten Körperschall-Leistung  $P_{KS,1}$  und der von der Struktur in die Decke über-

tragenen Leistung  $P_{KS,2}$  am Beispiel des auf der Holzbalken-Rohdecke (HBD) aufliegenden Trockenestrichs mit den Maßen 75 cm x 25 cm (TE klein).

Wie aus den obigen Ausführungen hervorgeht, ist die direkte Messung der in die Decke eingeleiteten Körperschall-Leistung im Rahmen des Forschungsvorhabens nur in einem einzigen Fall, nämlich bei direkter Anregung der Decke mit dem verwendeten Inertial-Shaker, möglich. Für alle anderen untersuchten Körperschallquellen muss ein alternatives Verfahren eingesetzt werden, das im nachfolgenden Abschnitt beschrieben wird.

## 7.5 Indirekte Messung der Körperschall-Leistung

Ogleich eine direkte Messung der in die Decke eingeleiteten Körperschall-Leistung natürlich vorzuziehen ist, ist dies in der Praxis leider nur in wenigen Fällen möglich, so dass eine indirekte Ersatzmethode herangezogen werden muss. Im vorliegenden Fall wird ein Vergleichsverfahren verwendet, bei dem die Körperschallquelle mit unbekannter Leistung mit einer Quelle verglichen wird, deren Körperschall-Leistung bekannt ist. Als letztgenannte Quelle dient ein an der Decke angebrachter Shaker, bei dem die in die Decke eingeleitete Körperschall-Leistung durch Messung von Kraft und Schnelle an der Anregungsstelle ermittelt werden kann. Das Verfahren zur indirekten Bestimmung der Körperschall-Leistung umfasst drei Schritte:

- Zunächst wird die Decke mit dem Shaker angeregt und aus den an der Anregungsstelle gemessenen Werten von Kraft und Schnelle die in die Decke eingeleitete Körperschall-Leistung  $P_{KS,Shaker}$  bestimmt. Außerdem wird der resultierende Schalldruck im Empfangsraum  $p_{Shaker}$  gemessen.
- Im zweiten Schritt wird der Shaker entfernt und an der gleichen Stelle der Decke die zu untersuchende Körperschallquelle befestigt. Analog zur Shaker-Anregung der Decke erfolgt gleichfalls eine Messung des im Empfangsraum erzeugten Schalldrucks, der im folgenden als  $p_{Quelle}$  bezeichnet wird.
- Liegt eine lineare Übertragungskette vor (dies ist für die betrachteten Körperschallquellen und Decken in guter Näherung der Fall), lässt sich die von der untersuchten Quelle in die Decke eingeleitete Körperschall-Leistung auf einfache Weise in der Art eines mathematischen Dreisatzes berechnen, da die Leistung proportional zum Quadrat des Schalldrucks ist:

$$P_{KS,Quelle} = P_{KS,Shaker} \frac{p_{Quelle}^2}{p_{Shaker}^2} \quad (23)$$

In der in der Bauakustik üblichen Pegelschreibweise geht die obige Gleichung in den Ausdruck

$$L_{W,KS,Quelle} = L_{W,KS,Shaker} + L_{p,Quelle} - L_{p,Shaker} \quad (24)$$

über, in dem  $L_{W,KS}$  den Pegel der Körperschall-Leistung und  $L_p$  den Luftschallpegel im Empfangsraum bezeichnen.

Das oben beschriebene Verfahren ist im Prinzip für jede beliebige Körperschallquelle und für alle Bausituationen anwendbar. Bei großflächigen Körperschallquellen können sich allerdings gewisse Abweichungen ergeben, da die Anregung der Decke in diesem Fall nicht mehr genau an der gleichen Stelle wie bei Verwendung des Shakers erfolgt. Abgesehen von Holzbalken-Rohdecken, bei denen die Eingangsadmittanz der Decke davon abhängt, ob sich die Anregungsstelle über oder zwischen den Balken befindet, dürfte dies bei den meisten bauüblichen Deckenkonstruktionen in der Praxis allerdings nur eine geringe Rolle spielen. Im übrigen besteht bei Bedarf natürlich die Möglichkeit, bei der Messung über mehrere Positionen des Shakers zu mitteln.

## 7.6 Messung der Körperschalldämmung

Um das Körperschalldämm-Maß der untersuchten Decken zu ermittelt, wird die Deckenoberseite mit dem Shaker angeregt und die in die Decke eingeleitete Körperschall-Leistung  $L_{w,KS}$  nach dem in Abschnitt 7.4 beschriebenen direkten Verfahren gemessen. Des weiteren wird der resultierende Schalldruckpegel im Empfangsraum  $L_p$  bestimmt. Aus den ermittelten Messwerten ergibt sich gemäß

$$R_{KS} = L_{w,KS} - L_p + 10 \lg\left(\frac{4}{A}\right) \text{ dB} \quad \text{mit} \quad A = \frac{0,16 \text{ V}}{T} \quad (25)$$

das Körperschalldämm-Maß der Decke, wobei  $V$  das Volumen des Empfangsraums in  $\text{m}^3$  und  $T$  die Nachhallzeit im Empfangsraum in  $\text{s}$  bezeichnen.

## 7.7 Betrag der Quellenadmittanz

Um die von einer Körperschallquelle in ein Bauteil eingeleitete Schall-Leistung zu berechnen, benötigt man (zumindest im Bereich des Holz- und Leichtbaus) die Admittanz der Quelle. Das Problem dabei ist, dass die Quellenadmittanz einer direkten Messung häufig nicht zugänglich ist (dies trifft auch auf die hier betrachteten Quellen mit flächigem Kontakt zum Bauwerk zu). Hinzu kommt, dass es sich dabei um eine komplexe Größe mit Real- und Imaginärteil handelt, was die messtechnische Bestimmung zusätzlich erschwert.

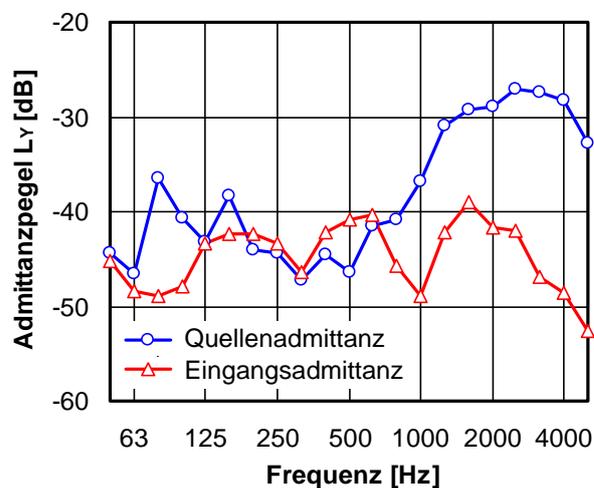
Es gibt jedoch ein verhältnismäßig einfaches Verfahren, um zumindest den Betrag der Quellenadmittanz zu ermitteln. Hierzu wird die betrachtete Körperschallquelle an einem schweren plattenförmigen Bauteil angebracht, dessen Eingangsadmittanz  $Y_B$  sehr viel kleiner als die Quellenadmittanz  $Y_Q$  sein muss. Ist die Bedingung  $|Y_B| \ll |Y_Q|$  erfüllt, spricht man auch von einer Kraftquelle, da sich für die in das Bauteil eingeleitete Kraft unabhängig von den Bauteileigenschaften die Beziehung  $F \cong F_K$  ergibt (hierbei bezeichnet die  $F_K$  die Kurzschlusskraft der Quelle).

Unter der Voraussetzung, dass die die Körperschallquelle und das angeregte Bauteil die Bedingung  $|Y_B| \ll |Y_Q|$  erfüllen (für die in dem durchgeführten Forschungsvorhaben betrachteten Quellen trifft dies in guter Näherung zu, wenn die Quellen an der massiven Rohdecke im Prüfstand P9 angebracht werden), ergibt sich für den Betrag der Quellenadmittanz aus Gl. (21) die folgende Beziehung:

$$|Y_Q| \cong \sqrt{\frac{|\underline{v}_0|^2 \operatorname{Re}\{Y_B\}}{P_{KS}}}. \quad (26)$$

Hierbei ist  $\underline{v}_0$  die freie Schnelle der Quelle,  $\operatorname{Re}\{Y_B\}$  der Realteil der Eingangsadmittanz des angeregten Bauteils (im vorliegenden Fall der Massivdecke) und  $P_{KS}$  die in die Decke eingeleitete Körperschall-Leistung. Sind diese Größen bekannt, so lässt sich daraus mit Gl. (26) auf einfache Weise die Quellenadmittanz berechnen. Da sich alle Größen messtechnisch bestimmen lassen, wurden für die untersuchten Körperschallquellen entsprechende Messungen durchgeführt. Die Messung der Eingangsadmittanz der Decke erfolgte dabei nach dem in Abschnitt 7.3 beschriebenen Verfahren durch Anregung mit dem Shaker. Zur Messung der eingeleiteten Körperschall-Leistung wurde das indirekte Verfahren nach Abschnitt 7.5 verwendet. Die Bestimmung der freien Schnelle der untersuchten Körperschallquellen gestaltete sich ein wenig schwieriger, konnte aber unter Verwendung eines Laser-Vibrometers angemessen realisiert werden (die Messung der freien Schnelle ist in Abschnitt 7.9 beschrieben).

In der Fachwelt wird gelegentlich vorgeschlagen, die Quellenadmittanz zu bestimmen, indem man die Eingangsadmittanz der Körperschallquelle misst und das Messergebnis als Näherungswert für die Quellenadmittanz heranzieht. Hierbei wird die Quelle als passives Bauteil betrachtet, dessen Eingangsadmittanz wie in Abschnitt 7.3 beschrieben durch Körperschallanregung mit einem Shaker ermittelt werden kann. Um zu überprüfen, inwieweit dieses Näherungsverfahren in der Praxis brauchbare Ergebnisse liefert, wurden für eine der untersuchten Körperschallquellen (Gefälleplatte mit Unterlage aus Gummigranulat, GP m. U.) entsprechende Messungen durchgeführt. Die ermittelten Messergebnisse sind in Abb. 45 dargestellt:



**Abb. 45:** Vergleich der nach Gl. (26) ermittelten Quellenadmittanz mit der gemessenen Eingangsadmittanz der Quelle. Die Messungen erfolgten an der verfließten Gefälleplatte mit Gummigranulat-Unterlage (GP m. U.). Als Anregungsquelle diente jeweils der für die Untersuchungen verwendete Inertial-Shaker.

Wie sich aus der obigen Abbildung entnehmen lässt, stimmt die Eingangsadmittanz der untersuchten Körperschallquelle im Bereich tiefer und mittlerer Frequenzen im Großen und Ganzen nicht schlecht mit der gemessenen Quellenadmittanz überein. Oberhalb von etwa 1000 Hz sind allerdings deutliche Abweichungen zu verzeichnen, die bei hohen Frequenzen bis zu etwa 20 dB betragen können.

## 7.8 Real- und Imaginärteil der Quellenadmittanz

Das im vorangehenden Abschnitt beschriebene Verfahren zur Bestimmung der Quellenadmittanz ist verhältnismäßig einfach und funktioniert zuverlässig und gut. Es hat jedoch den Nachteil, dass sich damit nur der Betrag der Admittanz ermitteln lässt. Dies reicht zwar in der Praxis oft schon aus, in manchen Fällen hätte man darüber hinaus jedoch gerne auch noch Kenntnis über den Real- und Imaginärteil. Um diese Kenntnis zu erhalten, sind zusätzliche Messungen erforderlich.

Im vorliegenden Fall wird hierzu ein Verfahren verwendet, bei dem die untersuchte Körperschallquelle nacheinander an zwei unterschiedlich schweren Platten angebracht wird. Dabei wird jeweils die in die Platte eingeleitete Körperschall-Leistung gemessen (die Messung erfolgt nach der in Abschnitt 7.5 beschriebenen indirekten Methode). Außerdem wird durch Anregung mit dem Shaker nach Abschnitt 7.3 die Eingangsadmittanz der beiden Platten bestimmt. Die für die Untersuchungen verwendeten Platten bestanden aus folgenden Bauteilen:

- Schwere Platte (Index 1): massive Stahlbeton-Rohdecke im Prüfstand P9 (Dicke 14 cm, flächenbezogene Masse ca. 320 kg/m<sup>2</sup>, Fläche 4,7 m x 3,7 m).
- Leichte Platte (Index 2): mitteldichte Holzfaserverplatte (MDF-Platte), Dicke 19 mm, flächenbezogene Masse 12,2 kg/m<sup>2</sup>, statischer Elastizitätsmodul 3100 MN/m<sup>2</sup> (eigene Messung), Fläche ca. 1,8 m x 1,6 m, an den Rändern weich auf Elastomerstreifen gelagert.

Da es sich in beiden Fällen um plattenförmige Bauteile handelt, kann man den Imaginärteil der Eingangsadmittanz in guter Näherung vernachlässigen. Setzt man die Messwerte für die beiden Platten unter dieser Voraussetzung in GL. (21) ein, so erhält man ein System aus zwei Gleichungen und zwei Unbekannten (dem Real- und Imaginärteil der Quellenadmittanz,  $\text{Re}\{\underline{Y}_Q\}$  und  $\text{Im}\{\underline{Y}_Q\}$ ). Beim Lösen des Gleichungssystems ergibt sich nach kurzer Rechnung:

$$\text{Re}\{\underline{Y}_Q\} = \left[ |\underline{v}_0|^2 \left( \frac{Y_{B,2}}{P_{KS,2}} - \frac{Y_{B,1}}{P_{KS,1}} \right) + Y_{B,1}^2 - Y_{B,2}^2 \right] \frac{1}{2(Y_{B,2} - Y_{B,1})}, \quad (27)$$

$$\text{Im}\{\underline{Y}_Q\} = \sqrt{\frac{|\underline{v}_0|^2 Y_{B,1}}{P_{KS,1}} - Y_{B,1}^2 - 2 Y_{B,1} \text{Re}\{\underline{Y}_Q\} - \text{Re}\{\underline{Y}_Q\}^2}, \quad (28)$$

mit  $|\underline{v}_0|$  = Betrag der freien Schnelle der betrachteten Körperschallquelle,

- $Y_{B,1}$  = Eingangsadmittanz der schweren Platte,
- $Y_{B,2}$  = Eingangsadmittanz der leichten Platte (bei der Rechnung wird hier ebenso wie für  $Y_{B,1}$  der Realteil der gemessenen Admittanz eingesetzt),
- $P_{K5,1}$  = von der Quelle in die schwere Platte eingeleitete Körperschall-Leistung,
- $P_{K5,2}$  = von der Quelle in die leichte Platte eingeleitete Körperschall-Leistung.

Um den Real- und Imaginärteil der Quellenadmittanz mit Gl. (27) und Gl. (28) zu berechnen, benötigt man demnach fünf Eingangswerte, die zuvor messtechnisch ermittelt werden müssen. Die zur Messung der Eingangsadmittanz und der Körperschall-Leistung verwendeten Verfahren wurden bereits beschrieben, das Messverfahren zur Ermittlung der freien Schnelle ist dem nachfolgenden Abschnitt zu entnehmen.

In der Praxis funktioniert das beschriebene Verfahren zur Bestimmung des Real- und Imaginärteils der Quellenadmittanz vielfach zufriedenstellend. Es hat jedoch den Nachteil, dass viele verschiedene Eingangswerte benötigt werden, die alle mit Messfehlern behaftet sind. Wirken diese Fehler ungünstig zusammen, kann es geschehen, dass die Berechnung kein sinnvolles Ergebnis liefert (z. B. wenn der Inhalt der Wurzel in Gl. (28) einen negativen Wert annimmt). Dies ist dann der Fall, wenn die Eingangsdaten wegen der darin enthaltenen Messfehler nicht dem der Gleichung zugrunde liegenden theoretischen Zusammenhang entsprechen. In der Praxis äußert sich dies vor allem dadurch, dass die für die Quellenadmittanz berechneten Terzspektren Lücken aufweisen, wenn die Berechnung in einzelnen Terzen versagt. In den Terzen, in denen eine Berechnung möglich ist, stimmt der aus dem Real- und Imaginärteil gemäß

$$|\underline{Y}_Q| \cong \sqrt{\operatorname{Re}\{\underline{Y}_Q\}^2 + \operatorname{Im}\{\underline{Y}_Q\}^2} \quad (29)$$

berechnete Betrag der Admittanz jedoch exakt mit dem nach Gl. (26) ermittelten Wert überein.

Um die beschriebenen Probleme zu vermeiden, wurde für die nachfolgenden Untersuchungen statt des aus Real- und Imaginärteil gebildeten Wertes ersatzweise der nach Abschnitt 7.7 ermittelte Betrag der Quellenadmittanz herangezogen. Die mit Gl. (27) und Gl. (28) für den Real- und Imaginärteil der Admittanz ermittelten Ergebnisse dienen lediglich zur Vervollständigung und Ergänzung der durchgeführten Untersuchungen.

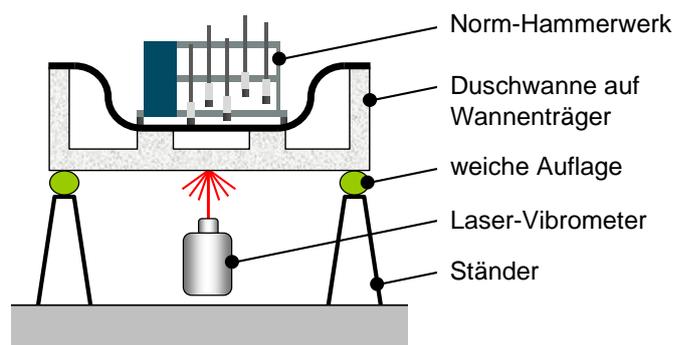
## 7.9 Messung der freien Schnelle

Zur vollständigen akustischen Charakterisierung von Körperschallquellen wird neben der Quellenadmittanz zusätzlich noch die Kurzschlusskraft  $E_K$  oder die freie Schnelle  $v_0$  benötigt. Ob man die Kraft oder die Schnelle verwendet ist im Prinzip gleichgültig, da die beiden Größen über G. (17) direkt miteinander verknüpft sind. Bei den hier untersuchten Quellen ist die Schnelle jedoch günstiger, da sie einfacher zu messen ist. Das hierzu verwendete Messverfahren wird nachfolgend beschrieben.

Bei der freien Schnelle der Körperschallquelle handelt es sich um den Wert der Schnelle, der sich ergibt, wenn man die Quelle von dem angeregten Bauteil trennt, so dass sie frei und ungehindert schwingen kann. Das Problem besteht darin, dass viele der im Rahmen des Forschungsvorhabens verwendeten Körperschallquellen an ihrer Unterseite (also an der Kontaktfläche zum Bauwerk) über eine weiche Auflage – wie z. B. eine Trittschalldämmplatte aus Mineralfaser oder eine Gummigranulatmatte – verfügen, die Bestandteil der betrachteten Quelle ist (bei den durchgeführten Untersuchungen werden Auflagen und Befestigungen der Einfachheit als Teil der Quelle angesehen). An derartigen weichen Unterlagen lassen sich die Körperschallaufnehmer, die man üblicherweise zur Messung der Schnelle verwendet, jedoch nicht sinnvoll befestigen.

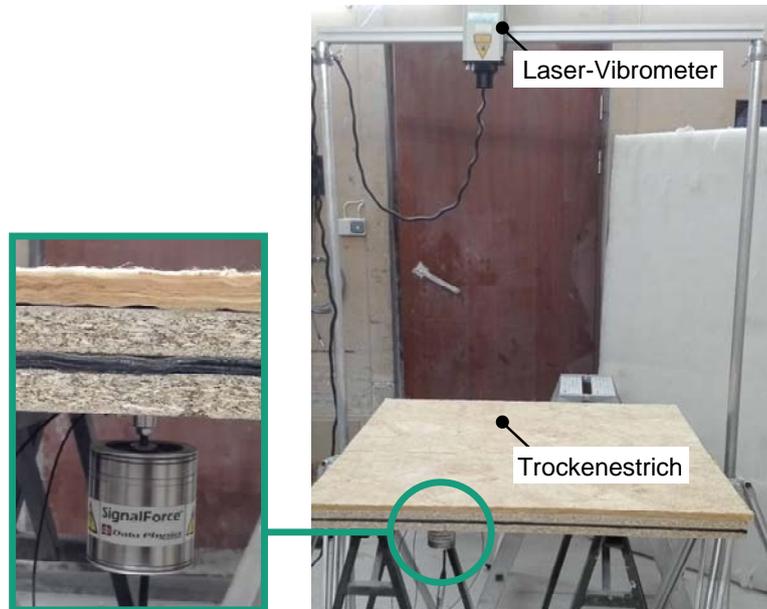
Zur Messung der freien Schnelle wird deshalb als Alternative ein Laser-Vibrometer eingesetzt. Bei diesem Gerät erfolgt die Messung kontaktlos, indem der aus dem Messkopf austretende Laserstrahl an der Probenoberfläche gestreut und das gestreute Licht mit einem Referenzstrahl zur Interferenz gebracht wird. Aus dem Interferenzsignal berechnet die Messelektronik dann die an der Bauteiloberfläche vorhandene Schnelle. Da bei dieser Art der Messung keinerlei Rückwirkung zwischen dem Sensor und dem schwingenden Bauteil besteht, ist sie für die hier untersuchten Quellen optimal geeignet. Um die Qualität des Mess-Signals zu verbessern, musste am Auftreffpunkt des Laserstrahls lediglich ein kleines Stück Reflexionsfolie auf die Oberfläche der Quelle geklebt werden. Diese Folie haftet auch auf Fasermaterialien recht gut und hat wegen ihrer äußerst geringen Masse keine Rückwirkungen auf das Schwingungsverhalten der Quelle.

Die Messung der freien Schelle erfolgt immer an der Stelle der Körperschallquelle, an der sie normalerweise über mechanischen Kontakt zum Bauwerk verfügt. Die Quelle wird hierzu an ihren Rändern punkt- oder streifenförmig auf möglichst weichen Elementen gelagert, so dass sie in ihrem Schwingungsverhalten nicht beeinträchtigt wird. Die Körperschallanregung erfolgt in gleicher Weise wie beim normalen Betrieb der Quelle, im vorliegenden Fall also z. B. mit dem Norm-Hammerwerk oder dem Shaker. In Abb. 46 ist der verwendete Messaufbau schematisch dargestellt:



**Abb. 46:** Messung der freien Schnelle einer Körperschallquelle unter Verwendung eines Laser-Vibrometers am Beispiel einer Duschwanne mit Wannenträger bei Anregung mit dem Norm-Hammerwerk.

Bei Körperschallquellen mit flächigem Kontakt zur Decke wurde bei der Messung der freien Schnelle selbstverständlich über mehrere Messpositionen auf der Kontaktfläche gemittelt. Gleiches galt auch für die untersuchte Duschwanne mit Fußgestell (DW1 a. FG), bei der Messungen an mehreren der Füße erfolgten. Ein Beispiel für die durchgeführten Messungen (Schnelle-Messung am Trockenestrich TE groß bei Shaker-Anregung) ist Abb. 47 zu entnehmen:



**Abb. 47:** Beispiel für die Messung der freien Schnelle. Die dargestellte Körperschallquelle bestand aus dem 100 cm x 100 cm großen Trockenestrich (TE groß), der mit dem Inertial-Shaker angeregt wurde. Um die Handhabung zu vereinfachen, wurde die Anordnung um 180° gedreht (d. h. mit der Oberseite nach unten) auf die Ständer aufgelegt. Eine Beeinträchtigung der Messergebnisse erfolgte hierdurch selbstverständlich nicht.

## 8 Messergebnisse

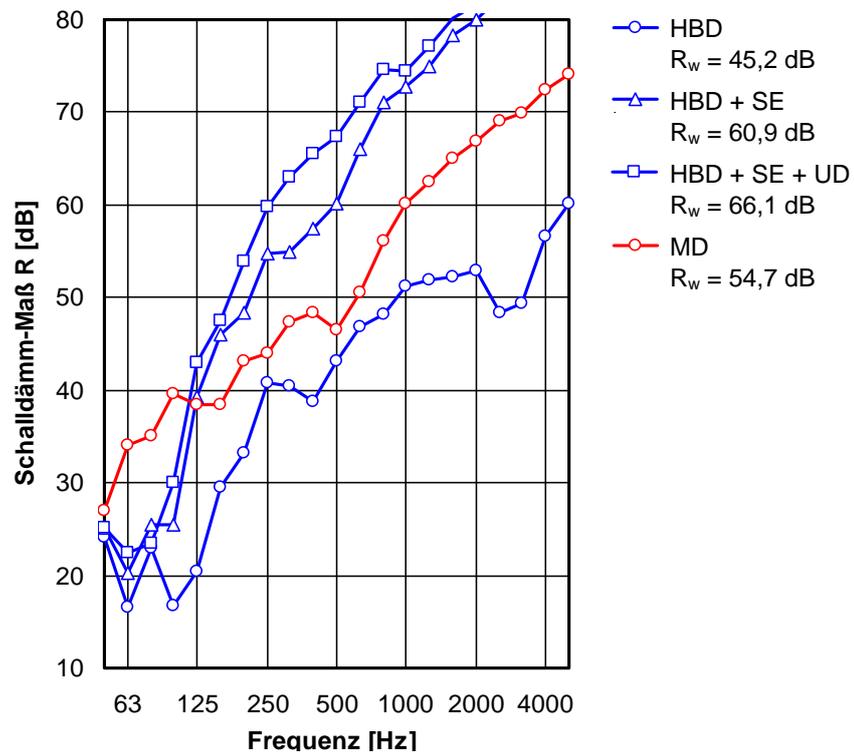
Nachfolgend werden die Ergebnisse der durchgeführten Messungen vorgestellt und diskutiert. Wegen der Vielzahl an Messungen muss sich die Darstellung zwangsläufig auf eine exemplarische Auswahl der wichtigsten Untersuchungsergebnisse beschränken. Die dargestellten Beispiele wurden so ausgewählt, dass sämtliche in dem Forschungsvorhaben untersuchten Themen vertreten sind und alle wichtigen Ergebnisse angesprochen und erläutert werden.

### 8.1 Luft- und Trittschalldämmung der Decken

Die Luft- und die Trittschalldämmung bilden die wichtigsten bauakustischen Kennwerte von Decken. Zu den durchgeführten Untersuchungen zum Thema Installationsgeräusche haben sie zwar keinen direkten Bezug. Sie sind aber notwendig, um die verwen-

deten Decken akustisch zu charakterisieren und hinsichtlich ihrer Schallschutzwirkung miteinander zu vergleichen.

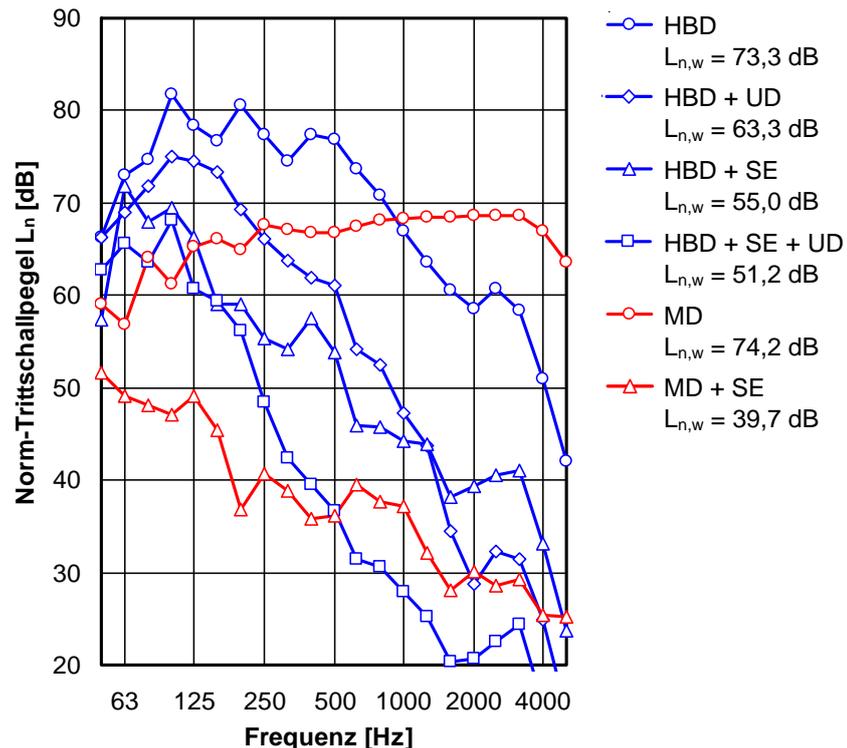
In dem Forschungsvorhaben wurden sechs verschiedene Decken betrachtet, vier davon Holzbalkendecken, die beiden restlichen Massivdecken. Der Aufbau der sechs Decken und die zu ihrer Benennung verwendeten Kurzbezeichnungen sind in Abschnitt 5.2 dargestellt. Messergebnisse für die Luftschalldämmung liegen nur für vier der Decken vor, da die beiden anderen Decken einen vereinfachten Aufbau aufwiesen, der eine sinnvolle Messung der Luftschalldämmung nicht zuließ (so handelte es sich zum Beispiel bei dem auf der Massivdecke aufgetragenen schwimmenden Estrich um keine vollflächige Deckenaufgabe, sondern lediglich um ein Estrich-Teilstück). Die Messergebnisse für die Luftschalldämmung sind in Abb. 48 dargestellt:



**Abb. 48:** Schalldämm-Maß von vier der sechs untersuchten Decken in Abhängigkeit von der Frequenz.

Wie der obigen Abbildung zu entnehmen ist, weist die Holzbalken-Rohdecke (HBD) die niedrigste Luftschalldämmung auf. Durch Einbau eines schwimmenden Estrichs (HBD + SE) erhöht sich die Schalldämmung beträchtlich und übertrifft ab etwa 125 Hz sogar die Massivdecke (MD). Wird die Holzbalkendecke mit schwimmendem Estrich zusätzlich mit einer abgehängten Unterdecke versehen (HBD + SE + UD) steigt die Schalldämmung nach weiter an, wobei der Zuwachs allerdings verhältnismäßig gering ausfällt. Hinsichtlich des Frequenzverlaufs und des bewerteten Schalldämm-Maßes  $R_w$  entsprechen alle dargestellten Kurven recht gut dem für die betrachteten Decken zu erwartenden akustischen Verhalten.

Auch die in Abb. 49 dargestellte Trittschalldämmung der sechs Decken entspricht im Wesentlichen den Erwartungen. Hinsichtlich des bewerteten Norm-Trittschallpegels  $L_{n,w}$  liegen die Holzbalken-Rohdecke (HBD) und die Massivdecke (MD) hier in etwa gleichauf, auch wenn der Frequenzverlauf der Trittschalldämmung natürlich ein völlig anderer ist. Wird die Holzbalken-Rohdecke mit einer abgehängten Unterdecke versehen (HBD + UD), verringert sich  $L_{n,w}$  um 10 dB. Der Einbau eines schwimmenden Estrichs (HBD + SE) erbringt eine Verbesserung von etwa 18 dB, während durch Kombination beider Maßnahmen (HBD + SE + UD) eine Verbesserung von etwa 22 dB erreicht wird. Die höchste Trittschalldämmung aller untersuchten Decken weist mit  $L_{n,w} \cong 40$  dB die Massivdecke mit schwimmendem Estrich (MD + SE) auf.



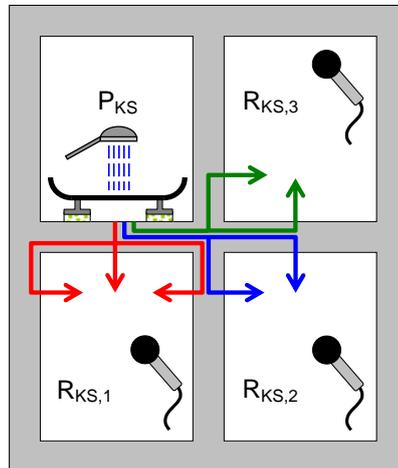
**Abb. 49:** Norm-Trittschallpegel der sechs untersuchten Decken in Abhängigkeit von der Frequenz.

## 8.2 Körperschalldämmung der Decken

Das Körperschalldämm-Maß  $R_{KS}$  ist der wichtigste akustische Kennwert, um die Schallschutzwirkung von Bauteilen hinsichtlich der Übertragung von Installationsgeräuschen zu beschreiben. Es kennzeichnet das Vermögen des Bauwerks, die in das angeregte Bauteil eingeleitete Körperschall-Leistung vom Empfangsraum fernzuhalten und weist damit enge Parallelen zur Luftschalldämmung auf, die durch das Schalldämm-Maß  $R$  beschrieben wird. Wie später noch gezeigt wird, bestehen zwischen den beiden Größen allerdings auch grundlegende Unterschiede.

In dem Forschungsvorhaben werden ausschließlich Decken betrachtet, die den eingeleiteten Körperschall ohne Nebenwege in den Empfangsraum unterhalb der Decke übertragen. In diesem einfachstmöglichen Fall hängt das Körperschalldämm-Maß nur von

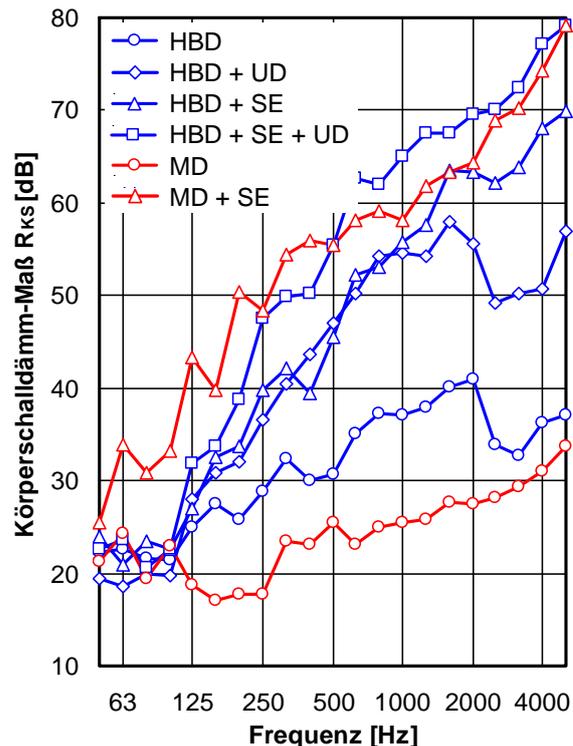
der angeregten Decke selbst ab. Am Bau ist die Situation erheblich komplizierter, da abhängig davon, welchen Empfangsraum man betrachtet, zahlreiche weitere Bauteile an der Schallübertragung beteiligt sind (siehe Abb. 50). Aus diesem Grund ergibt sich für jeden Empfangsraum ein anderer Wert des Körperschalldämm-Maßes. Das Körperschalldämm-Maß ist deshalb von seiner Definition und Bedeutung her dem Bau-schalldämm-Maß  $R'$  aus dem Bereich der Luftschalldämmung gleichzusetzen.



**Abb. 50:** Veranschaulichung der Körperschallübertragung in Bauten. Je nachdem, in welchem Raum die Übertragung erfolgt, ergeben sich für das Körperschalldämm-Maß  $R_{KS}$  unterschiedliche Werte.

Die für das Körperschalldämm-Maß der sechs untersuchten Decken ermittelten Messwerte sind in Abb. 51 dargestellt. Auf den ersten Blick weisen die Messkurven, sowohl was den Frequenzverlauf als auch was die Höhe der Schalldämmung betrifft, erhebliche Ähnlichkeit mit dem in Abb. 48 dargestellten Schalldämm-Maß für die Luftschallübertragung der Decken auf. So wirken sich z. B. bauakustische Verbesserungsmaßnahmen, wie der Einbau eines schwimmenden Estrichs oder einer abgehängten Unterdecke, auf die Körper- und die Luftschalldämmung in ähnlicher Weise aus. Auch der bei der Luftschalldämmung in der Schalldämmkurve der Holzbalken-Rohdecke erkennbare Koinzidenzeinbruch (bei einer Frequenz von etwa 2500 - 3150 Hz) findet sich an gleicher Stelle auch in der Körperschalldämmung wieder.

Bei genauerer Betrachtung der Messwerte gibt es jedoch auch deutliche Unterschiede. So weisen die Messkurven zum Teil eine verschobene Rangfolge auf, was bei einem Vergleich der für die Holzbalken-Rohdecke (HBD) und die Massivdecke (MD) gemessenen Werte zu erkennen ist: während sich für die Massivdecke bei der Luftschalldämmung im Vergleich zur Holzbalkendecke deutliche höhere Werte ergeben, ist es bei der Körperschalldämmung gerade umgekehrt. Besonders deutlich ist dies in Abb. 52 zu sehen, wo die Messkurven für die Luft- und die Körperschalldämmung einander direkt gegenübergestellt sind.



**Abb. 51:** Körperschalldämm-Maß der sechs untersuchten Decken in Abhängigkeit von der Frequenz.

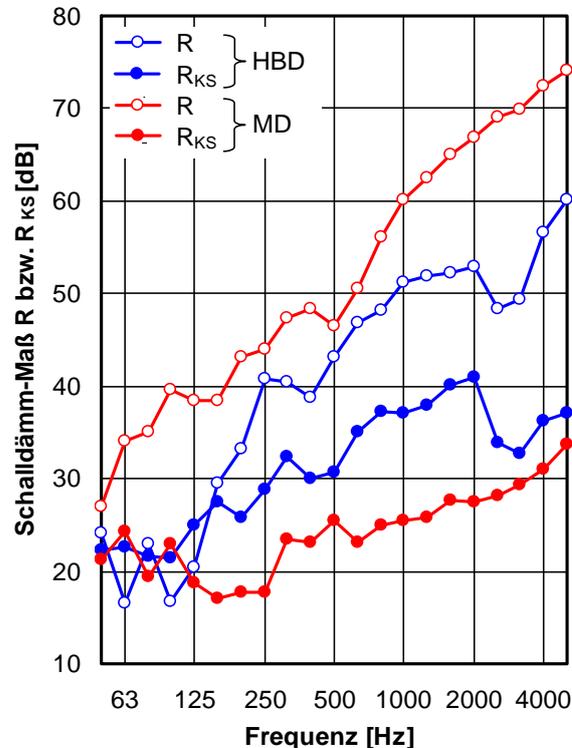
Um die vorhandenen Unterschiede zu verstehen, muss man sich ansehen, wie die Schalldämm-Maße für die Luft- und Körperschallübertragung definiert sind. Am einfachsten erfolgt dies – ohne Beschränkung der Allgemeinheit – am Beispiel einer Decke. Das Schalldämm-Maß für die Luftschallübertragung,  $R$ , umfasst drei verschiedene akustische Vorgänge:

- 1) Anregung der Deckenoberfläche durch das Luftschallfeld im Senderaum,
- 2) Körperschallübertragung von der Oberseite zur Unterseite der Decke,
- 3) Luftschallabstrahlung von der Unterseite der Decke in den Empfangsraum.

Das Körperschalldämm-Maß bezieht sich im Gegensatz zum Luftschalldämm-Maß nicht auf die auf die Deckenoberfläche auftreffende Luftschall-Leistung, sondern vielmehr auf die in die Decke eingeleitete Körperschall-Leistung. Dies bedeutet, dass der erste der drei in der obigen Aufzählung aufgeführten Vorgänge entfällt und erklärt das unterschiedliche akustische Verhalten von Massiv- und Holzbalkendecke:

- Wegen ihrer hohen Masse setzt die Massivdecke der Luftschallanregung einen hohen Widerstand entgegen, so dass nur ein kleiner Teil der auftreffenden Luftschall-Leistung in die Decke eindringen kann. Ist die Leistung jedoch erst einmal in die Decke gelangt, so wird sie weitgehend ungehindert von der Oberseite zur Unterseite übertragen und dort mit hohem Wirkungsgrad (Abstrahlgrad  $\sigma \cong 1$ ) in Luftschall umgesetzt.

- Die Holzbalkendecke lässt sich demgegenüber wegen ihre geringen Masse leicht zu Schwingungen anregen, leitet den Körperschall aber nur schlecht weiter und verfügt überdies im maßgebenden Frequenzbereich über einen verhältnismäßig niedrigen Abstrahlgrad. Dies erklärt, warum die Holzbalkendecke den Luftschall besser, den Körperschall hingegen schlechter als die Massivdecke überträgt.

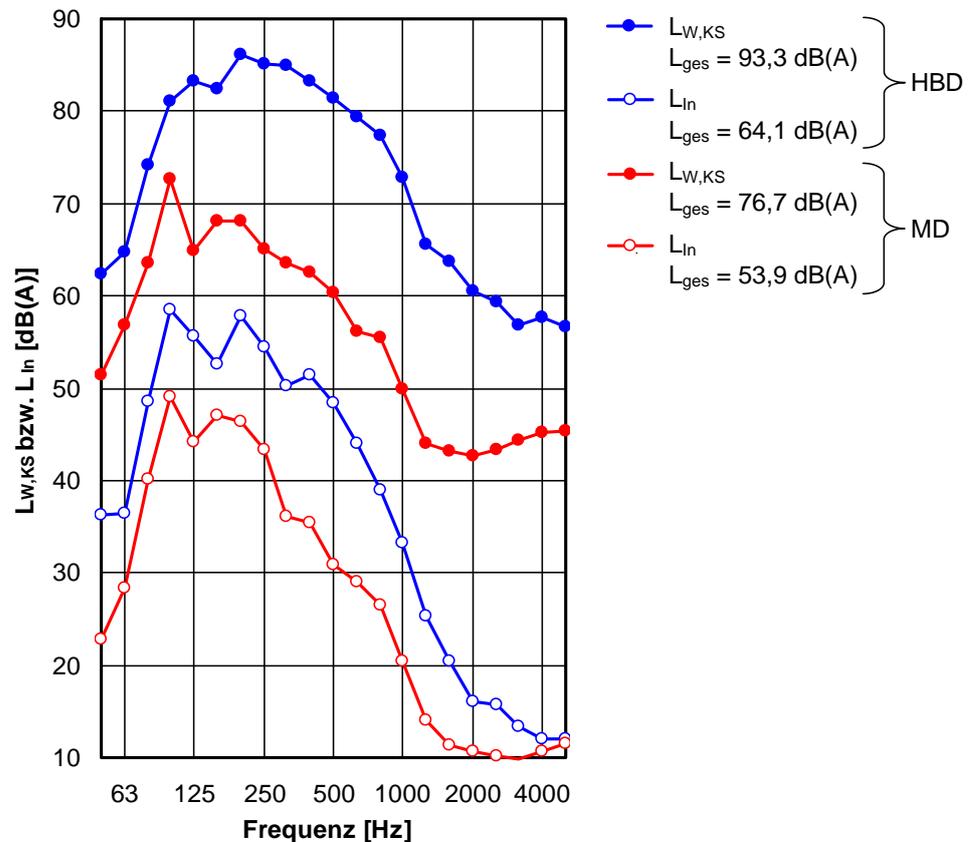


**Abb. 52:** Körper- und Luftschalldämmung der Holzbalken-Rohdecke (HBD) und der Massivdecke (MD) im Vergleich. Dargestellt ist jeweils das Körperschalldämm-Maß  $R_{KS}$  sowie das Schalldämm-Maß für die Luftschallübertragung  $R$ .

Aufgrund der obigen Ausführungen könnte man vermuten, dass sich Holzbalkendecken hinsichtlich der Dämmung von Installationsgeräuschen günstiger als Massivdecken verhalten. Dies wäre jedoch ein Trugschluss, da der resultierende Installations-Schallpegel neben dem Körperschalldämm-Maß gemäß Gl. (21) außerdem in starkem Maße von der Eingangsadmittanz der Decke (genauer gesagt von dem Verhältnis zwischen der Quellen- und der Eingangsadmittanz) abhängt. Unterscheiden sich die Admittanzen stark, wie dies bei Massivdecken normalerweise der Fall ist, leitet die Quelle nur wenig Körperschall in die Decke ein. Die Eingangsadmittanz von Holzbalkendecken bewegt sich hingegen in der gleichen Größenordnung wie die Quellenadmittanz bauüblicher Sanitärinstallationen, so dass eine erheblich stärkere Körperschalleinleitung zu verzeichnen ist.

In Abb. 53 ist dies am Beispiel einer typischen Körperschallquelle (Trockenestrich TE groß mit Anregung durch das Norm-Hammerwerk) dargestellt. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, ergibt sich für den von dieser Quelle in die Decke eingeleiteten Schallleistungspegel bei der Holzbalkendecke (HBD) ein etwa 17 dB(A) höherer Wert als bei der Massivdecke (MD). Dies hat zur Folge, dass der resultierende Installations-Schall-

pegel bei der Holzbalkendecke – trotz ihrer besseren Körperschalldämmung – etwa 10 dB(A) höher als bei der Massivdecke ausfällt.

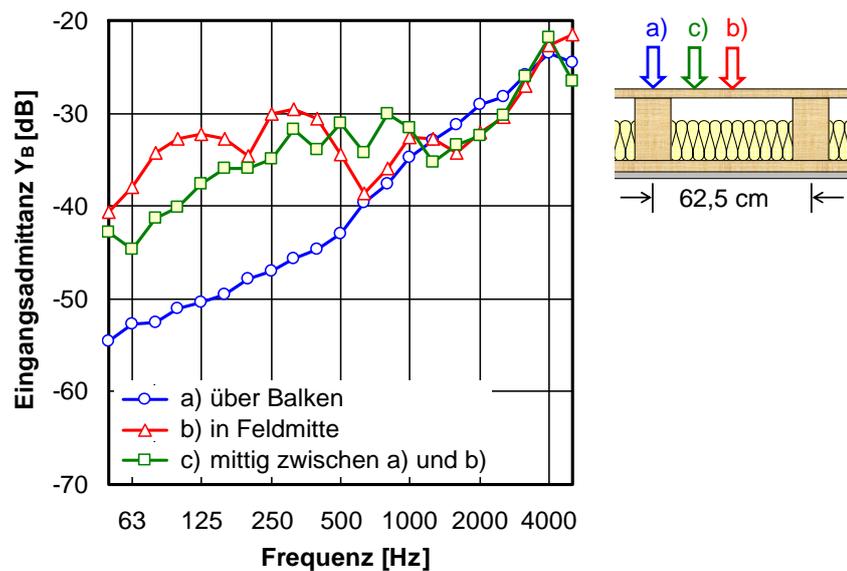


**Abb. 53:** Pegel der in die Decke eingeleiteten Körperschall-Leistung,  $L_{w,KS}$ , und resultierender Installations-Schallpegel,  $L_{in}$ , für die Holzbalken-Rohdecke (HBD) und die Massivdecke (MD). Die Messungen erfolgten am 100 cm x 100 cm großen Trockenestrich (TE groß) bei Anregung mit dem Norm-Hammerwerk.

### 8.3 Eingangsadmittanz der Decken

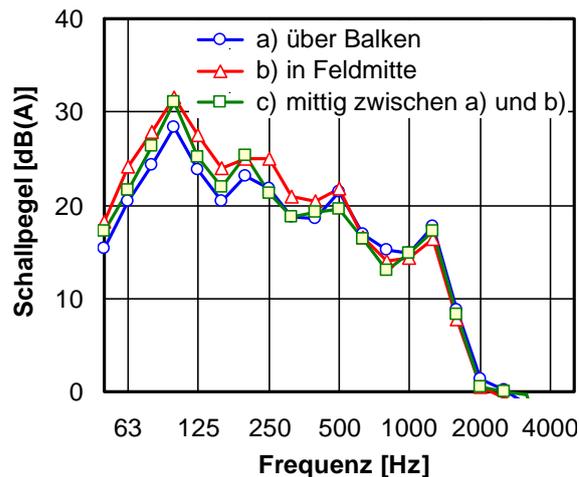
Neben der Körperschalldämmung bestimmt vor allem die Eingangsadmittanz der Decke darüber, welcher Installations-Schallpegel sich im Empfangsraum ergibt. Daher wurde die Eingangsadmittanz der untersuchten Decken mit dem in Abschnitt 7.3 beschriebenen Messverfahren ermittelt. Außerdem wurde die Admittanz mit der theoretischen Beziehung in Gl. (16) berechnet und mit den gemessenen Werten verglichen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass Gl. (16) streng genommen nur für den Idealfall einer frei schwingenden großflächigen Platte gilt, so dass man hinsichtlich der Übereinstimmung von Messung und Rechnung keine allzu hohen Erwartungen hegen sollte. Das gilt insbesondere für die Holzbalken-Rohdecke, da hier die oberseitige Beplankung aus Spanplatten in einem Abstand von jeweils 62,5 cm mit den darunter befindlichen Balken verschraubt ist (bei der Berechnung wurde die Decke ohne Berücksichtigung der Balken vereinfachend als durchgehende 22 mm dicke Spanplatte betrachtet).

Im Prinzip handelt es sich bei der Eingangsadmittanz um eine ortsabhängige Größe, die abhängig von der Anregeposition auf der Decke variieren kann. Besteht die angeregte Deckenschale allerdings aus einer homogenen Platte (dies ist z. B. bei der Massivdecke oder den Decken mit einem schwimmenden Estrich der Fall), ist die Ortsabhängigkeit so gering, dass man sie in der Praxis vernachlässigen kann. Einen Problemfall stellt jedoch auch hier – wegen des Unterbaus durch die räumlich inhomogenen Balkenlage – die Holzbalken-Rohdecke dar. Je nachdem ob sich die Anregeposition über einem Balken oder im Feld zwischen zwei Balken befindet, erhält man für die Eingangsadmittanz der Decke unterschiedliche Werte. Wie sich aus den in Abb. 54 dargestellten Ergebnissen entnehmen lässt, können die Unterschiede – zumindest bei tiefen und mittleren Frequenzen – beträchtlich sein.



**Abb. 54:** Eingangsadmittanz der Holzbalken-Rohdecke (HBD) bei punktförmiger Körperschallregung mit dem Shaker in Abhängigkeit von der Anregeposition auf der Deckenoberfläche.

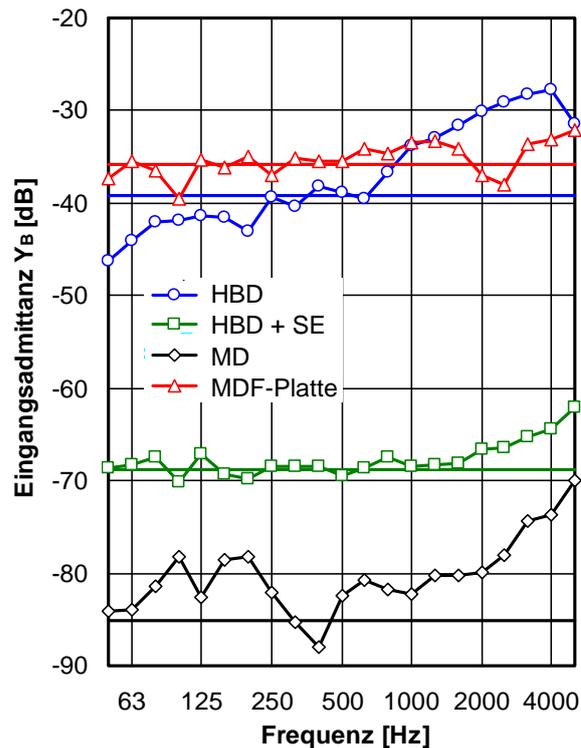
Andererseits erfolgt der Kontakt zwischen Körperschallquelle und Decke bei allen in dem Forschungsvorhaben untersuchten Quellen über eine mehr oder weniger große Auflagefläche oder – bei der Duschwanne mit Fußgestell – zumindest an mehreren verschiedenen Punkten gleichzeitig. Dies bewirkt eine räumliche Mittelung über die Eingangsadmittanz der Decke, die den Einfluss der Ortsabhängigkeit beträchtlich herabsetzt. Um zu überprüfen, wie sich ein flächiger Kontakt zwischen Körperschallquelle und Decke auf das Messergebnis auswirkt, wurde eine der Quellen schrittweise auf der Holzbalken-Rohdecke verschoben, so dass sich der Mittelpunkt der Kontaktfläche – analog zur Skizze in Abb. 54 – über einem Balken, in Feldmitte sowie in einer Zwischenposition befand. Die Messung erfolgte unter Verwendung der Quelle mit der geringsten Fläche (Trockenestrich TE klein mit einer Auflagefläche von 25 cm x 75 cm) bei Anregung mit dem Shaker. Den in Abb. 55 dargestellten Messwerten ist zu entnehmen, dass bei flächiger Anregung der Decke die Anregeposition erwartungsgemäß nur geringen Einfluss auf das Messergebnis hat.



**Abb. 55:** Abhängigkeit des Installations-Schallpegels von der Position der Quelle auf der Deckenoberfläche bei flächiger Körperschallanregung. Die dargestellten Messungen erfolgten auf der Holzbalken-Rohdecke (HBD). Als Körperschallquelle diente der Trockenestrich mit den Maßen 25 cm x 75 cm (TE klein) in Verbindung mit dem Shaker.

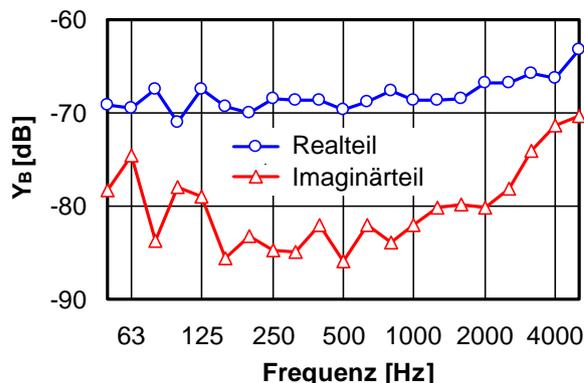
Die gemessene Eingangsadmittanz der untersuchten Decken ist in Abb. 56 dargestellt. Da abgehängte Unterdecken keinen Einfluss auf die Eingangsadmittanz von Decken haben, wurden an der Holzbalken-Rohdecke mit Unterdecke keine Messungen durchgeführt. Bei Decken mit schwimmendem Estrich wird die Eingangsadmittanz alleine von der Estrichplatte bestimmt. Deshalb ist von den drei untersuchten Decken, die über einen schwimmenden Estrich verfügten (der Aufbau des Estrichs war in allen Fällen gleich), in der Abbildung nur die Holzbalkendecke dargestellt, so dass Abb. 56 insgesamt nur drei Deckenkonstruktionen enthält. Zur Ergänzung wurde allerdings noch die zur Trennung von Real- und Imaginärteil der Admittanz verwendete MDF-Platte mit aufgenommen, die in Abschnitt 7.8 beschrieben ist.

Wie aus der Abbildung hervorgeht, ergibt sich für die Holzbalkendecke mit schwimmendem Estrich (HBD + SE) und die MDF-Platte eine recht gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich in beiden Fällen um verhältnismäßig dünne Platten handelt, die an den Rändern frei schwingen können und somit gut den der Berechnungsformel zugrundeliegenden Voraussetzungen entsprechen. Für die Holzbalken-Rohdecke (HBD) und der Massivdecke (MD) ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung demgegenüber deutlich schlechter. Bei der Holzbalkendecke werden die Abweichungen vor allem durch den akustischen Einfluss der Balken hervorgerufen, während sich bei der Massivdecke die verhältnismäßig große Plattendicke sowie die starre Randeinspannung negativ bemerkbar machen. Außerdem handelt es sich bei den zur Berechnung der Admittanz herangezogenen Beuteileigenschaften, wie z. B. dem Elastizitätsmodul der Deckenplatte, teilweise um Literaturangaben, was die Unsicherheit der ermittelten Ergebnisse zusätzlich erhöht.



**Abb. 56:** Eingangsadmittanz von drei Decken und einer MDF-Platte. Neben der ermittelten Messkurve ist jeweils als gleichfarbige durchgezogene Linie das nach Gl. (16) berechnete Ergebnis mit aufgeführt (die Berechnung nach Gl. (16) ergibt einen frequenzunabhängigen Wert der Eingangsadmittanz).

Eine Aussage darüber, inwieweit sich das idealisierte Modell einer frei schwingenden dünnen Platte zur Beschreibung der untersuchten Decken verwenden lässt, ergibt sich auch aus dem Verhältnis zwischen dem Real- und dem Imaginärteil der Eingangsadmittanz, da der Imaginärteil unter den genannten idealisierten Bedingungen eigentlich den Wert Null annehmen müsste. Gemäß Abb. 57 ist das – zumindest bei Decken mit schwimmendem Estrich – auch in guter Näherung der Fall, denn der gemessene Imaginärteil verschwindet zwar nicht ganz, ist aber erheblich kleiner als der Realteil.



**Abb. 57:** Real- und Imaginärteil der Eingangsadmittanz in Abhängigkeit von der Frequenz. Die dargestellten Werte wurden für die Holzbalkendecke mit schwimmendem Estrich (HBD + SE) gemessen.

Das in Abb. 57 dargestellte Ergebnis ist auch für die Berechnung der von der Körperschallquelle in die Decke eingeleiteten Körperschall-Leistung von großem Interesse, da die hierfür bevorzugt verwendete Näherungsformel in Gl. (21) eine reale Eingangsadmittanz des angeregten Bauteils voraussetzt. Ist der Imaginärteil der Eingangsadmittanz sehr viel kleiner als der Realteil – wie bei den untersuchten Decken offensichtlich in hinreichendem Maße der Fall – kann die Gleichung zur Berechnung der Schall-Leistung genutzt werden. Eine reale Eingangsadmittanz des angeregten Bauteils wird im Übrigen auch bei vielen Berechnungsformeln aus der Normung, wie z. B. in DIN EN 12354-5 oder DIN EN 15657, vorausgesetzt. Erschwert wird die Anwendung der Formeln dadurch, dass viele der erforderlichen Eingangsdaten nur unzureichend bekannt sind und dass sich die genormten Messverfahren nur bedingt zur Bestimmung dieser Daten eignen [88 - 91].

## 8.4 Installations-Schallpegel

Der von der Körperschallquelle im schutzbedürftigen Raum hervorgerufene Installations-Schallpegel entscheidet darüber, ob die geltenden Schallschutzanforderungen eingehalten werden oder nicht. Der Installations-Schallpegel hängt sowohl von den akustischen Eigenschaften der Quelle als auch vom angeregten Bauteil und dem Übertragungsweg zwischen Sende- und Empfangsraum ab (bei der in dem Forschungsvorhaben betrachteten Bausituation ist nur die Konstruktion der angeregten Decke von Bedeutung). Die durchgeführten Untersuchungen umfassten eine Vielzahl verschiedener Körperschallquellen und Decken, so dass eine entsprechend große Menge an Messdaten vorliegt. Da es nicht sinnvoll wäre, alle vorhandenen Messwerte darzustellen, beschränken sich die nachfolgenden Ausführungen darauf, einen Überblick über die wichtigsten Untersuchungsergebnisse zu geben. Dabei werden folgende Themen behandelt:

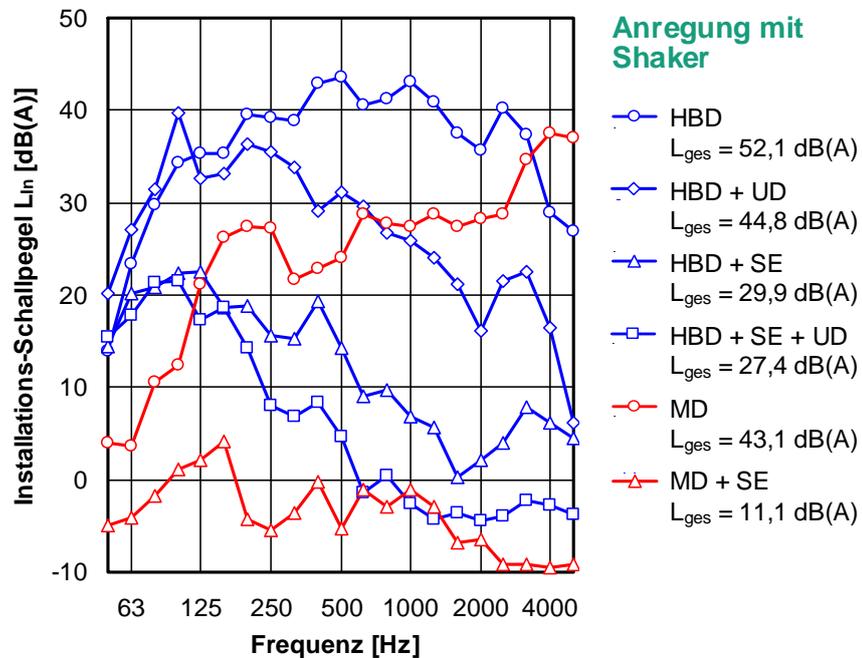
- a) Anregung verschiedener Decken mit derselben Körperschallquelle,
- b) Vergleich der verwendeten Körperschallerreger,
- c) Installations-Schallpegel typischer Körperschallquellen am Beispiel idealisierter und bauüblicher Quellen,
- d) Übersicht über alle untersuchten Aufbauten bezogen auf den Gesamtschallpegel der Installationsgeräusche.

Die zu den aufgeführten Themen für den Installations-Schallpegel ermittelten Messergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

### a) Anregung verschiedener Decken mit derselben Körperschallquelle

Werden verschiedene Decken nacheinander mit derselben Quelle angeregt, so spiegeln die Messergebnisse in erster Linie die Körperschalldämmung der untersuchten Decken wieder. Daneben wird der resultierende Installations-Schallpegel jedoch auch von der Wechselwirkung zwischen Quelle und Deckenaufgabe – genauer gesagt vom Verhältnis zwischen der Quellenadmittanz und der Eingangsadmittanz der Decke – beeinflusst. Um zu untersuchen, wie sich diese Effekte auf den gemessenen Installations-

Schallpegel auswirken, wurden die sechs in dem Forschungsvorhaben betrachteten Decken zunächst mit dem Shaker und anschließend mit dem Norm-Hammerwerk ange-regt. Da sich auf diese Weise besonders einfache und gut reproduzierbare Messbedin-gungen ergeben, erfolgte die Anregung dabei jeweils in direktem Kontakt zur Decke (d. h. der Shaker war direkt an der Decke befestigt und das Hammerwerk stand direkt auf der Deckenoberfläche).

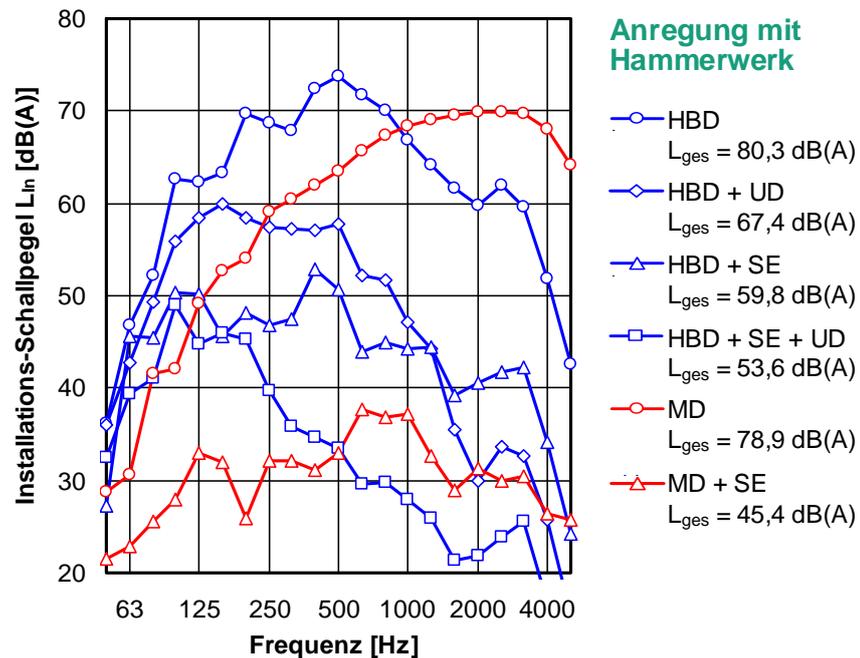


**Abb. 58:** Installations-Schallpegel der sechs untersuchten Decken bei Anregung mit dem Shaker. Der Shaker war direkt an der Deckenoberfläche angebracht.

Die unter Verwendung des Shakers gemessenen Werte sind in Abb. 58 dargestellt. Wie aus dem Vergleich mit Abb. 49 hervorgeht, sind zwischen dem gemessenen Installations-Schallpegel und dem bewerteten Norm-Trittschallpegel der Decken – zumindest was die akustische Rangfolge angeht – deutliche Zusammenhänge erkennbar. So weist z. B. die Massivdecke mit schwimmendem Estrich (MD + SE), die im pegelbestimmen-den Frequenzbereich über die höchste Trittschalldämmung verfügt, den niedrigsten Installations-Schallpegel auf. Bei der Holzbalken-Rohdecke (HBD), für die sich der höchste Wert des Installations-Schallpegels ergibt, ist die Trittschalldämmung dagegen besonders niedrig.

Ähnliche Zusammenhänge zwischen der Trittschalldämmung und dem Installations-Schallpegel sind auch bei Anregung der Decken mit dem Norm-Hammerwerk erkennbar (siehe Abb. 59). Betrachtet man sich die Messungen jedoch genauer (im Grunde handelt es sich dabei um nichts anderes als den A-bewerteten Norm-Trittschallpegel der Decken) treten allerdings auch Unterschiede zutage. So weist die Holzbalken-Rohdecke (HBD) bei Shaker-Anregung beispielsweise einen 9,0 dB höheren Wert des Installations-Schallpegels als die Massivdecke (MD) auf, bei Anregung mit dem Norm-Hammerwerk beträgt der Unterschied demgegenüber nur 1,4 dB. Dies hängt mit der bereits erwähnten Wechselwirkung zwischen Quelle und angeregter Struktur zusam-

men, die bei der leichten Holzbalken- und der schweren Massivdecke sehr unterschiedlich ausfällt.

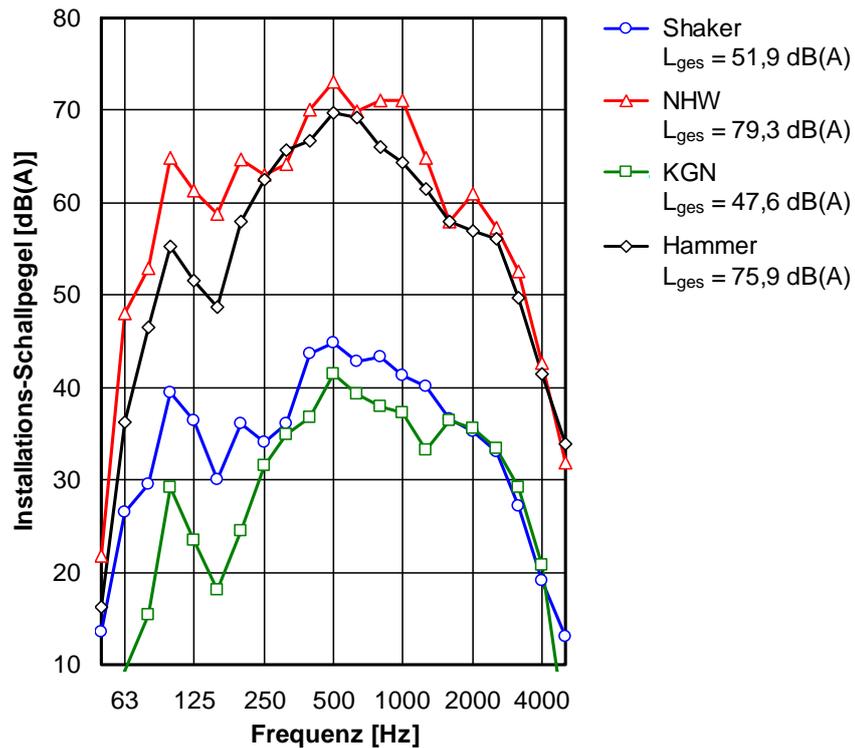


**Abb. 59:** Installations-Schallpegel der sechs untersuchten Decken bei Anregung mit dem Norm-Hammerwerk. Das Hammerwerk stand direkt auf der Deckenoberfläche.

b) Vergleich der verwendeten Körperschallerreger

Die Geräuschregung bei den Untersuchungen erfolgte mit vier verschiedenen Erregern, die in Abschnitt 5.3 beschrieben sind. Um die verwendeten Erreger – Shaker, Norm-Hammerwerk (NHW), Körperschallgeräuschnormal (KGN) und Empapendelfallhammer (Hammer) – miteinander zu vergleichen, wurden Messungen an einer bauüblichen Duschfläche (BD1 o. U.) durchgeführt, die in der Aussparung des schwimmenden Estrichs auf der Holzbalkendecke (HBD + SE) eingebaut war. Den in Abb. 60 dargestellten Messwerten lassen sich folgende Erkenntnisse entnehmen:

- Das KGN erzeugt das schwächste Anregungssignal und auch beim Shaker ist das Signal nur wenig stärker. Der vom NHW und dem Hammer erzeugte Installations-Schallpegel ist demgegenüber weitaus höher.
- Die Messergebnisse für das NHW und den Hammer weisen sowohl im Hinblick auf den Pegel als auch auf das Frequenzspektrum des erzeugten Schallsignals eine recht große Ähnlichkeit auf. Das ist auch nicht weiter überraschend, da es sich in beiden Fällen um eine Schlaganregung durch einen auf die Bauteiloberfläche herabfallenden Hammerkopf handelt.
- Die pegelbestimmenden Geräuschanteile liegen bei allen Erregern im mittleren Frequenzbereich bei etwa 500 Hz. Die tiefen und die hohen Frequenzen spielen in Bezug auf den Gesamtschallpegel der Installationsgeräusche hingegen nur eine untergeordnete Rolle.



**Abb. 60:** Installations-Schallpegel einer Sanitärinstallation bei Anregung mit unterschiedlichen Schwingungserregern. Die Messungen erfolgten an der bodenebenen Duschfläche Nr. 1 ohne Unterlage (BD1 o. U.), die sich in der Aussparung des schwimmenden Estrichs der Holzbalken-Rohdecke (Decke HBD + SE) befand.

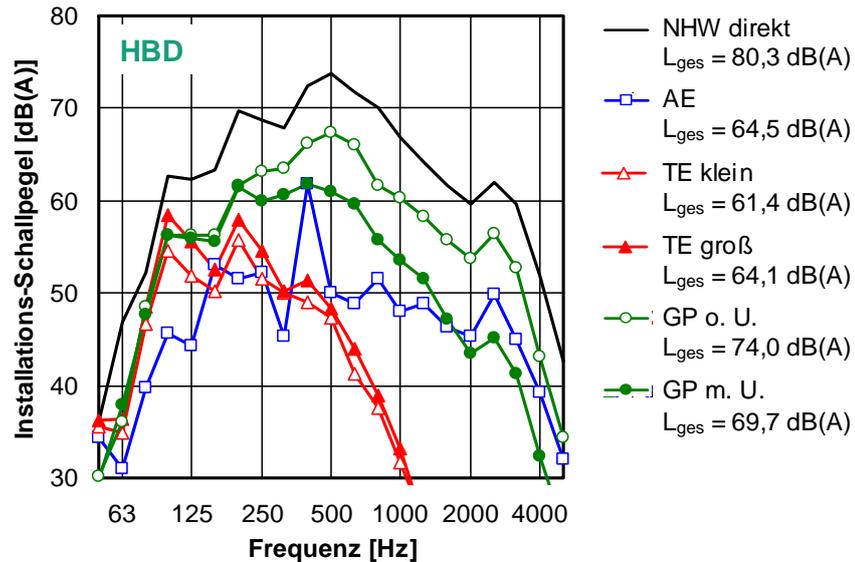
c) Installations-Schallpegel typischer Körperschallquellen

Bei den durchgeführten Untersuchungen kamen zahlreiche verschiedene Körperschallquellen zum Einsatz, wobei gemäß Abschnitt 5.4 zwischen idealisierten und praxisüblichen Quellen zu unterscheiden ist. Nachfolgend wird am Beispiel einiger repräsentativer Messaufbauten erläutert, wie sich der von den verschiedenen Quellen erzeugte Installations-Schallpegel voneinander unterscheidet. In Abb. 61 werden zunächst am Beispiel der wichtigsten idealisierten Quellen die Messergebnisse für die Holzbalken-Rohdecke (HBD) betrachtet. Die Geräuschanregung erfolgte jeweils mit dem Norm-Hammerwerk. Die wichtigsten Erkenntnisse aus den dargestellten Messergebnissen sind:

- Der höchste Installations-Schallpegel ergibt sich erwartungsgemäß, wenn das Hammerwerk direkt auf der Deckenoberfläche steht (durchgezogene schwarze Linie mit der Bezeichnung "NHW direkt").
- Auch die verflieste Gefälleplatte weist einen hohen Pegel auf, sofern sie ohne elastische Unterlage direkt auf der Decke liegt (Quelle GP o. U.). Mit einer Gummigranulatmatte als Unterlage (GP m. U.) vermindert sich der Pegel ein wenig, bleibt aber immer noch verhältnismäßig hoch.
- Der durch den Anhydrit-Estrich (AE) erzeugte Pegel ist deutlich geringer als bei der Gefälleplatte. Allerdings machen sich die ausgeprägten Eigenschwingungen der

Estrichplatte – kenntlich an den starken Schwankungen im Frequenzverlauf der Messkurve – hier negativ bemerkbar.

- Die niedrigsten Werte des Installations-Schallpegels erreicht der Trockenestrich (TE klein und TE groß), wobei die Plattenfläche (25 cm x 75 cm oder 100 cm x 100 cm) im Ergebnis nur eine untergeordnete Rolle spielt.
- Abgesehen vom Trockenestrich, bei dem im Bereich hoher Frequenzen eine deutliche Absenkung des Pegels erfolgt, weist der Installations-Schallpegel bei allen Quellen ein ähnliches Frequenzspektrum auf.

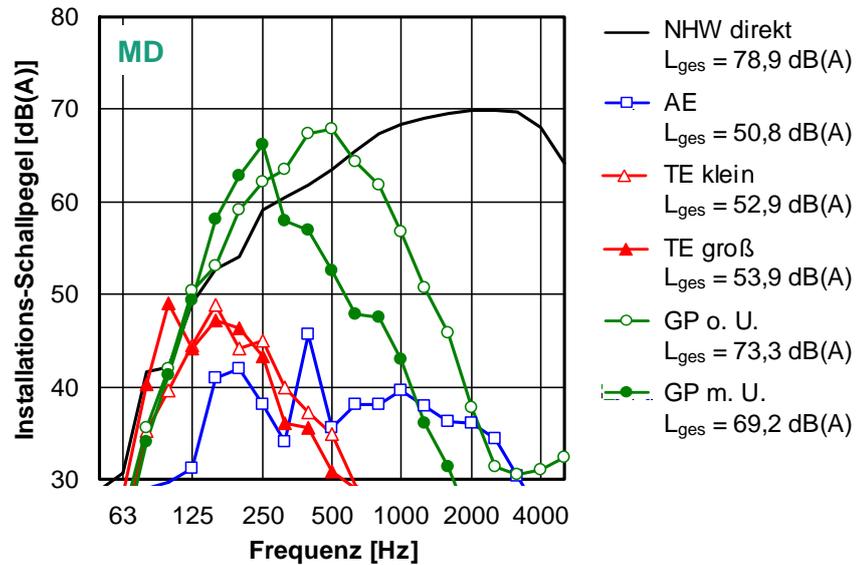


**Abb. 61:** Installations-Schallpegel verschiedener Körperschallquellen in idealisierter Bauweise bei Anregung mit dem Norm-Hammerwerk (NHW). Die Quellen befanden sich auf der Holzbalken-Rohdecke (HBD). Bei der als durchgezogene schwarze Linie dargestellten Messung befand sich das Hammerwerk direkt auf der Deckenoberfläche.

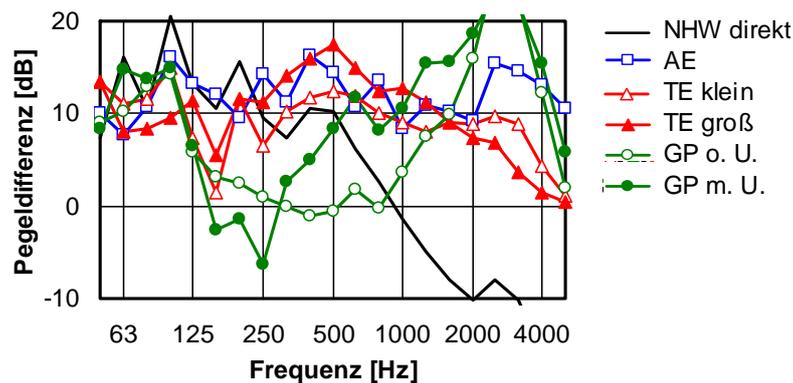
Ähnliche Ergebnisse wie bei der Holzbalkendecke ergeben sich auch für die Massivdecke (siehe Abb. 62). Zwar ist der Frequenzverlauf des Installations-Schallpegels hier deutlich anders, im Hinblick auf den Gesamtschallpegel sind die Unterschiede aber oft nur gering. Dies trifft allerdings nicht auf die untersuchten Estrichelemente (Anhydrit-Estrich AE sowie Trockenestriche TE klein und TE groß) zu, die in Verbindung mit der Massivdecke einen etwa 10 - 15 dB niedrigeren Gesamtpegel als auf der Holzbalkendecke aufweisen.

Die Unterschiede zwischen der Massiv- und der Holzbalkendecke werden besonders deutlich, wenn man die Differenz zwischen dem für die beiden Decken gemessenen Installations-Schallpegel bildet, also die Messwerte für die Massivdecke teilweise von den entsprechenden Werten für die Holzbalkendecke subtrahiert. Wie sich aus den in Abb. 63 dargestellten Werten entnehmen lässt, ergibt sich für die drei Estrichelemente auf der Massivdecke in einem weiten Frequenzbereich eine etwa 10 dB geringerer Pegel als auf der Holzbalkendecke. Bei der Gefälleplatte sind hingegen sowohl Bereiche mit positiver als auch mit negativer Pegeldifferenz vorhanden. Offensichtlich verhalten sich

Körperschallquellen, die auf einer weichen Unterlage aufliegen, auf massiven Deckenkonstruktionen akustisch günstiger als in Verbindung mit leichten Holzbalkendecken.



**Abb. 62:** Gleiche Darstellung wie Abb. 61, aber in Verbindung mit der Massivdecke (MD).

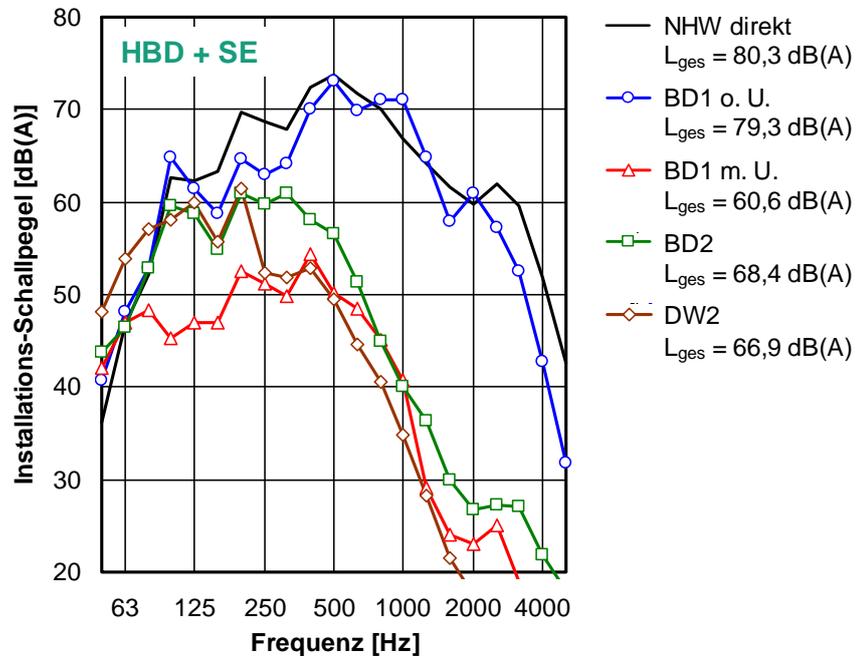


**Abb. 63:** Differenz zwischen den in Abb. 61 und Abb. 62 für die Holzbalken-Rohdecke (HBD) und die Massivdecke (MD) dargestellten Installations-Schallpegeln,  $\Delta L_{in} = L_{in,HBD} - L_{in,MD}$ .

Die Messwerte für bauübliche Körperschallquellen in Abb. 64 (es handelt sich um die bodenebenen Duschflächen BD1 o. U., BD1 m. U. und BD2 sowie die Duschwanne DW2) unterscheiden sich nicht grundlegend von den für die idealisierten Quellen ermittelten Werten. Die Messungen erfolgten gleichfalls mit dem Norm-Hammerwerk und erbrachten folgende Ergebnisse:

- Ohne körperschalldämmende Unterlage (Duschfläche BD1 o. U.) ergibt sich für die betrachteten Duschelemente fast der gleiche Installations-Schallpegel, als wenn das Hammerwerk statt auf der Dusche auf der Rohdecke aufgestellt wird (durchgezogene schwarze Linie mit der Bezeichnung "NHW direkt")

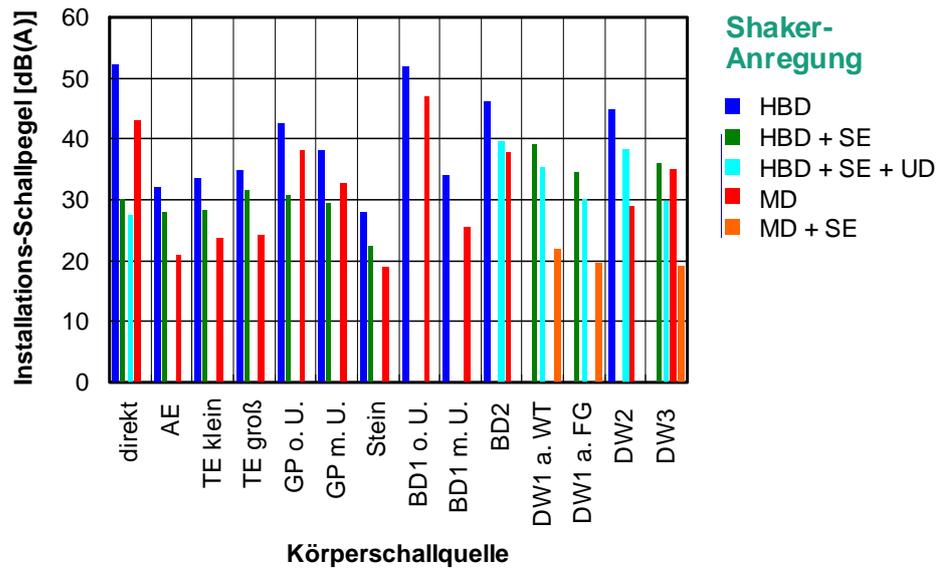
- Die übrigen beiden Duschflächen und die Duschwanne verfügten jeweils über eine elastische Unterlage. Insofern ist der Installations-Schallpegel hier deutlich geringer. Die Einzelheiten des akustischen Verhaltens hängen hier von mehreren Faktoren, wie z. B. der flächenbezogenen Masse, den Eigenschwingungen und der inneren Dämpfung des Duschelements sowie der dynamischen Steifigkeit der verwendeten Unterlage ab.



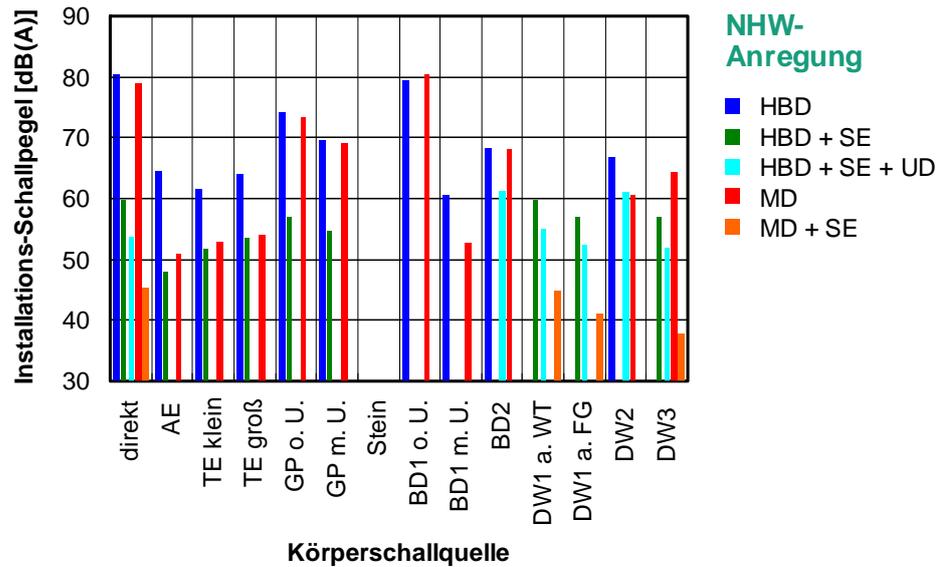
**Abb. 64:** Installations-Schallpegel von drei bodenebenen Duschflächen (BD1 o. U., BD1 m. U. und BD2) und einer Duschwanne (DW2) bei Anregung mit dem Norm-Hammerwerk (NHW). Die Quellen befanden sich auf der Holzbalkendecke mit schwimmendem Estrich (HBD + SE), waren aber in einer Aussparung des Estrichs eingebaut, so dass sie unmittelbar auf der Rohdecke auflagen.

d) Übersicht über alle untersuchten Aufbauten

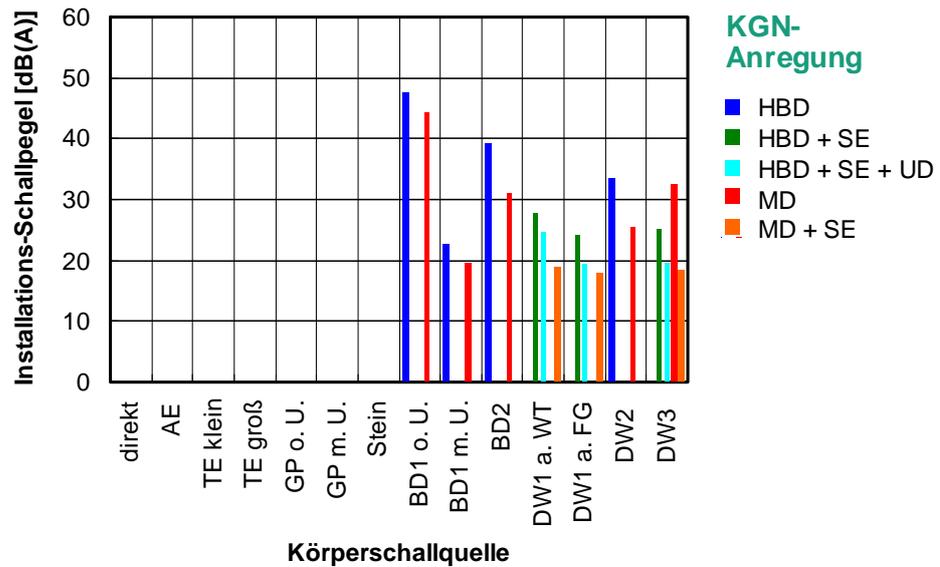
Wegen der Vielzahl der Messungen ist in der nachfolgenden Übersicht nur der Gesamtschallpegel der Installationsgeräusche aufgeführt. Die Darstellung erfolgt in Form von Balkendiagrammen, wobei jeder Balken den Installations-Schallpegel für eine Messung repräsentiert. Die Messergebnisse wurden auf vier Diagramme aufgeteilt, die den vier verwendeten Anregungsarten (Anregung mit Shaker, NHW, KGN und Hammer) zugeordnet sind. Aus der Farbe der Balken geht hervor, auf welcher Decke die dargestellte Messungen erfolgten (die Holzbalkendecke mit abgehängter Unterdecke, HBD + UD, wurde dabei nicht berücksichtigt, da für diese Decke nur verhältnismäßig wenige Messdaten vorliegen). Beim Vergleich der Abbildungen untereinander ist zu beachten, dass wegen der abweichenden Anregungskraft der verwendeten Erreger zum Teil eine unterschiedliche Skalierung der Ordinaten-Achse erforderlich war.



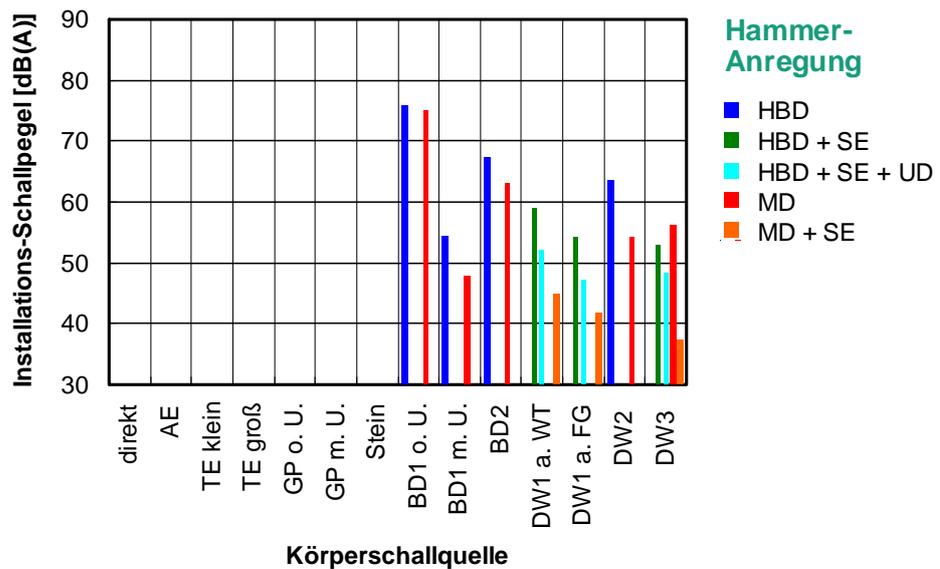
**Abb. 65:** Installations-Schallpegel der untersuchten Körperschallquellen auf den verschiedenen Decken bei Anregung mit dem Shaker. Die dargestellten Balken bezeichnen den Gesamtschallpegel der im Empfangsraum unterhalb der Decke gemessenen Installationsgeräusche.



**Abb. 66:** Gleiche Darstellung wie in Abb. 65, aber für Anregung mit dem Norm-Hammerwerk (NHW).



**Abb. 67:** Gleiche Darstellung wie in Abb. 65, aber für Anregung mit dem Körperschallgeräuschnormal (KGN).



**Abb. 68:** Gleiche Darstellung wie in Abb. 65, aber für Anregung mit dem Pendelfallhammer (Hammer).

Wegen der großen Anzahl von Messungen bietet es sich an, für die in Abbildungen 65 bis 68 dargestellten Werte eine statistische Auswertung vorzunehmen. Zwar ist die Aussagefähigkeit der Statistik nur begrenzt, weil nicht alle Körperschallquellen auf allen Decken gemessen wurden, orientierende Aussagen lassen sich aus den Ergebnissen der Auswertung jedoch ableiten. So spiegelt die große Bandbreite der gemessenen Pegel (Wertebereich zwischen 11 dB(A) und 81 dB(A), Mittelwert ca. 44 dB(A)) die große Vielfalt der untersuchten Körperschallquellen und Decken wieder. Die für die einzelnen De-

cken berechneten Mittelwerte (die Mittelung erfolgte über alle Werte, die für die verschiedenen Quellen auf der jeweiligen Decke gemessen wurden) korreliert gemäß der in Tab. 4 aufgeführten Werte zumindest näherungsweise mit dem bewerteten Norm-Trittschallpegel der Decken. Allerdings erscheint die Relation zwischen Massiv- und Holzbalkendecken dabei teilweise verzerrt, so dass sich der Trittschallpegel in der Praxis nur bedingt zur Abschätzung von Installationsgeräuschen eignet. Auf dieses Thema wird später noch genauer eingegangen.

Decke	$L_{n,w}$ [dB]	$L_{In}$ [dB(A)]
HBD	73,3	52,8
HBD + UD	63,3	47,6
HBD + SE	55,0	42,1
HBD + SE + UD	51,2	38,9
MD	74,2	45,9
MD + SE	39,7	28,9

**Tab. 4:** Bewerteter Norm-Trittschallpegel der untersuchten Decken,  $L_{n,w}$ , im Vergleich zu dem über alle untersuchten Körperschallquellen arithmetisch gemittelten Installations-Schallpegel,  $L_{In}$ .

## 9 Charakterisierung der Körperschallquellen

Die Charakterisierung der verwendeten Körperschallquellen diente dazu, die maßgebenden akustischen Eigenschaften der Quellen zu ermitteln, um auf diese Weise die für die Prognose des Installations-Schallpegels erforderlichen Eingangsdaten bereitzustellen. Die akustischen Eigenschaften der Quellen wurden auf messtechnischem Wege bestimmt, indem jeweils die freie Schnelle und die Quellenadmittanz ermittelt wurden. Mit diesen beiden Größen ist die Quelle im Prinzip (unter der vereinfachten Annahme einer punktförmigen und momentenfreien Krafteinleitung) akustisch vollständig charakterisiert. Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen werden nachfolgend beschrieben.

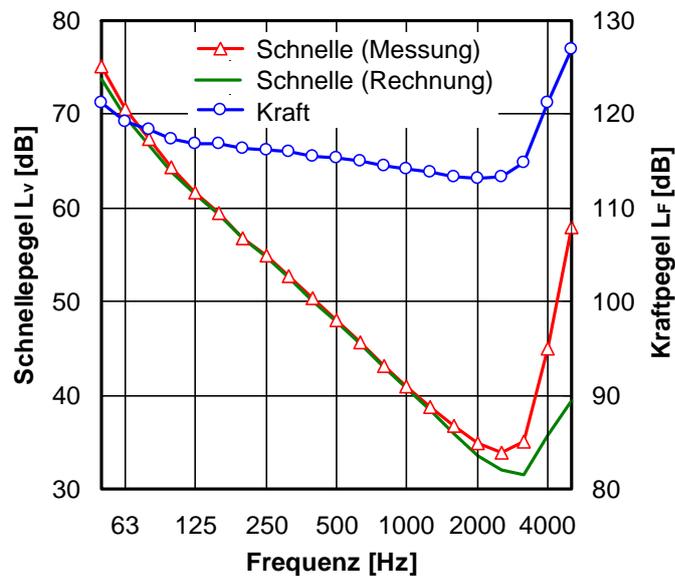
### 9.1 Freie Schnelle

Wegen des hohen messtechnischen Aufwandes und der Vielzahl der verwendeten Körperschallquellen mussten die Untersuchungen zur akustischen Charakterisierung der Quellen auf eine repräsentative Auswahl von Konstruktionen beschränkt werden. Die Auswahl umfasste zwei idealisierte Elemente und zwei praxisnahe Aufbauten. Bei den idealisierten Elementen handelte es sich um den 100 cm x 100 cm großen Trockenestrich (TE groß) und die verflieste Gefälleplatte mit einer Gummigranulatmatte als Unterlage (GP m. U.). Die praxisnahen Aufbauten bestanden aus der Duschwanne DW1 in Verbindung mit einem Fußgestell und einem Wannenträger (DW1 a. FG und DW1 a. WT). Da die Anregung jeweils sowohl mit dem Shaker als auch mit dem Norm-Hammerwerk erfolgte, ergaben sich für die Quellencharakterisierung insgesamt acht verschiedene Körperschallquellen.

Die freie Schnelle dieser acht Quellen wurde nach dem in Abschnitt 7.9 beschriebenen Verfahren messtechnisch bestimmt. Dabei wurde zur Kontrolle zunächst eine Voruntersuchung an einem Kalksandstein durchgeführt, der sich in dem betrachteten Frequenzbereich wie eine starre Masse verhielt. Der Stein wurde auf eine weiche elastische Lagerung gebettet und mit dem Inertial-Shaker angeregt. Gemessen wurden die eingeleitete Kraft  $\underline{F}$  und die resultierende Schnelle  $\underline{v}$ . Da eine starre Masse eine Eingangsadmittanz von  $\underline{Y} = 1/(j2\pi fm)$  aufweist (hierbei bezeichnet  $j$  die imaginäre Einheit und  $m \cong 15$  kg die Masse des Steins) ergibt sich für den Betrag von Kraft und Schnelle theoretisch der Zusammenhang  $|\underline{v}| = |\underline{F}|/(2\pi fm)$ . In Pegelschreibweise geht dieser Ausdruck in die Beziehung

$$L_v = L_F - 20 \lg(f) \text{ dB} - 20 \lg(m) \text{ dB} + 10 \text{ dB} \quad (30)$$

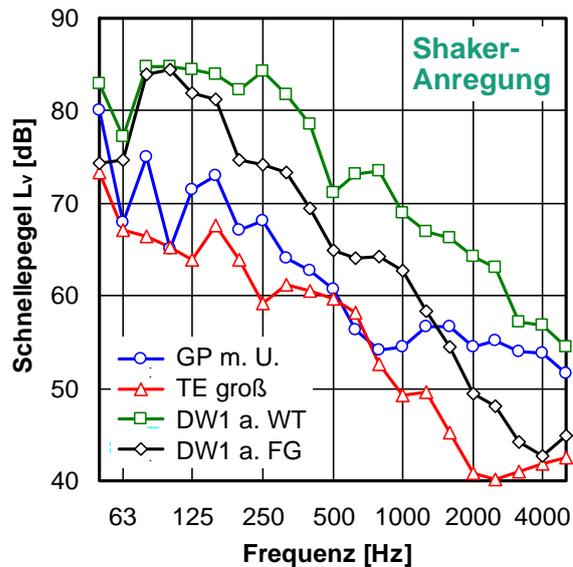
für den Schnellepegel  $L_v$  und den Kraftpegel  $L_F$  über, in den die Frequenz  $f$  in Hz und die Masse  $m$  in kg einzusetzen sind. Wendet man die obige Beziehung auf die gemessene Kraft an, so erhält man gemäß Abb. 69 für den untersuchten Stein eine gute Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und dem nach Gl. (30) berechneten Schnellepegel (die Abweichungen bei hohen Frequenzen sind auf die einsetzenden Eigenschwingungen des Steins bzw. möglicherweise auch auf den Einfluss der Aufnehmermontage zurückzuführen). Dies bestätigt, dass das zur Bestimmung der freien Schnelle verwendete Messverfahren unter Einsatz des Laser-Vibrometers korrekte Ergebnisse liefert.



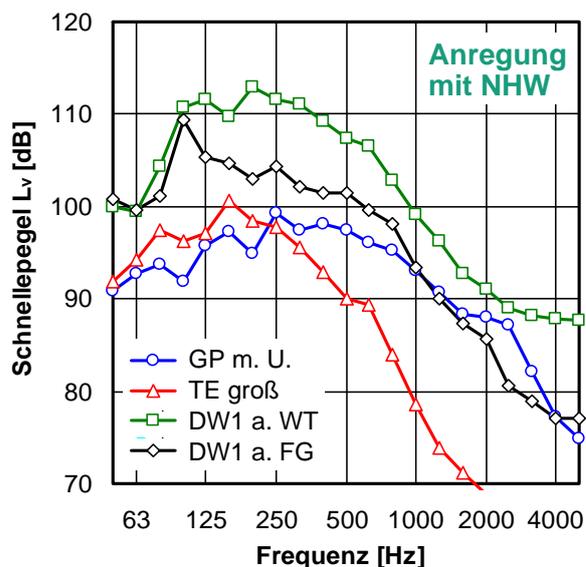
**Abb. 69:** Freie Schnelle eines starren Steins mit einer Masse von ca. 15 kg bei Shaker-Anregung. Der gleichfalls dargestellte Rechenwert der Schnelle (grüne durchgezogene Linie) wurde aus der gemessenen Anregungskraft, die ebenfalls in dem Diagramm eingezeichnet ist, berechnet.

Die für die acht untersuchten Körperschallquellen ermittelten Werte der freien Schnelle sind in den Abbildungen 70 und 71 dargestellt, wobei sich Abb. 70 auf die Anregung mit dem Shaker und Abb. 71 auf die Anregung mit Norm-Hammerwerk bezieht. Wie

zu erwarten, ergeben sich bei Verwendung des Norm-Hammerwerks deutlich höhere Pegel als mit dem Shaker. Die Rangfolge zwischen den Quellen ist aber in beiden Fällen gleich: die auf dem Wannenträger gelagerte Duschwanne (DW1 a. WT) weist den höchsten Schnellepegel auf, der Trockenestrich (TE groß) den geringsten. Bei Anregung mit dem Hammerwerk erfolgt gegenüber der Shaker-Anregung eine leichte Absenkung des Kurvenverlaufs bei tiefen Frequenzen. Abgesehen davon, dass der Schnellepegel der Gefälleplatte (GP m. U.) im Vergleich zu den anderen Quellen im Bereich hoher Frequenzen weniger steil abfällt, unterscheiden sich die Frequenzspektren der verschiedenen Quellen aber nur verhältnismäßig wenig.



**Abb. 70:** Freie Schnelle der untersuchten Körperschallquellen bei Anregung mit dem Shaker.

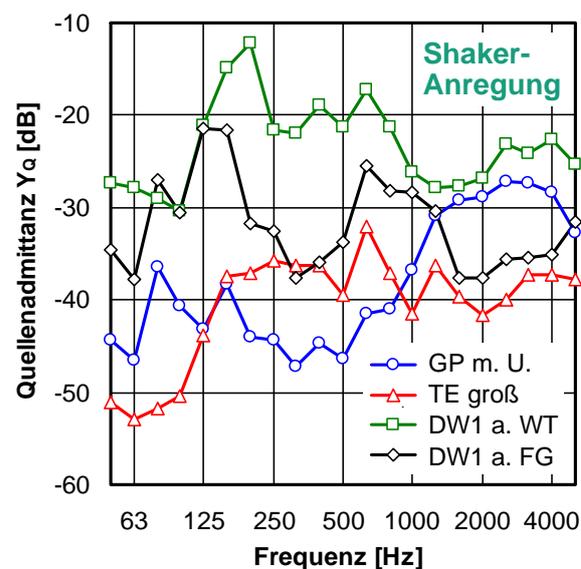


**Abb. 71:** Freie Schnelle der untersuchten Körperschallquellen bei Anregung mit dem Norm-Hammerwerk.

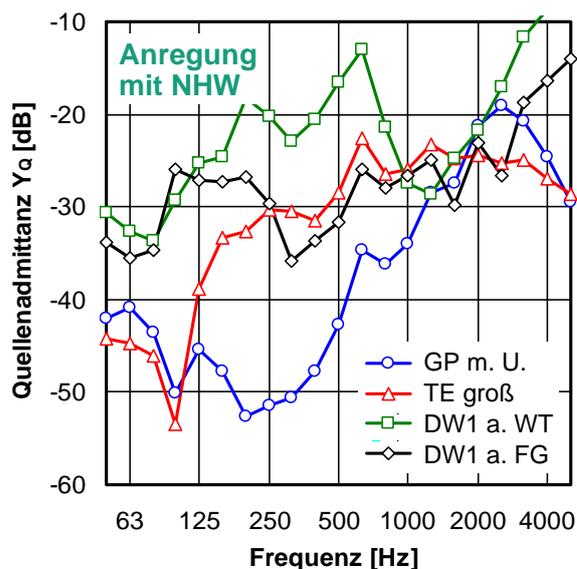
## 9.2 Betrag der Quellenadmittanz

Nach Ermittlung der freien Schnelle besteht der zweite Schritt zur akustischen Charakterisierung der untersuchten Körperschallquellen in der Bestimmung der Quellenadmittanz. Hierbei wird zunächst nur der Betrag der Admittanz ermittelt, da dies messtechnisch erheblich einfacher und genauer ist, als auch den Real- und den Imaginärteil zu bestimmen. Die Messung des Betrags der Quellenadmittanz erfolgt nach dem in Abschnitt 7.7 beschriebenen Verfahren, das zuverlässige und verhältnismäßig genaue Werte liefert. In das Ergebnis gehen dabei gemäß Gl. (26) drei verschiedene Messgrößen ein: die im vorangehenden Abschnitt ermittelte freie Schnelle der Körperschallquelle, die von der Quelle in die Massivdecke eingeleitete Körperschall-Leistung sowie der Realteil der Eingangsadmittanz der Massivdecke (die beiden letztgenannten Werte wurden nach den Verfahren in den Abschnitten 7.3 und 7.5 gemessen).

Die auf diese Weise für den Betrag der Quellenadmittanz ermittelten Messwerte sind in Abb. 72 dargestellt, wobei sich die aufgeführten Werte auf die Anregung mit dem Shaker beziehen. Eine gleichartige Darstellung, bei der die Anregung stattdessen mit dem Norm-Hammerwerk erfolgte, ist in Abb. 73 wiedergegeben. Obgleich im Frequenzverlauf deutliche Unterschiede bestehen, bewegt sich die Quellenadmittanz bei allen untersuchten Quellen im Mittel etwa in der gleichen Größenordnung. Dies gilt insbesondere dann, wenn man die Admittanz des gleichen Aufbaus bei Anregung mit dem Shaker und dem Norm-Hammerwerk miteinander vergleicht. Eine Ausnahme hiervon bildet der Trockenestrich (TE groß), für den sich bei Shaker-Anregung eine deutlich geringere Admittanz als mit dem Norm-Hammerwerk ergibt. Der Grund hierfür ist bislang noch unklar. Er könnte möglicherweise auf eine Wechselwirkung zwischen den Hammerköpfen aus Stahl und den verhältnismäßig weichen Spanplatten, aus denen der Trockenestrich besteht, zurückzuführen sein. Bei Anregung mit dem Shaker ist dieser Effekt nicht vorhanden, da zwischen Shaker und Estrich ein starrer Kontakt vorhanden ist.



**Abb. 72:** Quellenadmittanz der untersuchten Körperschallquellen bei Anregung mit dem Shaker.



**Abb. 73:** Quellenadmittanz der untersuchten Körperschallquellen bei Anregung mit dem Norm-Hammerwerk.

Decke bzw. Quelle	Erreger	$Y_B$ bzw. $Y_Q$ [dB]
HBD	---	-37,1
HBD + SE	---	-67,7
MD	---	-80,3
GP m. U.	Shaker	-38,1
GP m. U.	NHW	-37,7
TE groß	Shaker	-40,6
TE groß	NHW	-31,8
DW1 a. WT	Shaker	-23,3
DW1 a. WT	NHW	-21,5
DW1 a. FG	Shaker	-31,9
DW1 a. FG	NHW	-27,4

**Tab. 5:** Mittlerer Wert der Eingangs- bzw. Quellenadmittanz für die untersuchten Decken und Körperschallquellen. Die Mittelung erfolgte arithmetisch über die Terzpegel im Frequenzbereich von 50 - 5000 Hz.

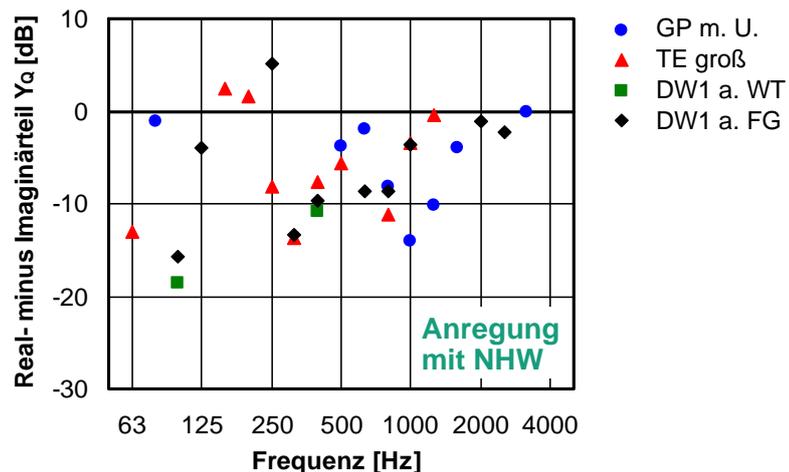
Um einen besseren Überblick zu erhalten, wie sich die Admittanzen der untersuchten Körperschallquellen und Decken im Vergleich zueinander verhalten, kann man die gemessenen Terzpegel durch arithmetische Mittelung zu einer Einzahlangabe zusammenfassen. Der auf diese Weise berechnete Mittelwert ist in Tab. 5 dargestellt. Wie der Tabelle zu entnehmen ist, liegt die mittlere Admittanz der verwendeten Körperschallquellen in den meisten Fällen annähernd im gleichen Bereich wie die Eingangsadmittanz der Holzbalken-Rohdecke (HBD). Daher wird bei Anregung der Holzbalken-Rohdecke viel Leistung von der Körperschallquelle in die Decke übertragen. Die Eingangsadmittanz des schwimmenden Estrichs (HBD + SE) sowie insbesondere der Massivdecke (MD) ist

wegen der größeren flächenbezogenen Masse der angeregten Struktur demgegenüber weitaus kleiner, weshalb die übertragene Leistung bei diesen Decken erheblich geringer ausfällt.

### 9.3 Real- und Imaginärteil der Quellenadmittanz

Neben dem Betrag der Quellenadmittanz sind für genaue Berechnungen auch der Real- und der Imaginärteil erforderlich. Leider lassen sich diese beiden Größen bei den hier verwendeten Quellen nur schwer bestimmen. Bei Verwendung des in Abschnitt 7.8 beschriebenen Messverfahrens erhält man nur für einige Frequenzen brauchbare Ergebnisse. Bei anderen Frequenzen versagt das Verfahren, weil in die Auswertung fünf verschiedene Messgrößen einfließen, die zum Teil beträchtliche Fehler aufweisen und so in ihrer Gesamtheit die Anwendung des Verfahrens verhindern. Das hat zur Folge, dass die für den Real- und Imaginärteil gemessenen Frequenzspektren große Lücken aufweisen. Die ermittelten Messergebnisse konnten deshalb nur orientierend verwendet werden. Als Eingangsdaten für akustische Berechnungen waren sie hingegen nicht geeignet.

Eine wichtige Anwendung der Ergebnisse bestand darin, eine Aussage über das Verhältnis zwischen dem Real- und dem Imaginärteil der Quellenadmittanz zu erhalten. Wie später noch genauer erläutert wird, spielt dies bei der Vereinfachung der Berechnungsformeln zur Prognose des Installations-Schallpegels eine nicht unwesentliche Rolle. Das Verhältnis zweier Größen geht in Pegelschreibweise in eine Differenz über. Um das Verhältnis zwischen Real- und Imaginärteil zu veranschaulichen, wurde deshalb einfach die Differenz der entsprechenden Pegel gebildet (Realteil minus Imaginärteil). Die so berechnete Pegeldifferenz ist in Abb. 74 aufgetragen. Die Abbildung bezieht sich auf die Anregung mit dem Norm-Hammerwerk und enthält alle verwertbaren Ergebnisse, die den durchgeführten Messungen entnommen werden konnten. Die verschiedenen Körperschallquellen sind durch unterschiedliche Symbole gekennzeichnet.



**Abb. 74:** Differenz zwischen dem Realteil und dem Imaginärteil der gemessenen Quellenadmittanz bei Anregung mit dem Norm-Hammerwerk.

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, ergeben sich für die Differenz zwischen Real- und Imaginärteil mit wenigen Ausnahmen fast immer negative Werte. Das bedeutet, dass der Imaginärteil der Quellenadmittanz für die untersuchten Körperschallquellen normalerweise ein größeren – zumeist sogar einen deutlich größeren – Wert als der Realteil aufweist. Dies ist im Grunde nicht überraschend, da die Admittanz der betrachteten Körperschallquellen vor allem durch die Masse der schwingenden Platte sowie die Federwirkung der elastischen Unterlage bestimmt wird und beide Bauteile in idealisierter Betrachtungsweise eine rein imaginäre Admittanz aufweisen (für eine starre Masse gilt  $\underline{Y} = 1/(j2\pi fm)$ , für eine masselose Feder  $\underline{Y} = j2\pi f/c$ ). Bei Anregung mit dem Shaker (hier nicht dargestellt) ergibt sich ein ähnliches Bild, nur dass die Messergebnisse wegen des geringeren Signalpegels noch ungenauer und noch weniger zuverlässig sind.

## 10 Übertragung des Installations-Schallpegels

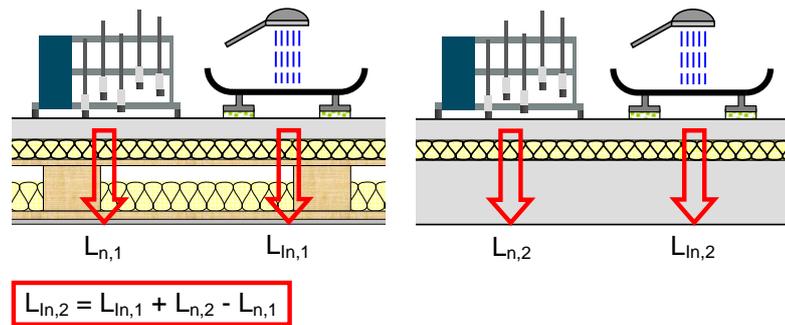
Für Wasserinstallationen aller Art liegen bereits zahlreiche Messungen des Installations-Schallpegels vor (viele dieser Messungen wurden in den Prüfständen des IBP durchgeführt). Allerdings beziehen sich fast alle Messergebnisse auf die im Massivbau vorhandene bauliche Situation, d. h. – bezogen auf die in dem durchgeführten Forschungsvorhaben beispielhaft betrachteten Duschflächen und -wannen – dass sich die Wannan bei den Messungen auf einer massiven Decke befanden. Es würde ein große Zeit- und Kostenersparnis bedeuten, wenn sich die zahlreichen für massive Decken vorhandenen Ergebnisse auf möglichst einfache Weise (d. h. ohne ergänzende Messungen und umfangreiche Berechnungen) zumindest näherungsweise rechnerisch auf Holzbalkendecken übertragen ließen.

Wie bereits in den vorangehenden Abschnitten erläutert wurde, besteht dabei allerdings das Problem, dass sich Sanitärinstallationen im Massivbau wie Kraftquellen verhalten. Das bedeutet, dass die von der Körperschallquelle in das angeregte Bauteil eingeleitete Kraft unabhängig von der Beschaffenheit des Bauteils (bei Massivdecken betrifft dies insbesondere die flächenbezogene Masse) immer gleich bleibt. Bei Holzbalkendecken ist die Situation hingegen eine andere. Hier wird die von der Quelle auf die Decke ausgeübte Kraft (und damit natürlich auch die in die Decke eingeleitete Körperschall-Leistung) in starkem Maße davon bestimmt, in welchem Verhältnis die Quellenadmittanz  $\underline{Y}_Q$  und die Eingangsadmittanz der angeregten Decke  $\underline{Y}_B$  zueinander stehen. Eine rechnerische Übertragung des gemessenen Installations-Schallpegels von massiven Deckenkonstruktionen auf Holzbalkendecken ist deshalb im Normalfall nicht ohne weiteres – oder zumindest nur mit starken Einschränkungen – möglich.

Es gibt jedoch auch Fälle, in denen die erwähnten Einschränkungen nicht zur Anwendung kommen. Dies trifft z. B. dann zu, wenn die durch die Quelle angeregten Bestandteile der Konstruktion übereinstimmen, also etwa dann, wenn die Holzbalken- und die Massivdecke über einen gleichartigen schwimmenden Estrich verfügen. Ist dies der Fall, so ist die von der Quelle in die Decke eingeleitete Körperschall-Leistung in beiden Fällen annähernd gleich und die rechnerische Übertragung des gemessenen Installations-Schallpegels kann gemäß Abb. 75 auf einfache Weise unter Verwendung des Norm-Trittschallpegels der beiden Decken erfolgen:

$$L_{In,2} = L_{In,1} + L_{n,2} - L_{n,1} , \quad (31)$$

wobei  $L_{In}$  und  $L_n$  den für die jeweilige Decke gemessenen Installations-Schallpegel und Norm-Trittschallpegel bezeichnen. Die Indizes 1 und 2 stehen im vorliegenden Fall für die Massiv- und die Holzbalkendecke. Sie könnten aber – falls die oben beschriebenen baulichen Voraussetzungen vorliegen – ebenso zur Übertragung der Werte von einer Massivdecke auf eine andere Massivdecke oder von einer Holzbalken- auf eine andere Holzbalkendecke verwendet werden.

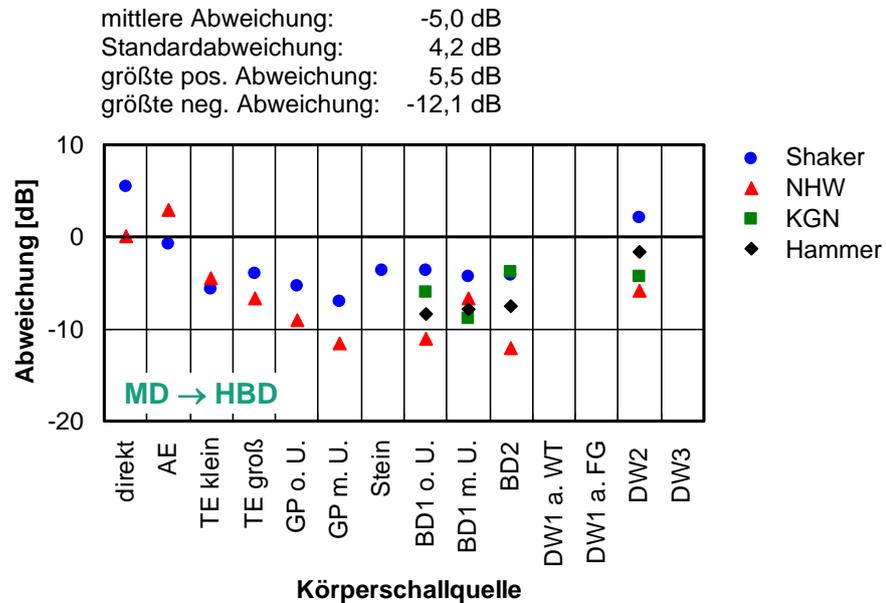


**Abb. 75:** Skizze zur Veranschaulichung der rechnerischen Übertragung des Installations-Schallpegels zwischen zwei verschiedenen Decken unter Verwendung des Norm-Trittschallpegels.

Der Norm-Trittschallpegel wird zur rechnerischen Übertragung des Installations-Schallpegels herangezogen, weil er den wichtigsten akustischen Kennwert für Decken darstellt und für die meisten Deckenkonstruktionen bekannt ist. Liegen ausnahmsweise keine Messergebnisse vor, lässt er sich notfalls auch aus der Literatur oder den in den bauakustischen Normen enthaltenen Bauteilkatalogen entnehmen. Die Berechnung des Installations-Schallpegels nach Gl. (31) muss selbstverständlich terzweise erfolgen, weil sich die für den Trittschall verfügbare Einzahlangabe – der bewertete Norm-Trittschallpegel  $L_{n,w}$  – hierzu nicht eignet (er wird nach einem speziellen Verfahren unter Verwendung einer genormten Bezugskurve gebildet, das keinen Zusammenhang mit dem Gesamtpegel der Installationsgeräusche aufweist). Nach der frequenzabhängigen Berechnung in Terzen werden die Terzpegel dann energetisch zu einem Gesamtschallpegel aufaddiert.

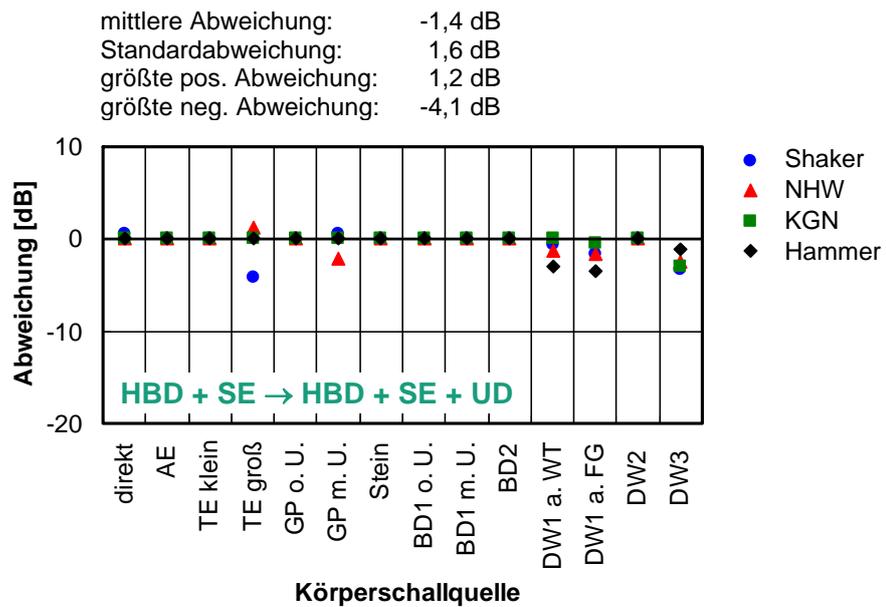
Neben dem Norm-Trittschallpegel kann auch der Installations-Schallpegel einer anderen Körperschallquelle zur rechnerischen Übertragung der Messwerte zwischen zwei verschiedenen Decken herangezogen werden. Voraussetzung hierfür ist lediglich, dass für die Vergleichsquelle Messungen an beiden Decken vorliegen. Außerdem kann die Übertragung natürlich nicht nur zwischen Decken mit dem gleichen schwimmenden Estrich erfolgen. Weitere mögliche Anwendungsfälle sind z. B. der Einbau einer abgehängten Unterdecke unter einer vorhandenen Decke oder die Betrachtung eines anderen Empfangsraums (wenn der Installations-Schallpegel nicht unterhalb der Decke, sondern in einem benachbarten Raum gemessen wird). In allen diesen Fällen ändert sich nur der Übertragungsweg, das angeregte Bauteil bleibt hingegen gleich.

Um zu untersuchen, wie gut das beschriebene Verfahren zur rechnerischen Übertragung des Installations-Schallpegels in der Praxis funktioniert, wurden auf Grundlage der ermittelten Messergebnisse entsprechende Berechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abb. 76 und Abb. 77 dargestellt. Aufgetragen ist jeweils die Abweichung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Wert bezogen auf den Gesamtpegel der Installationsgeräusche. Die Übersicht umfasst alle untersuchten Körperschallquellen und sämtliche Anregungsarten.



**Abb. 76:** Abweichung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Installations-Schallpegel (Messung minus Rechnung) bei rechnerischer Übertragung der Messwerte von der Massivdecke (MD) auf die Holzbalken-Rohdecke (HBD). Die Übertragung erfolgte nach Gl. (31) unter Verwendung des gemessenen Norm-Trittschallpegels.

Die in Abb. 76 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass bei der rechnerischen Übertragung des gemessenen Installations-Schallpegels von der Massivdecke (MD) auf die Holzbalken-Rohdecke (HBD) große Abweichungen zu verzeichnen sind. Dies ist auch nicht anders zu erwarten, da die Voraussetzungen für die Anwendung von Gl. (3) in diesem Fall nicht erfüllt sind. Anders verhält es sich, wenn die Holzbalkendecke mit schwimmenden Estrich (HBD + SE) zusätzlich mit einer abgehängten Unterdecke versehen wird (HBD + SE + UD). Hier ist Gl. (3) anwendbar, da der angeregte Teil der Deckenkonstruktion (d. h. der schwimmende Estrich) bei beiden Decken gleich ist. Wie aus Abb. 77 zu ersehen ist, ergibt sich in diesem Fall erwartungsgemäß eine recht gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung. Gleiches gilt auch, wenn man den gemessenen Installations-Schallpegel von der Massivdecke mit schwimmendem Estrich (HBD + SE) auf die Holzbalkendecke mit schwimmendem Estrich (HBD + SE) oder die Holzbalkendecke mit schwimmendem Estrich und abgehängter Unterdecke (HBD + SE + UD) überträgt (hier nicht dargestellt).



**Abb. 77:** Gleiche Darstellung wie in Abb. 76, aber für die Übertragung von der Holzbalkendecke mit schwimmendem Estrich (HBD + SE) auf die Holzbalkendecke mit schwimmendem Estrich und abgehängter Unterdecke (HBD + SE + UD).

## 11 Prognose des Installations-Schallpegels

Da messtechnische Voruntersuchungen sehr aufwändig sind und die Nutzung von Messdaten aus vorangehenden Untersuchungen gemäß Abschnitt 10 nur in Ausnahmefällen möglich ist, bleibt bei der Schallschutzplanung von haustechnischen Anlagen häufig nur die Möglichkeit, den zu erwartenden Installations-Schallpegel mittels einer rechnerischen Prognose vorherzubestimmen. Für den Massivbau steht hierzu das in DIN EN 12354-5 beschriebene Berechnungsmodell zur Verfügung. Für den Holz- und Leichtbau ist das Modell zwar nicht anwendbar, dennoch gibt es auch dort die Möglichkeit, den Installations-Schallpegel rechnerisch abzuschätzen. Dies erfolgt, indem man den Teil der DIN EN 12354-5, der im Leichtbau nicht anwendbar ist, durch gemessene Werte ersetzt. Es handelt sich somit um eine Kombination von Berechnung und Messung, wobei allerdings – ebenso wie in DIN EN 12354-5 – auch die für die Berechnung erforderlichen Eingangsdaten letztlich auf Messungen beruhen.

Die rechnerische Prognose des Installations-Schallpegels im Holz- und Leichtbau erfolgt in zwei Schritten (hier ohne Beschränkung der Allgemeinheit am Beispiel einer Duschwanne auf einer Holzbalkendecke dargestellt):

- a) Im ersten Schritt wird die von der Duschwanne in die Decke eingeleitete Körperschall-Leistung  $P_{KS}$  berechnet. Für die Berechnung, die unter Verwendung von Gl. (21) erfolgt, sind folgende Eingangsdaten erforderlich, die vorab messtechnisch ermittelt werden müssen:

- Quellenadmittanz der Duschwanne  $\underline{Y}_Q$  (wenn möglich Real- und Imaginärteil, notfalls ist aber auch der Betrag ausreichend),
  - freie Schnelle der Duschwanne  $|\underline{v}_0|$  (hängt ebenso wie die Quellenadmittanz von der Art der Anregung ab),
  - Eingangsadmittanz der Holzbalkendecke  $\underline{Y}_B$  (Realteil und Betrag).
- b) Im zweiten Schritt wird aus dem Pegel der in die Decke eingeleiteten Körperschall-Leistung,  $L_{W,KS}$ , und dem Körperschalldämm-Maß der Decke,  $R_{KS}$ , nach Gl. (6) der resultierende Installations-Schallpegel berechnet. Das Körperschalldämm-Maß der Decke muss gleichfalls vorab durch Messungen bestimmt werden. Es handelt sich dabei im Prinzip um eine Übertragungsfunktion, die die in die Decke eingeleitete Leistung und den resultierenden Installations-Schallpegel im Empfangsraum miteinander verknüpft. Neben den akustischen Eigenschaften der Decke selbst hängt das Körperschalldämm-Maß deshalb auch von den anderen im Übertragungsweg befindlichen Bauteilen ab. Zur Vereinfachung der Begrifflichkeit spricht man dennoch – analog zum Bau-Schalldämm-Maß  $R'$  für die Luftschalldämmung in DIN 4109 – vom Körperschalldämm-Maß der angeregten Decke, was allerdings zur Folge hat, dass das Körperschalldämm-Maß abhängig von der Lage des Empfangsraum unterschiedliche Werte annehmen kann (siehe Abb. 50).

Wie in Abschnitt 9.3 erläutert wurde, hat man für die Quellenadmittanz vielfach nur den Betrag, nicht aber den Real- und Imaginärteil zu Verfügung. Deshalb muss Gl. (21), die als Grundlage zur Ermittlung der in das angeregte Bauteil eingeleiteten Körperschall-Leistung dient, nochmals vereinfacht werden. Geht man davon aus, dass es sich bei der angeregten Struktur um ein plattenförmiges Bauteil handelt, bei dem der Realteil der Eingangsadmittanz den Imaginärteil deutlich übersteigt ( $\text{Re}\{\underline{Y}_B\} \gg \text{Im}\{\underline{Y}_B\}$ ) und schreibt den Real- und Imaginärteil der Admittanzen in der Formel aus, so geht Gl. (21) in den Ausdruck

$$P_{KS} \cong |\underline{v}_0|^2 \frac{\text{Re}\{\underline{Y}_B\}}{(\text{Re}\{\underline{Y}_B\} + \text{Re}\{\underline{Y}_Q\})^2 + \text{Im}\{\underline{Y}_Q\}^2} \quad (32)$$

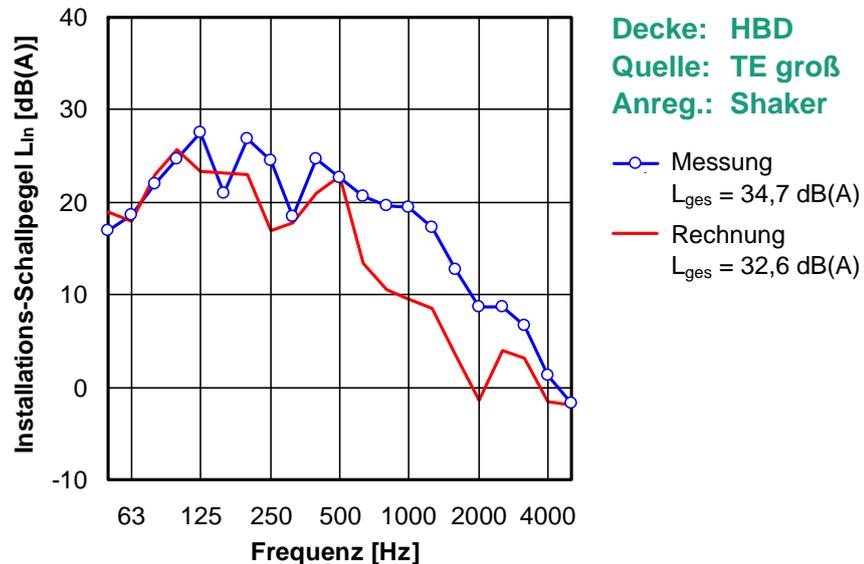
über. Setzt man – in Übereinstimmung mit den Ausführungen in Abschnitt 9.3 – weiterhin voraus, dass es sich bei der Quellenadmittanz um eine überwiegend imaginäre Größe handelt ( $\text{Im}\{\underline{Y}_Q\} \gg \text{Re}\{\underline{Y}_Q\}$ ), erhält man aus der obigen Beziehung die Näherungsformel

$$P_{KS} \cong |\underline{v}_0|^2 \frac{\text{Re}\{\underline{Y}_B\}}{|\underline{Y}_B|^2 + |\underline{Y}_Q|^2}. \quad (33)$$

In Pegelschreibweise ergibt sich hieraus die Beziehung

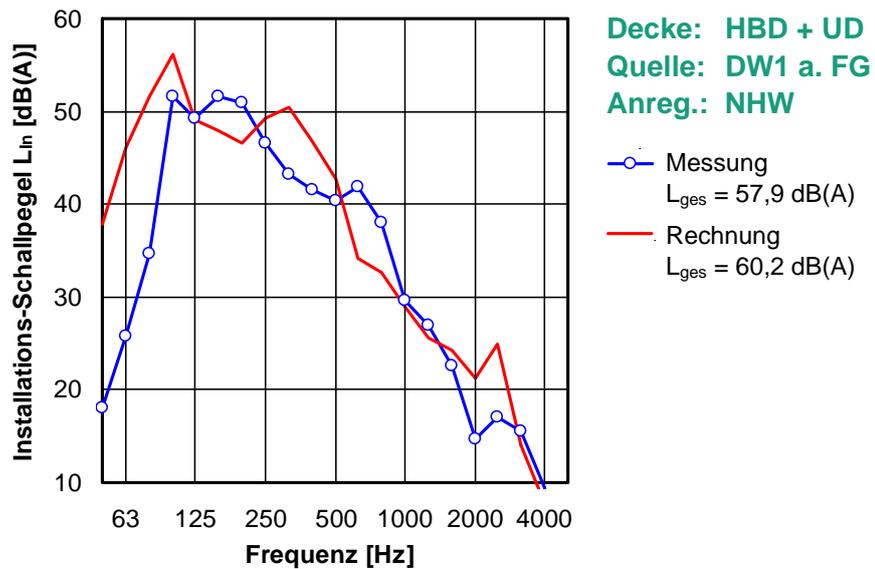
$$L_{W,KS} \cong L_{v0} + 10 \lg \left( \frac{\text{Re}\{\underline{Y}_B\}}{|\underline{Y}_B|^2 + |\underline{Y}_Q|^2} \right) \text{ dB} - 26 \text{ dB}, \quad (34)$$

in der  $L_{v0}$  den Pegel der freien Schnelle bezeichnet und in die die Admittanzen in der Einheit  $m/(Ns) = s/kg$  einzusetzen sind. Bis auf die Konstante von -26 dB entspricht die obige Beziehung der Gl. (8) in DIN EN 15657 [29]. Der Unterschied bei der Konstanten (in DIN EN 15657 beträgt sie -60 dB) ist darauf zurückzuführen, dass in DIN EN 15657 für den Schnellepegel ein Bezugswert von  $10^{-9}$  m/s herangezogen wird, während im vorliegenden Bericht gemäß Tab. 1 der in Deutschland übliche Wert von  $5 \times 10^{-8}$  m/s verwendet wird.



**Abb. 78:** Vergleich zwischen dem berechneten und dem gemessenen Installations-Schallpegel für den 100 cm x 100 cm großen Trockenstrich (TE groß) bei Anregung mit dem Shaker. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Holzbalken-Rohdecke (HBD).

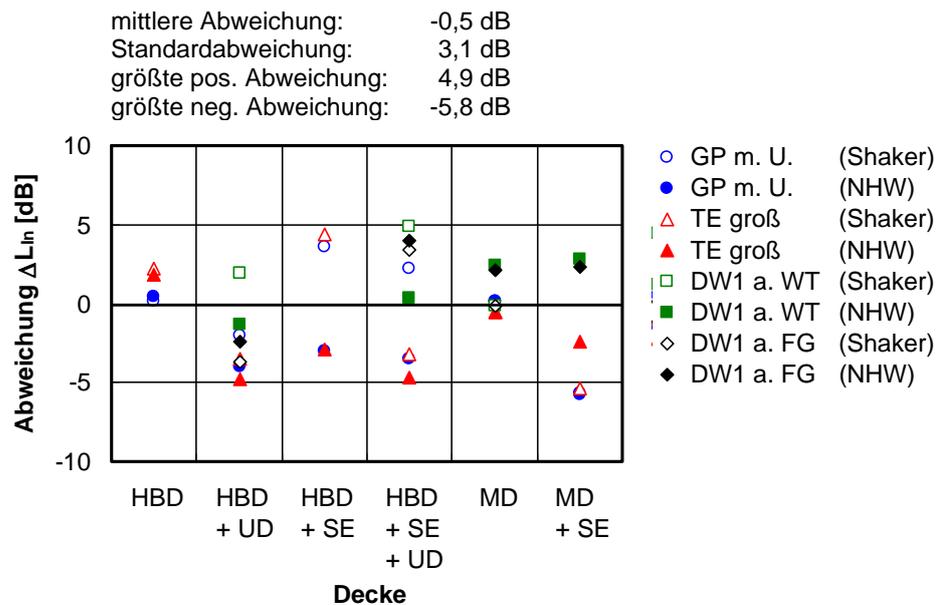
Da alle zur Anwendung von Gl. (34) erforderlichen Eingangsdaten messtechnisch verfügbar sind, kann die Berechnung des Installations-Schallpegel nun erfolgen. Wie üblich wird die Berechnung auch hier frequenzabhängig in Terzen durchgeführt. In Abb. 78 und Abb. 79 sind beispielhaft für zwei verschiedene Körperschallquellen die berechneten Kurven dargestellt. Neben den Berechnungsergebnissen, die jeweils als durchgezogene rote Linie eingezeichnet sind, enthalten die Abbildungen zum Vergleich außerdem auch die zugehörigen Messkurven (Linien mit blauen Punkten). Die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung ist zwar nicht optimal, in Anbetracht der Tatsache, dass die Berechnung auf der Grundlage von vier verschiedenen Messgrößen erfolgte, die alle mit Fehlern behaftet sind, aber insgesamt zufriedenstellend. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die verwendete Berechnungsformel gegenüber dem exakten Modell mehrere Vereinfachungen enthält.



**Abb. 79:** Gleiche Darstellung wie in Abb. 78 aber für die Duschwanne Nr. 1 mit Fußgestell (DW1 a. FG) bei Anregung mit dem Norm-Hammerwerk (NHW). Die Ergebnisse beziehen sich auf die Holzbalkendecke mit abgehängter Unterdecke (HBD + UD).

Natürlich gibt es auch Fälle, in denen die Abweichungen zwischen Messung und Berechnung größer als in den in Abb. 78 und Abb. 79 dargestellten Beispielen ausfallen. Das gilt vor allem bei hohen Frequenzen, wo die ermittelten Messwerte wegen der Beeinträchtigung durch Fremdgeräusche ohnehin eine erhöhte Unsicherheit aufweisen. Andererseits ist für die Schallschutzplanung in der baulichen Praxis weniger das Frequenzspektrum der einwirkenden Installationsgeräusche als vielmehr ihr resultierender Gesamtschallpegel maßgebend. Da der Gesamtpegel vor allem durch die Schallanteile in der unteren Mitte des bauakustischen Frequenzbereichs bestimmt wird, sind die Abweichungen bei hohen Frequenzen für die Gesamtbetrachtung bedeutungslos.

Um zu untersuchen, mit welchen Abweichungen zwischen Messung und Berechnung beim Gesamtschallpegel der Installationsgeräusche in der baulichen Praxis zu rechnen ist, wurden Berechnungen für etwa vierzig verschiedene bauakustische Szenarien (d. h. Kombinationen unterschiedlicher Körperschallquellen und Deckenkonstruktionen) vorgenommen und jeweils mit den vorliegenden Messdaten verglichen. Die hierbei ermittelten Ergebnisse sind in Abb. 80 zusammengefasst. Wie sich aus der oberhalb des Diagramms aufgeführten Statistik entnehmen lässt, beträgt die mittlere Abweichung zwischen Messungen und Rechnung -0,5 dB, während die Standardabweichung einen Wert von 3,1 dB aufweist. Im Vergleich zu dem für die Luft- und Trittschallübertragung verfügbaren Berechnungsmodellen (hier liegt die Standardabweichung zumeist bei etwa 2 bis 2,5 dB) ist das zwar ein wenig schlechter. Da die akustischen Verhältnisse bei der Entstehung und Übertragung von Körperschall jedoch deutlich komplizierter sind, ist die erreichte Berechnungsgenauigkeit als durchaus zufriedenstellend anzusehen. Dies ergibt sich auch aus der zu diesem Thema vorhandenen Literatur [61, 62], zumal sich die durchgeführten Untersuchungen auf Holzbalkendecken bezogen, die im Vergleich zu massiven Decken akustisch schwieriger zu charakterisieren sind.



**Abb. 80:** Abweichung zwischen Messung und Berechnung für den Gesamtschallpegel der Installationsgeräusche (Messwert minus Berechnungsergebnis) für etwa vierzig verschiedene bauakustische Szenarien. Die Untersuchungen umfassten sechs unterschiedliche Decken, die in der Abszisse des Diagramms aufgeführt sind, in Kombination mit acht Körperschallquellen, die in der Legende durch unterschiedliche Symbole gekennzeichnet sind.

## 12 Zusammenfassung

Die von haustechnischen Anlagen hervorgerufenen Geräusche werden häufig als besonders störend wahrgenommen und unterliegen deshalb strengen Schallschutzanforderungen. Während für den Massivbau zahlreiche Messergebnisse und umfangreiche Erfahrungen vorliegen, ist über Installationsgeräusche im Holz- und Leichtbau bislang nur wenig bekannt. Das durchgeführte Forschungsvorhaben verfolgte deshalb vor allem folgende Ziele:

- Aufbau eines bauakustischen Prüfstands für Geräuschmessungen an haustechnische Anlagen unter den im Holz- und Leichtbau üblichen baulichen Verhältnissen,
- Sammlung von praktischen Erfahrungen zur Entstehung und Übertragung von Installationsgeräuschen in Gebäuden in Holz- und Leichtbauweise,
- Untersuchung der akustischen Zusammenhänge zwischen dem Installations-Schallpegel im Massiv- und im Leichtbau,
- Anpassung des akustischen Prognosemodells für haustechnische Anlagen nach DIN EN 12354-5, so dass das Verfahren über den Massivbau hinaus auch im Leichtbau Anwendung finden kann.

Die durchgeführten Untersuchungen erfolgten überwiegend auf messtechnischer Basis, wobei zahlreiche verschiedene Installationen und unterschiedliche bauliche Situationen

betrachtet wurden. Um die Untersuchungen zu vereinfachen und den erforderlichen baulichen Aufwand auf ein vertretbares Maß zu begrenzen, wurde ein Versuchsaufbau verwendet, bei dem eine bauübliche Decke oberseitig durch eine Körperschallquelle angeregt und der resultierende Installations-Schallpegel im Empfangsraum unterhalb der Decke gemessen wurde.

Die durchgeführte Messreihe umfasste sechs verschiedene Decken, unter denen sich vier Holzbalkendecken sowie außerdem – um einen Vergleich zwischen Massiv- und Leichtbau zu ermöglichen – zwei massive Deckenkonstruktionen befanden. Zur Körperschallanregung der Decken wurden sowohl Quellen mit vereinfachtem Aufbau als auch praxisübliche Installationen eingesetzt. Da sie in allen Bauten vorhanden sind und eine häufige Ursache für Lärmbeschwerden bilden, fiel die Wahl bei den praxisüblichen Quellen auf Wasserinstallationen, die in dem Forschungsvorhaben stellvertretend durch Duschwannen und bodenebene Duschflächen repräsentiert werden. Es wurden mehr als dreißig verschiedene Körperschallquellen betrachtet, so dass sich in Kombination mit den sechs untersuchten Decken ein umfangreiches Untersuchungsprogramm ergab, das insgesamt etwa einhundertvierzig Aufbauten umfasste und repräsentative Aussagen zur Entstehung und Übertragung von Installationsgeräuschen im Holz- und Leichtbau ermöglichte.

Die wichtigste Messgröße im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen bildete der von der Körperschallquelle im Empfangsraum unterhalb der Decke erzeugte Installations-Schallpegel. Daneben wurden jedoch noch zahlreiche weitere Messungen durchgeführt, die einerseits zur akustischen Charakterisierung der untersuchten Decken und Körperschallquellen dienten und andererseits die erforderlichen Eingangsdaten zur rechnerischen Prognose des Installations-Schallpegels lieferten. Beispiele hierfür sind die Quellenadmittanz und die freie Schnelle der Körperschallquellen, die Eingangsadmittanz, die Luft- und die Trittschalldämmung der Decken sowie die von der Quelle in die Decke eingeleitete Körperschall-Leistung. Die verwendete Messausrüstung umfasste neben Mikrofonen sowie piezoelektrischen Kraft- und Beschleunigungsaufnehmern auch ein Laser-Doppler-Vibrometer, das die berührungslose und rückwirkungsfreie Messung von Bauteilschwingungen ermöglichte.

Die wichtigsten Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Im Gegensatz zum Massivbau, wo Wasserinstallationen in akustischer Hinsicht normalerweise als Kraftquelle wirken (d. h. bauteilunabhängig immer die gleiche Wechselkraft auf das Bauwerk ausüben), hängt die Kraft und damit auch die eingeleitete Körperschall-Leistung bei Holzbalkendecken in starkem Maße vom Verhältnis zwischen der Quellenadmittanz und der Eingangsadmittanz der Decke ab. Im Vergleich zu massiven Decken weisen übliche Wasserinstallationen in der Regel sehr viel höhere Admittanzen auf. Bei Holzbalkendecken sind die Admittanzen demgegenüber von etwa gleicher Größenordnung, was zur Folge hat, dass hier sehr viel mehr Körperschall in die Decke eingeleitet wird.
- Neben den Admittanzen von Quelle und angeregter Struktur wird der Installations-Schallpegel vor allem vom Körperschalldämm-Maß der Decke bestimmt, das die

Übertragungsfunktion zwischen der in die Decke eingeleiteten Körperschall-Leistung und dem resultierenden Luftschallpegel im Empfangsraum repräsentiert. Wegen ihrer mehrschaligen Bauweise ist das Körperschalldämm-Maß von Holzbalkendecken in der Regel deutlich höher als bei Massivdecken mit vergleichbarer Luftschalldämmung. Da gleichzeitig jedoch erheblich mehr Körperschall in die Decke eingeleitet wird, ergibt sich für den resultierenden Installations-Schallpegel im Holzbau per Saldo zumeist dennoch ein höherer Wert.

- Die üblichen Modelle zur Beschreibung der Körperschallanregung von Bauteilen beziehen sich auf eine punktförmig einwirkende senkrecht zur Bauteiloberfläche gerichtete Wechselkraft. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass sich die vereinfachten Modelle mit einer für die Praxis hinreichenden Genauigkeit auch auf Körperschallquellen mit mehreren Kontaktpunkten sowie mit linienförmigem oder flächigem Kontakt zum Bauwerk anwenden lassen.
- Die aus dem Massivbau für haustechnische Anlagen bekannten Schallschutzmaßnahmen, wie z. B. elastische Verbindungselemente und körperschalldämpfende Beläge, sind auch im Holz- und Leichtbau wirksam. Soweit die Maßnahmen die Quelle selbst betreffen (z. B. beim Anbringen körperschalldämpfender Beläge auf Duschwannen) ist die akustische Wirkung bei beiden Bauweisen weitgehend gleich. Bei elastischer Lagerung der Installation ist hingegen bei leichten mehrschaligen Bauteilen gegenüber massiven Decken und Wänden mit einer – unter Umständen erheblich – verminderten Wirkung zu rechnen.
- Da im Massivbau viele Messergebnisse für Installationsgeräusche vorliegen, wäre es wünschenswert, diese Ergebnisse auf den Leichtbau zu übertragen. Im allgemeinen ist dies jedoch nicht ohne weiteres möglich, da sich die akustischen Eigenschaften der beiden Bauweisen zu stark voneinander unterscheiden. Es gibt allerdings auch Ausnahmen von dieser Regel. Bei den betrachteten Decken ist dies z. B. dann der Fall, wenn die Teile der Konstruktion, die in direktem Kontakt mit der Körperschallquelle stehen, bei beiden Decken übereinstimmen (also z. B. bei einer Massiv- und einer Holzbalkendecke, die über einen baugleichen schwimmenden Estrich verfügen). Ist diese Voraussetzung erfüllt, lässt sich der Installations-Schallpegel den durchgeführten Messungen zufolge unter Verwendung des Norm-Trittschallpegels auf einfache Weise und mit guter Genauigkeit rechnerisch von einer auf die andere Decke übertragen. Das setzt natürlich voraus, dass der Norm-Trittschallpegel beider Decken bekannt ist, was aber in der Praxis für die meisten Decken zutrifft.
- Im Rahmen der baulichen Schallschutzplanung ist es häufig erforderlich, den zu erwartenden Installations-Schallpegel rechnerisch vorherzubestimmen. Im Holz- und Leichtbau bestand dazu bislang keine Möglichkeit, da die DIN EN 12354-5, die ein entsprechendes Berechnungsmodell enthält, nur für Gebäude in Massivbauweise anwendbar ist. Wie aus den ermittelten Untersuchungsergebnissen hervorgeht, besteht jedoch auch im Holzbau die Möglichkeit, Installationsgeräusche vorherzuberechnen. Dies erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird zunächst in Anlehnung an DIN EN 12354-5 die von der Installation in die Decke eingeleitete Körperschall-Leistung berechnet. Der zweite Schritt, der die Schallübertragung von der angeregten Decke in den Empfangsraum umfasst, liefert den resultierenden In-

Installations-Schallpegel. Da sich die Schallausbreitung im Holz- und Leichtbau mit der DIN EN 12354-5 nicht berechnen lässt, wird hierzu ersatzweise auf eine gemessene Übertragungsfunktion – das schon erwähnte Körperschalldämm-Maß – zurückgegriffen. Bei dem beschriebenen Verfahren handelt es sich somit um eine Kombination von Berechnung und Messung.

- Bei der Prognose des Installations-Schallpegels mit dem obigen Verfahrens beträgt der Unterschied zwischen dem gemessenen und dem berechneten Ergebnis bezogen auf den Gesamtschallpegel der Installationsgeräusche im Mittel etwa 3 dB (Standardabweichung zwischen Messungen und Rechnung). Das ist etwas mehr als bei den meisten anderen bauakustischen Berechnungsmodellen, im Hinblick auf die komplizierten akustischen Verhältnisse im Holz- und Leichtbau aber als durchaus zufriedenstellend anzusehen. Ein Nachteil besteht allerdings darin, dass für die Berechnung vier verschiedene Eingangswerte benötigt werden: die Quellenadmittanz und die freie Schnelle der Installation sowie die Eingangsadmittanz und das Körperschalldämm-Maß der Decke. Alle vier Werte müssen messtechnisch ermittelt werden, was einen beträchtlichen Aufwand erfordert, zumal dazu bislang kaum Erfahrungen vorliegen. Vor der Anwendung des Prognoseverfahrens in der baulichen Praxis ist es daher erforderlich, weitere Erfahrungen zu sammeln und Messdaten zur akustischen Charakterisierung von Installationen und Decken zusammenzutragen. Einen ersten Schritt hierzu bildet ein kürzlich abgeschlossenes Forschungsvorhaben des ift Rosenheim, das sich mit den Übertragungsfunktionen in Gebäuden in Holzbauweise beschäftigt.

Mit dem durchgeführten Forschungsvorhaben konnte der Kenntnisstand zur Entstehung und Übertragung von Installationsgeräuschen im Holz- und Leichtbau beträchtlich erweitert werden. Die an unterschiedlichen gebäudetechnischen Installationen und Deckenkonstruktionen durchgeführten messtechnischen Untersuchungen tragen zum verbesserten Verständnis der akustischen Zusammenhänge und der Wechselwirkung zwischen Körperschallquelle und angeregter Struktur bei. Außerdem wurde erstmals die Möglichkeit geschaffen, Installationsgeräusche in Gebäuden in Holz- und Leichtbauweise unter praxisnahen Bedingungen rechnerisch vorherzubestimmen. Dies verbessert die akustische Planungssicherheit erheblich und ermöglicht überdies die zielgerichtete Dimensionierung der erforderlichen Schallschutzmaßnahmen.

Teile der ermittelten Untersuchungsergebnisse, wie z. B. die Übertragung des Installations-Schallpegels auf andere Deckenkonstruktionen unter Verwendung des gemessenen Norm-Trittschallpegels, können nach Veröffentlichung der Resultate direkt in der Praxis angewendet werden (z. B. in der bauakustischen Planung oder bei der Auslegung von Schallschutzmaßnahmen). Bei anderen Ergebnissen sind vor der praktischen Umsetzung zunächst noch weitere Untersuchungen erforderlich. Dies betrifft beispielsweise die Vorherberechnung von Installationsgeräuschen im Holz- und Leichtbau, für die zwar ein geeignetes Berechnungsverfahren bereitgestellt wurde, die erforderliche Datengrundlage zur praktischen Durchführung der Berechnungen aber zu einem großen Teil erst noch geschaffen werden muss (z. B. in Form eines akustischen Bauteilkataloges für haustechnische Anlagen).

Die Forschungsergebnisse sollen demnächst im Rahmen des Akustik-Forums Raum und Bau der Fachöffentlichkeit vorgestellt und anschließend in der Zeitschrift TrockenBau Akustik publiziert werden. Teile der Ergebnisse wurden vor kurzem schon auf der Deutschen Jahrestagung für Akustik (DAGA) präsentiert. Derzeit ist nicht vorgesehen, die Ergebnisse in die bauakustische Normung einzubringen, da die verwendeten Berechnungsformeln größtenteils der DIN EN 12354-5 und der DIN EN 15657 entstammen und somit bereits in der vorhandenen Normung enthalten sind.

## 13 Verwendung der Forschungsmittel

Die vom BBSR zur Verfügung gestellten Forschungsmittel wurden sparsam und ausschließlich für den vorgesehenen Verwendungszweck eingesetzt. Hinsichtlich des Umfangs und der Durchführung entsprachen die messtechnischen Untersuchungen im Wesentlichen der vorgesehenen und im Forschungsantrag beschriebenen Vorgehensweise (Die Messungen erfolgten in hierfür angepassten bauakustischen Prüfständen im IBP). Die erforderlichen baulichen Maßnahmen, wie z. B. Umbauten an den Prüfständen und Versuchseinrichtungen sowie der Ein- und Ausbau der untersuchten Installationen, wurden auf das notwendige Maß beschränkt und soweit möglich von den beteiligten Industriepartnern übernommen. Um den erforderlichen Zeitaufwand zur Vorbereitung und Auswertung der akustischen Untersuchungen zu verringern, erfolgen die Messungen in zusammenhängenden zeitlichen Blöcken.

Alle angefallenen Ausgaben – sowohl Sachmittel als auch Personalkosten – waren zur Erreichung des Forschungszieles notwendig und bewegten sich innerhalb des hierfür erforderlichen und angemessenen Rahmens. Die verwendeten Sachmittel dienten ausschließlich zur Herstellung und Umgestaltung von Prüfgegenständen sowie der Beschaffung des benötigten Verbrauchsmaterials. Investitionen in Einrichtungen, die nach Abschluss des durchgeführten Forschungsvorhabens weiter genutzt werden können, wurden nicht getätigt.

Die angestrebten Ziele des Forschungsvorhabens wurden in vollem Umfang erreicht. Das gilt insbesondere für das verbesserte Verständnis der akustischen Wechselwirkung zwischen Quelle und angeregter Struktur und die Übertragung von Messergebnissen vom Massiv- auf den Leichtbau. Außerdem wurde erstmals die Möglichkeit geschaffen, den Installations-Schallpegel in Gebäuden in Holz- und Leichtbauweise rechnerisch vorherzubestimmen. Damit trägt das Vorhaben maßgeblich zur Erweiterung des Kenntnisstandes und zur Verbesserung der akustischen Planungssicherheit im Bereich des Holz- und Leichtbaus bei.

## 14 Literatur

- [1] DIN 4109-1: Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen (2018).
- [2] VDI 4100: Schallschutz im Hochbau - Wohnungen - Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz (2012).

- [3] DIN EN 12354-5: Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 5: Installationsgeräusche (2009).
- [4] DIN EN 12354-5 Berichtigung 1: Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 5: Installationsgeräusche, Berichtigung 1(2019).
- [5] DIN EN ISO 10140-5: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen (2014).
- [6] SIA 181: Schallschutz im Hochbau (Schweizer Norm SN 520 181, 2006).
- [7] Schanda, U.; Mayr, A. R.; Schöpfer, F.: Übertragungsfunktionen im Holzbau - Prognose der Schallübertragung aus haustechnischen Anlagen mit einem tabellarischen, praxistauglichen Ingenieursersatzverfahren. ift Rosenheim, Forschungsvorhaben im Auftrag des BBSR, Forschungsinitiative Zukunft Bau (2018).
- [8] Webseite der akkreditierten bauakustischen Prüfstelle im Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Bereich Installationen: [www.pruefstellen.ibp.fraunhofer.de/de/akkreditierte-prueflabore/bauakustik/installationen.html](http://www.pruefstellen.ibp.fraunhofer.de/de/akkreditierte-prueflabore/bauakustik/installationen.html) (2019).
- [9] Voigtsberger, C. A.; Gösele, K.: Der Einfluss der Bauart und der Grundrissgestaltung auf das entstehende Installationsgeräusch in Bauten. Forschungsbericht, Bau- und Wohnforschung, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (1979).
- [10] Sohn, M.; Fischer, H. M.; Veres, E., Gertis, K. A.: Installationsgeräusche bei der Altbauanierung. Forschungsbericht, Bau- und Wohnforschung, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (1991).
- [11] Sohn, M.; Fischer H. M.: Installationsgeräusche im Fertighausbau - Phase I. Forschungsbericht, Bau- und Wohnforschung, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (1995).
- [12] Gösele, K.: Schalldämmende Installationswände - Neue Wege zur Verringerung der Installationsgeräusche. Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Fraunhofer IRB Verlag (1998).
- [13] Weber, L.; Mohr, J.: Measurement of waste water noise according to EN 14366. DAGA 2004, Tagungs-CD, S. 477 - 478.
- [14] Weber, L.; Efinger, S.: Wie laut sind Billig-Armaturen? IKZ-Haustechnik, Heft 11/2004, S. 22 - 24.
- [15] Teller, P.; Weber, L.; Mohr, J.: Das Körperschallgeräuschnormal als standardisierte Schallquelle zur Messung von Installationsgeräuschen. DAGA 2005, Tagungs-CD, S. 485 - 486.
- [16] Weber, L.; Teller, P.: Lärmbelästigung vermeiden - Woran man geräuscharme Bade- und Duschwannen erkennt. IKZ-Haustechnik, H. 20 (2005), S. 30 - 33.
- [17] Mohr, J.; Weber, L.; Teller, P.: Der Pendelfallhammer nach SIA 181 im Vergleich zu anderen Körperschallquellen. DAGA 2006, Tagungs-CD, S. 729 - 730.
- [18] Ebersold, M.: Trennung von Körperschall- und Luftschallübertragung bei haustechnischen Anlagen. Diplomarbeit, Fachhochschule OOW Oldenburg und IBP (2008).

- [19] Öhler, S.; Bitzer, N.; Weber, L.: Geräuschverhalten von Handbrausen. DAGA 2010, Tagungs-CD, S. 367 - 368.
- [20] Weber, L.; Öhler, S.: Schallschutznachweis bei Sanitärinstallationen. Der Bausachverständige, Jg.6, Nr.6, S. 26 - 30 (2010).
- [21] Öhler, S.; Weber, L.: Leise duschen in der Ebene - Bodenebene Duschelemente. TrockenBau Akustik, H. 11.2010, S. 39 - 42.
- [22] Spiegel, Clarissa: Körperschallübertragung von Silikonfugen im Sanitärbereich - Einfluss von Geometrie und Material. B.Sc. Thesis, Universität Stuttgart und IBP (2011).
- [23] Lemke, D.: Akustische Kennzeichnung und Optimierung von Rohrschellen. B. Sc. Thesis, Hochschule für Technik Stuttgart und IBP (2014).
- [24] Weber, L.; Mohr, J.; Öhler, S.: Bitte nicht stören! Schallschutz bei Abwassersystemen: Hinweise für Planung und Praxis. IKZ-Haustechnik 10/2015, S. 20 - 25.
- [25] Öhler, S.; Weber, L.; Mohr, J.; Kaltbeitzel, B.: Lauschangriff im Bad - Schallschutz bei Vorwandinstallationen. IKZ-Haustechnik 17/2017, S. 28 - 21.
- [26] Öhler, S.: Messung der charakteristischen Körperschall-Leistung von Sanitärinstallationen in einem Musterbau. M.Sc. Thesis, Universität Stuttgart und IBP (2013)
- [27] Öhler, S.; Weber, L.: Bestimmung der charakteristischen Körperschall-Leistung von Sanitärinstallationen durch Luftschallmessungen in einem Musterbau. DAGA 2014, Tagungs-CD, S. 258 - 259.
- [28] Schibilla, G.: Validierung des Prognoseverfahrens für Installationsgeräusche nach DIN EN 12354-5 am Beispiel des Installationsprüfstandes im Fraunhofer-Institut für Bauphysik, M.Sc. Thesis, Universität Stuttgart und IBP (2010).
- [29] DIN EN 15657: Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden - Messung des Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand für alle Installationsbedingungen (2017).
- [30] Mondot, J. M.; Petersson, B. A. T.: Characterization of structure-borne sound sources: The Source Descriptor and The Coupling Function. Journal of Sound and Vibration 114 (3) (1987), S. 507 - 518.
- [31] Moorhouse, A. T.; Gibbs, B. M.: Prediction of the structure-borne noise emission of machines: Development of a methodology. J. Sound Vib. 167 (2) (1993), S. 223 - 237.
- [32] Jianxin, S.; Moorhouse, A. T.; Gibbs, B. M.: Towards a practical characterization for structure-borne sound sources based on mobility techniques. Journal of Sound and Vibration 185 (4) (1995), S. 737 - 741.
- [33] Yap, S. H.; Gibbs, B. M.: Structure-borne sound transmission from machines in buildings, Part 2: Indirect measurement of force and moment at the machine-receiver interface of a single point connected system by a reciprocal method. J. Sound Vib. 222 (1) (1999), S. 99 - 113.
- [34] Petersson, B. A. T.; Gibbs, B. M.: Towards a structure-borne sound source characterization. Applied Acoustics 61 (2000), S. 325 - 343.

- [35] Moorhouse, A. T.: On the characteristic power of structure-borne sound sources. *J. Sound Vib.* 248 (3) (2001), S. 441 - 459.
- [36] Späh, M.: Characterisation of structure-borne sound sources in buildings. Ph.D. Thesis, University of Liverpool, 2006.
- [37] Gibbs, B. M.; Qi, N.; Moorhouse, A. T.: A Practical Characterisation for Vibro-Acoustic Sources in Buildings. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 93, Nr. 1,, S.. 84 - 93 (2007).
- [38] Späh, M.; Gibbs, B. M.: Reception plate method for characterization of structure-borne sources in buildings: Assumptions and application. *Appl. Acoust.* 70 (2009), S. 361 - 368.
- [39] Späh, M.; Gibbs, B. M.: Reception plate method for characterization of structure-borne sources in buildings: Installed power and sound pressure from laboratory data. *Appl. Acoust.* 70 (2009), S. 1431 - 1439.
- [40] Moorhouse, A. T.; Elliott, A. S.; Evans, T. A.: In situ measurement of the blocked force of structure-borne sound sources. *J. Sound Vib.* 325 (2009), S. 679 - 685.
- [41] Bonhoff, H. A.; Petersson, B. A. T.: The influence of cross-order terms in interface mobilities for structure-borne sound source characterization: Frame-like structures. *Journal of Sound and Vibration* 319 (2009), S. 305 - 319.
- [42] Bonhoff, H. A.; Petersson, B. A. T.: The influence of cross-order terms in interface mobilities for structure-borne sound source characterization. *Journal of Sound and Vibration* 329 (2010), S. 3280 - 3303.
- [43] Höller, C.: Indirect methods of obtaining activity and mobility of structure-borne sound sources. Ph.D. Thesis, University of Liverpool (2013).
- [44] Höller, C.; Gibbs, B. M.: Indirect determination of the mobility of structure-borne sound sources. *Journal of Sound and Vibration* 344 (2015), S. 38 - 58.
- [45] Höller, C.; Gibbs, B. M.: Source substitution method for obtaining the power transmission from vibrating sources in buildings. *Applied Acoustics* 141 (2018), S. 240 - 249.
- [46] Vercammen, M. L. S.; Heringa, P. H.: Characterising Structure-borne Sound from Domestic Appliances. *Applied Acoustics* 28 (1989), S. 105 - 117.
- [47] Janssens, M. H. A.; Verheij, J. W.: A pseudo-forces methodology to be used in characterization of structure-borne sound sources. *Applied Acoustics* 61 (2000), S. 285 - 308.
- [48] Janssens, M. H. A.; Verheij, J. W.; Loyau, T.: Experimental example of the pseudo-forces method used in characterisation of a structure-borne sound source. *Applied Acoustics* 63 (2002), S. 9 - 34.
- [49] Lennström, D.; Olsson, M.; Wullens, F.; Nykänen, A.: Validation of the blocked force method for various boundary conditions for automotive source characterization. *Applied Acoustics* 102 (2016), S. 108 - 119.

- [50] Vogel, A.; Wittstock, V.; Kornadt, O.: Charakterisierung von Körperschallquellen - Tauglichkeit der regulären Quellgrößen zur Anwendung der Körperschallprognose in plattenförmige Strukturen. DAGA 2011, Tagungs-CD, S. 389 - 390.
- [51] Vogel, A.; Kornadt, O.; Wittstock, V.; Scholl, W.: Anwendung des Zwei-Plattenverfahrens zur Leistungsprognose verschiedener Körperschallquellen. DAGA 2014, Tagungs-CD, S. 256 - 257.
- [53] Rabold, A.; Kollmannsberger, S.; Rank, E.: Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten, Teil 1: Luft -und Trittschallberechnung auf Basis der Finite Elemente Methode. DAGA 2014, Tagungs-CD, S. 242 - 243.
- [54] Fischer, I.; Scheck, J.; Zeitler, B.: Charakterisierung von Klimageräten als Körperschallquellen. DAGA 2018, Tagungs-CD, S. 671 - 674.
- [55] Scholl, W.: About a Test Facility for Installation Noise in Wooden Houses. Forum Acusticum Budapest, Tagungs-CD, S. 1977 - 1981 (2005).
- [56] Fulford, R. A.; Gibbs, B. M.: Structure-borne sound power and source characterisation in multi-point-connected systems. Part 1: case studies for assumed force distribution. *Journal of Sound and Vibration* 204 (1997), S. 659 - 677.
- [57] Yap, S. H.: The role of moments and forces in structure-borne sound emission from machines in buildings. Ph.D. Thesis, University of Liverpool (1998).
- [58] Fulford, R. A.; Gibbs, B. M.: Structure-borne sound power and source characterisation in multi-point-connected systems. Part 2: general relationships for mobility functions and free velocities. *Journal of Sound and Vibration* 220 (1) (1999), S. 203 - 224.
- [59] Fulford, R. A.; Gibbs, B. M.: Structure-borne sound power and source characterisation in multi-point-connected systems. Part 3: force ratio estimates. *Journal of Sound and Vibration* 225 (2) (1999), S. 239 - 282.
- [60] Mayr, A. R.; Gibbs, B. M.: Single Equivalent Approximation for Multiple Contact Structure-Borne Sound Sources in Buildings. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 98, Nr. 3, S. 402 - 410 (2012).
- [61] Wittstock, V.; Bietz, H.: Unsicherheitsbudget für Installationsgeräusche nach DIN 4109 "Schallschutz im Hochbau". Forschungsbericht, Bauforschung, Band T 3279, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (2012).
- [62] Gibbs, B. M.: Uncertainties in predicting structure-borne sound power input into buildings. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 133, H. 5 (2013), S. 2678 - 2689.
- [63] Wassilieff, C.; Dravitzki, V.: Prediction of Noise from Plumbing Attached to Light Timber-Framed Walls. *Applied Acoustics* 37 (1992), S. 213 - 232.
- [64] Craik, R. J. M.; Galbrun, L.: Vibration transmission through a frame typical of timber-framed buildings. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 281, H. 3 (2005), S. 763 - 782.
- [65] Hinze, R.: Wasserinstallationsgeräusche im Holzhausbau. *Holzbau Die Neue Quadriga*, Nr. 4 (2007), S. 49 - 52.

- [66] Kling, C.; Wittstock, V.; Bietz, H.: Studie zur Anwendbarkeit des Prognoseverfahrens nach prEN 12354-5 und damit zusammenhängender Labormessverfahren (CEN TC 126 / WG 7) im Leichtbau. Forschungsbericht, Bau- und Wohnforschung, Band F 2518, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (2008).
- [67] Mayr, R. A.: Vibro-acoustic sources in lightweight buildings. Ph.D. Thesis, University of Liverpool (2009).
- [68] Bietz, H.; Wittstock, V.: Schalleinleitung und Schallausbreitung in Leichtbaustrukturen. DAGA 2011, Tagungs-CD, S. 95 - 96.
- [69] Arnold, J.; Bietz, H.; Kornadt, O.: Charakterisierung von Gebäuden mittels Übertragungsfunktionen. DAGA 2012, Tagungs-CD, S. 459 - 460.
- [70] Mayr, A. R.; Gibbs, B. M.: Approximate method for obtaining source quantities for calculation of structure-borne sound transmission into lightweight buildings. Applied Acoustics 110 (2016), S. 81 - 90.
- [71] Schöpfer, F.; Hopkins, C.; Mayr, A. R.; Schanda, U.: Measurement of transmission functions in lightweight buildings for the prediction of structure-borne sound transmission from machinery. Acta Acustica united with Acustica, Vol. 103, Nr. 3 (2017), S. 451 - 464.
- [72] Schöpfer, F.; Hopkins, C.; Mayr, A. R.; Schanda, U.: Ansätze zur Prognose des Installationspegels im Holz-Leichtbau. DAGA 2017, Tagungs-CD, S. 509 - 513.
- [73] Zeitler, B.; Schneider, M.: Einfluss der Quellimpedanz auf die Trittschalldämmung bei tiefen Frequenzen. DAGA 2018, Tagungs-CD, S. 1464 - 1467.
- [74] Schöpfer, F.; Mayr, A. R.; Schanda, U.: Übertragungsfunktionen im Holzbau. DAGA 2018, Tagungs-CD, S. 150 - 153.
- [75] Mayr, A. R.; Schöpfer, F.; Schanda, U.: Measurement and prediction of structure-borne sound transmission from machinery in timber-frame buildings. Euronoise 2018, Tagungs-CD, S. 1641 - 1645.
- [76] DIN 4109-4: Schallschutz im Hochbau - Teil 4: Bauakustische Prüfungen (2016).
- [77] DIN EN ISO 10052: Akustik - Messung der Luftschalldämmung und Trittschalldämmung und des Schalls von haustechnischen Anlagen in Gebäuden - Kurzverfahren (2010).
- [78] DIN EN ISO 717-1: Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 1: Luftschalldämmung (2013).
- [79] DIN EN ISO 10140-3: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 3: Messung der Trittschalldämmung (2015).
- [80] DIN EN ISO 16283-2: Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 2: Trittschalldämmung (2018).
- [81] DIN EN ISO 10140-4: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 4: Messverfahren und Anforderungen (2010).
- [82] DIN EN ISO 10140-1: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 1: Anwendungsregeln für bestimmte Produkte (2016).

- [83] DIN EN ISO 717-2: Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 2: Trittschalldämmung (2013).
- [84] Weber, L., Koch, S.: Anwendung von Spektrum-Anpassungswerten, Teil 1: Luftschalldämmung, Teil 2: Trittschalldämmung (Teile A und B). Bauphysik 21 (1999) H. 4, S. 167 - 170 und H. 6, S. 295 - 299 sowie Bauphysik 22 (2000) H. 1, S. 70 - 72.
- [85] DIN EN ISO 3822-1: Akustik - Prüfung des Geräuschverhaltens von Armaturen und Geräten der Wasserinstallation im Laboratorium - Teil 1: Messverfahren (2009).
- [86] Häberle, M.: Installationsgeräusche im Leichtbau. B. Sc. Thesis, Hochschule für Technik Stuttgart und IBP (2017).
- [87] DIN EN ISO 10140-2: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 2: Messung der Luftschalldämmung (2010).
- [88] DIN 4109-36: Schallschutz im Hochbau - Teil 36: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Gebäudetechnische Anlagen (2016).
- [89] DIN EN ISO 16032: Akustik - Messung des Schalldruckpegels von haustechnischen Anlagen in Gebäuden - Standardverfahren (2004).
- [90] DIN 52221: Bauakustische Prüfungen - Körperschallmessungen bei haustechnischen Anlagen (2006).
- [91] DIN EN 14366: Messung der Geräusche von Abwasserinstallationen im Prüfstand (2005).

## 15 Danksagung

Wir bedanken uns beim Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) für die finanzielle Förderung und fachliche Begleitung des durchgeführten Forschungsvorhabens. Unser Dank gilt außerdem

- den an dem Forschungsvorhaben beteiligten Industriepartnern (der Kunststofftechnik SCHEDEL GmbH und der poresta systems GmbH) für die Unterstützung des Vorhabens, insbesondere die Bereitstellung von Prüfmustern, den Einbau der untersuchten Duschflächen und -wannen in die bauakustischen Prüfstände des IBP, die anwendungstechnische Beratung sowie die Beteiligung an der Versuchsplanung,
- Herrn Maximilian Häberle und Frau Jasmin Amann für die Mitwirkung und wertvolle Unterstützung bei einem großen Teil der durchgeführten Messungen,
- Herrn Michael Höhn und Herrn Thomas Gräber für die gewissenhafte und sorgfältige Durchführung vieler handwerklicher Arbeiten.