

Berücksichtigung von Unsicherheiten beim Trittschall in der neuen DIN 4109

T 3238

T 3238

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2010

ISBN 978-3-8167-8339-8

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

www.baufachinformation.de

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Braunschweig und Berlin



Bericht

Report

Volker Wittstock

Werner Scholl

Berücksichtigung von Unsicherheiten beim Trittschall in der neuen DIN 4109

Kurztitel:

DIN 4109: Trittschallunsicherheit – Labor- und Baumessungen

gefördert vom:

Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt)

Braunschweig, 2010-03-31

Inhalt

| | |
|---|-----------|
| 1. EINLEITUNG | 3 |
| 2. BEHANDLUNG VON UNSICHERHEITEN | 3 |
| 3. VORLIEGENDE KENNTNISSE ÜBER UNSICHERHEITEN BEIM TRITTSCHALL | 4 |
| 4. AUSWERTUNG VON RINGVERSUCHEN | 5 |
| 4.1 VERWENDETE MESSDATEN..... | 5 |
| 4.2 AUSWERTUNG | 9 |
| 4.3 SPEKTRALE ERGEBNISSE | 10 |
| 4.4 ERGEBNISSE FÜR EINZAHLWERTE | 14 |
| 4.5 LUFT- UND TRITTSCHALLUNSICHERHEITEN IM VERGLEICH..... | 16 |
| 4.6 KORRELATIONSEFFEKTE | 18 |
| 5. UNSICHERHEITSBEITRÄGE DURCH DAS HAMMERWERK | 20 |
| 5.1 MODELLIERUNG DES HAMMERWERKS ALS KÖRPERSCHALLQUELLE..... | 20 |
| 5.2 BESTIMMUNG DER QUELLKRAFT DES HAMMERWERKS UND IHRER UNSICHERHEIT . | 22 |
| 5.3 EMITTIERTES SPEKTRUM | 26 |
| 5.4 UNSICHERHEIT DER EINGESPEISTEN LEISTUNG..... | 30 |
| 6. MODELLMESSUNGEN | 31 |
| 6.1 MOTIVATION | 31 |
| 6.2 SKALIERUNGSGESETZE FÜR LUFT- UND KÖRPERSCHALL | 31 |
| 6.3 REALISIERUNG EINES TRITTSCHALL – MODELLPRÜFSTANDS | 36 |
| 6.4 VERWENDETE ANREGUNG | 40 |
| 6.5 TEST AUF WIEDERHOLBARKEIT | 42 |
| 6.6 ERGEBNISSE | 43 |
| 7. UNSICHERHEITEN BEI DER PROGNOSE | 47 |
| 7.1 PROGNOSEVERFAHREN | 47 |
| 7.2 ZUR UNSICHERHEIT DER EINGANGSWERTE | 47 |
| 7.3 UNSICHERHEIT DURCH RECHNUNG MIT EINZAHLWERTEN..... | 49 |
| 7.4 VERGLEICH ZWISCHEN PROGNOTIZIERTEN UND GEMESSENEN BEWERTETEN NORM-TRITTSCHALLPEGELN | 51 |
| 7.5 VORSCHLÄGE FÜR DIE UNSICHERHEIT BEI DER TRITTSCHALL-PROGNOSE | 54 |
| 8. ZUSAMMENFASSUNG | 57 |
| DANKSAGUNG | 58 |
| LITERATUR | 59 |

1. Einleitung

Die Überarbeitung der DIN 4109 erfordert Kenntnisse über die Trittschallpegel verschiedener Bauteiltypen und die mit diesen Werten verbundenen Unsicherheiten. Letztere sind dabei für die Bauakustik, ebenso wie für alle anderen technischen Disziplinen, von zentraler Bedeutung. Ob z.B. ein Bauteiltyp einer Spezifikation oder Anforderung genügt, kann nicht durch die Ermittlung eines Messwertes allein sondern nur unter Berücksichtigung der zugehörigen Messunsicherheit sowie der Bauteilstreuungen beurteilt werden. Für die Überarbeitung der DIN 4109 sind somit Kenntnisse über die Unsicherheit unerlässlich.

Der vorliegende Bericht bildet den Abschluss eines Projekts, in dessen Rahmen die Unsicherheiten beim Trittschall systematisch untersucht werden sollten. Im ersten Teilprojekt „Unsicherheiten bei der messtechnischen Beurteilung von Bauteilen und Gebäuden“ liegt der Fokus auf der Auswertung vorhandener Ringversuchsergebnisse und der Ermittlung der Unsicherheiten, die mit der Verwendung des Trittschall-Hammerwerks verbunden sind. Der zweite Teil „Unsicherheiten bei der Übertragung von Laborergebnissen auf reale Gebäude und bei der Prognoserechnung“ behandelt den Einfluss geometrischer Parameter auf den Normtrittschallpegel, der anhand von Modellmessungen untersucht wurde, sowie die Unsicherheit bei der Prognose.

2. Behandlung von Unsicherheiten

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Unsicherheiten von Kenngrößen zu ermitteln. Die heute bevorzugte Methode ist im [GUM] beschrieben. Ausgangspunkt für eine Unsicherheitsanalyse ist die Definition der Kenngröße. Daraus wird eine Modellfunktion abgeleitet, die die gesuchte Kenngröße Y als Funktion verschiedener Eingangsgrößen X_i ausdrückt. Formal geschieht dies durch eine Funktion f

$$Y = f(X_i) \quad (1)$$

Sowohl die gesuchte Kenngröße als auch die Eingangsgrößen werden als Zufallvariablen betrachtet, die bestimmten Verteilungen unterliegen. Der beste Schätzer oder der Erwartungswert der Kenngröße y wird aus den Schätzern der Eingangsgrößen x_1, x_2, \dots ermittelt. Unter Vernachlässigung von Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen wird die kombinierte Standardunsicherheit der gesuchten Kenngröße aus

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2} \quad (2)$$

berechnet, wobei $u(x_i)$ die Standardunsicherheiten der Eingangsgrößen sind. Die Sensitivitätskoeffizienten c_i werden aus den partiellen Ableitungen der Funktion f nach den Argumenten X_i berechnet

$$c_i = \left. \frac{\partial f}{\partial X_i} \right|_{x_i} \quad (3)$$

Die Anwendung dieser Methode zur Ermittlung der Unsicherheit erfordert ein mathematisches Modell, das alle wesentlichen Effekte beinhaltet. Für die Bauakustik

konnten solche vollständigen Modelle bislang nicht aufgestellt werden, so dass Unsicherheiten in der Bauakustik üblicherweise auf einem anderen Weg ermittelt werden.

Dazu wird davon ausgegangen, dass die gesuchte Kenngröße implizit durch eine Prozedur, z.B. eine Messnorm definiert ist. Aus dieser Definition folgt, dass alle Ergebnisse, die nach der Vorschrift erzielt wurden, gültige Realisierungen der Kenngröße sind. Die Unsicherheit der Kenngröße wird dann üblicherweise durch eine Standardabweichung abgeschätzt, die für definierte Versuchsbedingungen gültig ist (Tabelle 1). Zu unterscheiden sind Wiederhol-, In-situ- und Vergleichsbedingungen. Zur Ermittlung der Vergleichs-Standardabweichung werden Ringversuche durchgeführt, bei denen Versuchsobjekte in verschiedenen Laboratorien vermessen werden oder bei denen verschiedene Messteams am selben Ort Messungen durchführen. Die Auswertung erfolgt dann üblicherweise nach [DIN EN ISO 5725-2].

Tabelle 1 Versuchsbedingungen für Ringversuche

| | σ | Umgebung | Messgeräte | Personal | Zeitdifferenz |
|-----------------------|-----------------|----------|------------|----------|---------------|
| Wiederholbedingungen | σ_r | = | = | = | klein |
| In-situ Bedingungen | σ_{situ} | = | ≠ | ≠ | |
| Vergleichsbedingungen | σ_R | ≠ | ≠ | ≠ | |

3. Vorliegende Kenntnisse über Unsicherheiten beim Trittschall

In der aktuellen Version der [DIN EN ISO 140-2] sind Zahlenwerte für die Vergleichsgrenze R und die Wiederholgrenze r für die Ermittlung von Norm-Trittschallpegeln und von Trittschallminderungen angegeben. Diese Grenzen sind ihrem Wesen nach kritische Differenzen zwischen zwei Einzelwerten, die mit einer statistischen Sicherheit von 95 % nicht überschritten werden. Sie stehen mit den zugehörigen Standardabweichungen in folgendem Zusammenhang

$$r = 2\sqrt{2} \sigma_r; \quad R = 2\sqrt{2} \sigma_R . \quad (4)$$

Bei der Vergleichsgrenze wird in [DIN EN ISO 140-2] zwischen Messungen in Laboratorien und Baumessungen unterschieden. Die Wiederholgrenze wird nur für Labormessungen angegeben. Die Angaben in [DIN EN ISO 140-2] wurden aus kleinen Datenmengen abgeleitet. Die Wiederholgrenze für die Norm-Trittschallpegel z.B. beruht auf Wiederholungsmessungen an einer 12 cm dicken Betondecke in einem einzigen Labor. Die Wiederholgrenze für Trittschallminderungen basiert auf Messungen an einem PVC-Belag in vier verschiedenen Laboratorien. Die Vergleichsgrenze für den Norm-Trittschallpegel wurde aus den Vergleichsmessungen an der PTB abgeleitet, wobei hier anzumerken ist, dass es sich bei diesen Messungen um Messungen unter in-situ Bedingungen handelt. Die Vergleichsgrenze für Trittschallminderungen wurde aus Messungen an einem PVC-Belag abgeleitet. Damit ist die Datenbasis für die Werte in der aktuellen [DIN EN ISO 140-2] äußerst klein, so dass eine Erweiterung dringend geboten ist.

In der aktuellen [DIN 4109] werden die einzelnen Unsicherheitskomponenten beim bewerteten Norm-Trittschallpegel nicht unterschieden. Es gibt lediglich die pauschale

Festlegung, dass der prognostizierte Wert um mindestens 2 dB über dem Anforderungswert liegen soll. Ausgangspunkt für die Prognose sind Messergebnisse aus Laboratorien oder vom Bau, die entweder über den Umweg einer Massekurve oder direkt weiter verarbeitet werden. Damit enthält das Vorhaltemaß von 2 dB die gesamte Unsicherheitskette, von der Labormessung über die Bauteilstreuungen bis hin zur Prognose.

Aufbauend auf einer umfangreichen Datensammlung sowie Messungen und Prognosen an ausgeführten Gebäuden wurden in [KSF06] bereits Vorschläge ausgearbeitet, wie die neuen Mess- und Prognosenormen in der neuen [DIN 4109] zu berücksichtigen sind. Es ergab sich, dass mit den neuen Verfahren im Mittel um 1 dB niedrigere Norm-Trittschallpegel prognostiziert werden, als nach der alten [DIN 4109]. Um die Ergebnisse der neuen [DIN 4109] an die bisherigen Ergebnisse anzupassen, wird in [KSF06] vorgeschlagen, das Vorhaltemaß auf 3 dB zu erhöhen.

In [Ky03] wird über eine Vielzahl von Trittschallmessungen am Bau berichtet. Die Messgleichung

$$L'_n = L_i + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB} \quad (5)$$

wurde als Modellgleichung nach [GUM] verwendet. Die Unsicherheit des gemessenen Trittschallpegels wird aus der beobachteten Standardabweichung der gemessenen Schalldruckpegel berechnet. Auch die Unsicherheit der Nachhallzeit wird aus der zugehörigen Standardabweichung ermittelt. Die Unsicherheit des Empfangsraumvolumens wird vernachlässigt. Aus diesen Eingangsdaten wurde eine kombinierte Standardunsicherheit und schließlich unter der Annahme einer t-Verteilung ein 95%-Vertrauensbereich für alle gemessenen Normtrittschallpegel-Spektren berechnet. Anschließend wurde aus den maximalen und minimalen Spektren ein 95%-Vertrauensbereich für den bewerteten Norm-Trittschallpegel ermittelt. Die Auswertung erfolgte in ganzen dB-Schritten. Die Breite des 95%-Konfidenzintervalls beträgt im Mittel über alle gemessenen Strukturen 3 dB. Besonders kritisch ist hierbei, dass eine Erhöhung der Zahl der Schalldruck- und Nachhallzeitmessungen die Unsicherheit stark reduziert, ja sogar ganz verschwinden lässt. Dieser Ansatz ist daher nicht zielführend.

4. Auswertung von Ringversuchen

4.1 Verwendete Messdaten

Eine Übersicht über die vorliegenden Messdaten findet sich in Tabelle 2 - Tabelle 4. Für den Norm-Trittschallpegel liegen Messungen lediglich unter Wiederhol- und In-situ-Bedingungen vor. Über Messungen unter Vergleichsbedingungen ist nichts bekannt, d.h. Messergebnisse der selben Decke aus verschiedenen Prüfständen liegen nicht vor. Darüber hinaus gibt es Messergebnisse zur Bauteilreproduzierbarkeit von Holzbalkendecken, da 8 Exemplare einer nominell identischen Decke im selben Prüfstand vermessen wurden.

Bei der Trittschallminderung ist die Situation genau umgekehrt. Hier liegen lediglich Messungen unter Vergleichsbedingungen vor. Es gibt keine Messungen unter Wiederhol- und unter In-situ-Bedingungen. Auch zu Produktstreuungen liegen keine Messergebnisse vor.

Tabelle 2 Ergebnisse von Trittschallmessungen unter in-situ-Bedingungen, unterschiedliches Personal, unterschiedliche Messgeräte, gleiche Labor- oder Bausituation, o – Zahl der Teilnehmer, n – Zahl der Messdurchläufe pro Teilnehmer

| Messgröße, Messobjekt, Anmerkungen | Quelle | o | n |
|---|---------|-----|-----|
| $L'_{n,T}$, Baumessung, Holzbalkendecke, jedes Messteam mit eigener Methode, Terzwerte gerundet auf ganze dB | [Fo80] | 7 | 1 |
| $L'_{n,T}$, Baumessung, Holzbalkendecke, Einschränkung der zulässigen Geometrie, Terzwerte gerundet auf ganze dB | [Fo80] | 7 | 1 |
| $L'_{n,T}$, Baumessung, Messung in Oktaven, Situation a | [Be87] | 7 | 1 |
| $L'_{n,T}$, Baumessung, Messung in Oktaven, Situation b | [Be87] | 10 | 1 |
| $L'_{n,T}$, Baumessung, Messung in Oktaven, Situation c | [Be87] | 10 | 1 |
| $L'_{n,T}$, Baumessung, Messung in Oktaven, Situation d | [Be87] | 9 | 1 |
| $L'_{n,T}$, Baumessung, Messung in Oktaven, Situation e | [Be87] | 10 | 1 |
| $L'_{n,T}$, Baumessung, Deckenaufbau bestehend aus 20 cm Stahlbeton, 2 cm Mineralwolle, PE-Folie, 5 cm schwimmender Estrich, Belag | [La96] | 11 | 5 |
| $L'_{n,T}$, Baumessung, Deckenaufbau bestehend aus abgehängter Decke, Beton-Rippendecke, schwimmendem Estrich, Belag | [La96] | 12 | 5 |
| $L'_{n,T}$, Baumessung, Deckenaufbau bestehend aus Stahlbetondecke, Schüttung, schwimmendem Estrich, Parkett, Auswertung der Einzahlwerte in ganzen dB | [Le01] | 15 | 5 |
| L'_n , Baumessung in einem Bürogebäude (A), vertikale Messrichtung | [Sim05] | 8 | 1 |
| L'_n , Baumessung in einem Bürogebäude (B), vertikale Messrichtung | [Sim05] | 4 | 1 |
| L'_n , Baumessung in einem Bürogebäude (D), horizontale Messrichtung | [Sim05] | 4 | 1 |
| L'_n , Baumessung in einem Bürogebäude (F), horizontale Messrichtung | [Sim05] | 4 | 1 |
| L_n , Labor: Stahlbetondecke mit Laminatauflage | PTB 07 | 17 | 1 |
| L'_n , Betonrohdecke in einem Testgebäude aus Beton-Fertigteilen, | [SS09] | 9 | 5 |
| L_n , Holzbalkendecke (16 mm abgehängte Gipskartonplatten, ca. 400 mm hohen Holzbalken, 15 mm dicken OSB-Platten Mineralwollfüllung) | [WB98] | 1 | 7 |

| | | | |
|--|--------------|-----|---|
| L'_n , 2 mm PVC-Platten (verklebt), ca. 45 mm Zementestrich, eine Lage Abdeckfolie, 25/20 mm Mineralfaser-Trittschalldämmplatten nach DIN 18 165, 140 mm Vollbetonplattendecke | MPA 86-88 | 71 | 1 |
| L'_n , 2 mm PVC-Platten (verklebt), ca. 45 mm Zementestrich, eine Lage Abdeckfolie, 25/20 mm Mineralfaser-Trittschalldämmplatten nach DIN 18 165, 140 mm Vollbetonplattendecke, 4 künstliche Schallbrücken, vertikale Messrichtung | MPA 89-91 | 72 | 1 |
| L'_n , 2 mm PVC-Platten (verklebt), ca. 45 mm Zementestrich, eine Lage Abdeckfolie, 25/20 mm Mineralfaser-Trittschalldämmplatten nach DIN 18 165, 140 mm Vollbetonplattendecke, 4 künstliche Schallbrücken, diagonale Messrichtung | MPA 92-94 | 84 | 1 |
| L'_n , 2 mm PVC-Platten (verklebt), ca. 45 mm Zementestrich, eine Lage Abdeckfolie, 25/20 mm Mineralfaser-Trittschalldämmplatten nach DIN 18 165, 140 mm Vollbetonplattendecke, 4 künstliche Schallbrücken, horizontale Messrichtung | MPA 95-97 | 105 | 1 |
| L'_n , 2 mm PVC-Platten (verklebt), ca. 50 mm Zementestrich, eine Lage Abdeckfolie, 6/5 mm PE Trittschalldämmstoff, 140 mm Vollbetonplattendecke, horizontale Messrichtung | MPA 98-00 | 106 | 1 |
| L'_n , 2 mm PVC-Platten (verklebt), ca. 50 mm Zementestrich, eine Lage Abdeckfolie, 6/5 mm PE Trittschalldämmstoff, 140 mm Vollbetonplattendecke, vertikale Messrichtung | MPA 01-03 | 102 | 1 |

Tabelle 3 Ergebnisse von Messungen des Trittschallverbesserungsmaßes unter Vergleichsbedingungen, unterschiedliches Personal, unterschiedliche Messgeräte, unterschiedliche Labor- oder Bausituation, o – Zahl der Teilnehmer, n – Zahl der Messdurchläufe pro Teilnehmer

| Messgröße, Messobjekt, Anmerkungen | Quelle | o | n |
|---|--------|-----|-----|
| ΔL , Labormessung, harter PVC-Belag auf Betondecke | [Jo02] | 6 | 1 |
| ΔL , Labormessung, weicher PVC-Belag auf Betondecke | [Jo02] | 6 | 1 |
| ΔL , Labormessung, Parkett auf Betondecke | [Jo02] | 6 | 1 |
| ΔL , Labormessung, PVC-Belag auf Betondecke aufgelegt | [Bo83] | 4 | 5 |
| ΔL , Labormessung, PVC-Belag auf Betondecke verklebt | [Bo83] | 4 | 1 |
| ΔL , Labormessung, PVC-Belag auf Betondecke | [SW10] | 5 | 1 |
| ΔL , Labormessung, PVC-Belag auf Betondecke | [SW10] | 5 | 1 |
| ΔL , Labormessung, PVC-Belag auf Betondecke | [SW10] | 5 | 1 |
| ΔL , Labormessung, PVC-Belag auf Betondecke | [SW10] | 5 | 1 |
| ΔL , Labormessung, PVC-Belag auf Betondecke | [SW10] | 5 | 1 |
| ΔL , Labormessung, PVC-Belag auf Betondecke | [SW10] | 5 | 1 |
| ΔL , Labormessung, PVC-Belag auf Betondecke | [SW10] | 5 | 1 |
| ΔL , Labormessung, PVC-Belag auf Betondecke | [SW10] | 5 | 1 |
| ΔL , Labormessung, PVC-Belag auf Betondecke | [SW10] | 5 | 1 |
| ΔL , Labormessung, PVC-Belag auf Betondecke | [SW10] | 5 | 1 |
| ΔL , Labormessung, Teppichbelag auf Betondecke | [SW10] | 5 | 1 |
| ΔL , Labormessung, Teppichbelag auf Betondecke | [SW10] | 5 | 1 |
| ΔL , Labormessung, Teppichbelag auf Betondecke | [SW10] | 5 | 1 |

Tabelle 4 Ergebnisse von Messungen des Normtrittschallpegels an verschiedenen Exemplaren des nominell identischen Bauteils (Produktstreuungen) im gleichen Labor, n – Zahl der Objekte

| Messgröße, Messobjekt, Anmerkungen | Quelle | n |
|--|--------|-----|
| Holzbalkendecke (15 mm dicke OSB-Platten, ca. 400 mm hohen Holzbalken, 16 mm dicke abgehängte Gipskartonplatten, Mineralwollfüllung) | [WB98] | 8 |

4.2 Auswertung

Eine Unterscheidung zwischen Labor- und Baumessungen ist aufgrund der vorliegenden Daten nicht sinnvoll, da sich die Messvorschriften nur in kleinen Details unterscheiden und auch die Baumessungen in geschlossenen Empfangsräumen durchgeführt wurden. Lediglich bei Vorliegen von besonderen Bedingungen wie offenen Empfangsräumen, sehr großen oder hohen Empfangsräumen ist davon auszugehen, dass die Streuungen bei Baumessungen größer sind als bei Labormessungen.

Für die Betrachtung der Unsicherheiten der Einzahlwerte ist eine Verschiebung der Referenzkurve in 0,1 dB – Schritten erforderlich. Da dies in den vorliegenden Auswertungen von Ringversuchen meist nicht so umgesetzt wurde, wurden alle vorliegenden Messwerte einer neuen Auswertung unterzogen. Dies sichert auch die Einheitlichkeit der Berechnungsmethoden. Allerdings entsprechen manche Originalergebnisse nur bedingt den heutigen Erfordernissen. So lagen z.B. die Normtrittschallpegel in Terzen aus [Fo80] nur in ganzen dB-Werten und die aus [Be87] nur in Oktaven vor. Von den Vergleichsmessungen in Österreich [Le01] konnten gar keine direkten Messergebnisse zur Verfügung gestellt werden. Daher wurde in diesem Fall auf die im Bericht enthaltenen Mittelwerte und Wiederhol-Standardabweichungen der einzelnen Teilnehmer und auf die angegebenen Einzahlwerte zurückgegriffen, die durch Verschiebung um ganze dB-Schritte berechnet wurden.

Eine wichtige Frage bei der Auswertung von Ringversuchen betrifft die Behandlung von Ausreißern. Die im Rahmen dieser Arbeit generell verfolgte Philosophie besteht darin, dass alle Messergebnisse, die in Übereinstimmung mit der zugrunde liegenden Messvorschrift erzielt wurden, eine gültige Realisierung der Messgröße darstellen. Lediglich bei Verstößen gegen die Messvorschrift oder anderen groben Fehlern sind die Messwerte zu eliminieren, wenn also z.B. Fenster oder Türen nicht geschlossen wurden, die Messkette fehlerhaft war oder Ähnliches.

Beispielhaft betrachtet seien hier die Werte aus [SS09]. Von den Veranstaltern des Ringversuchs wurde das Ergebnis einer Prüfstelle als Ausreißer deklariert (Bild 1, Bild 2). Werden statistische Tests für den bewerteten Norm-Trittschallpegel durchgeführt, so ergeben sich unterschiedliche Ergebnisse. Nach dem Cochran-Test [DIN ISO 5725-1] ist die Wiederhol-Standardabweichung der fraglichen Ergebnisse signifikant größer als die mittlere Wiederhol-Standardabweichung aller Prüfstellen. Der Mittelwert ist dagegen weder nach dem Grubbs-Test noch nach dem David-Hartley-Pearson-Test [Ha86] ein Ausreißer. Da die Wiederhol-Standardabweichung des fraglichen Labors auch in Terzen jedoch nicht so viel größer ist als die der anderen Laboratorien (Bild 2), wurden die Ergebnisse des betreffenden Labors nicht disqualifiziert.

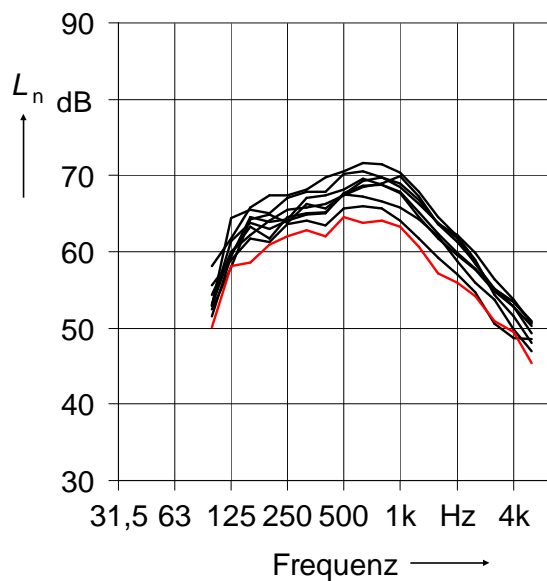


Bild 1 Gemessene mittlere Norm-Trittschallpegel der 9 Teilnehmer aus [SS09] und Ausreißer (rot)

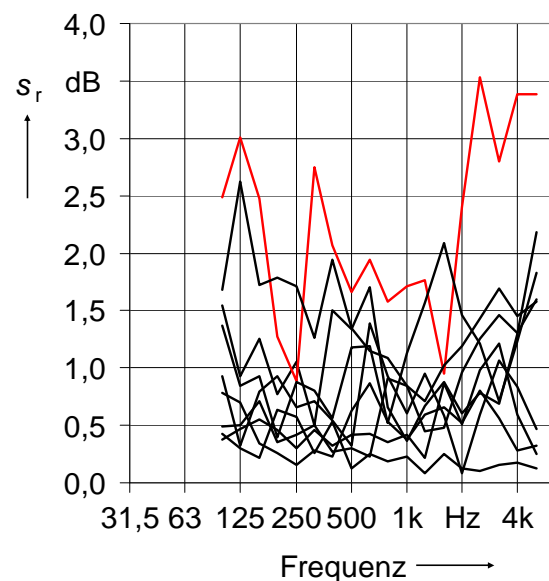


Bild 2 Wiederhol-Standardabweichungen der 9 Teilnehmer aus [SS09] und Ausreißer (rot)

4.3 Spektrale Ergebnisse

Die aus den neuen Berechnungen folgenden Wiederhol-Standardabweichungen für den Norm-Trittschallpegel weisen eine erhebliche Streuung auf (Bild 3). Der Mittelwert wurde durch Mittelung der Quadrate der Einzelwerte berechnet. Er liegt sehr nahe bei den aus [DIN EN ISO 140-2] bekannten Werten für die Wiederhol-Standardabweichung in Laboratorien.

Die In-situ-Standardabweichungen für den Norm-Trittschallpegel streuen ebenfalls stark (Bild 4). Es fällt auf, dass die Messergebnisse aus [Be87], die nur in Oktaven vorliegen, wesentlich größere Standardabweichungen aufweisen, als die übrigen Ergebnisse. Die Ursache für diese Abweichung liegt darin, dass die Messungen auf einem weichen Estrich („screed“) durchgeführt wurden, der durch die Einwirkung des Hammerwerks zunehmend pulverisiert wird. Die entstehende Staubschicht führt zu einer Körperschallentkopplung, so dass das Messergebnis u.a. stark von der Einwirkdauer abhängt. Die Mittelung wurde daher zwei mal ausgeführt, ein Mal mit und ein Mal ohne die Oktavwerte aus [Be87]. Zwischen den beiden Mittelwerten ergeben sich erhebliche Unterschiede (Bild 4). Für die weiteren Betrachtungen wird der ohne Oktavwerte berechnete Mittelwert verwendet. Dieser Mittelwert liegt bei tiefen Frequenzen in etwa bei der in [DIN EN ISO 140-2] angegebenen Vergleichs-Standardabweichung für die Ermittlung des Normtrittschallpegels in Laboratorien (Bild 5). Bei höheren Frequenzen liegt die neu berechnete In-situ-Standardabweichung sogar noch darüber.

Für die Produktstreuungen konnten die Messergebnisse aus [WB98] verwendet werden, die elektronisch zur Verfügung gestellt wurden. Die Standardabweichung in

Terzen liegt bei ca. 1 dB (Bild 6). Hier ist zu berücksichtigen, dass es sich um spezielle Laboraufbauten handelt. Es wurden jeweils neue Materialien, jedoch vom gleichen Typ verwendet, und auch die Details des Aufbaus wie z.B. die Verschraubungen waren weitgehend identisch. Damit handelt es sich um eine Mindestabschätzung die streng genommen für Holzbalkendecken gilt. Es ist nicht zu erwarten, dass in der Praxis geringere Werte erzielt werden können.

Vergleichs-Standardabweichungen für die Trittschallminderung liegen für lediglich 3 verschiedene Deckenaufbauten vor. Dabei handelt es sich um ein Parkett, einen weichen PVC-Belag und einen härteren PVC-Belag. Die mittlere Vergleichs-Standardabweichung liegt bis etwa 1 kHz über den Werten aus der aktuellen [DIN EN ISO 140-2] (Bild 8) und bei höheren Frequenzen leicht darunter.

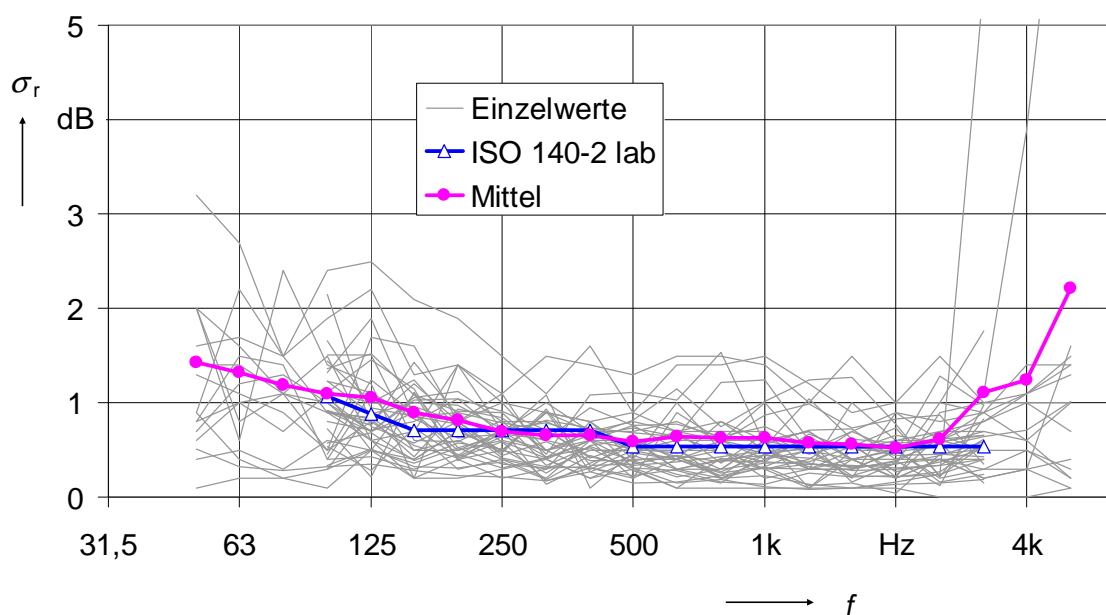


Bild 3 Wiederhol-Standardabweichungen für die Messung des Norm-Trittschallpegels

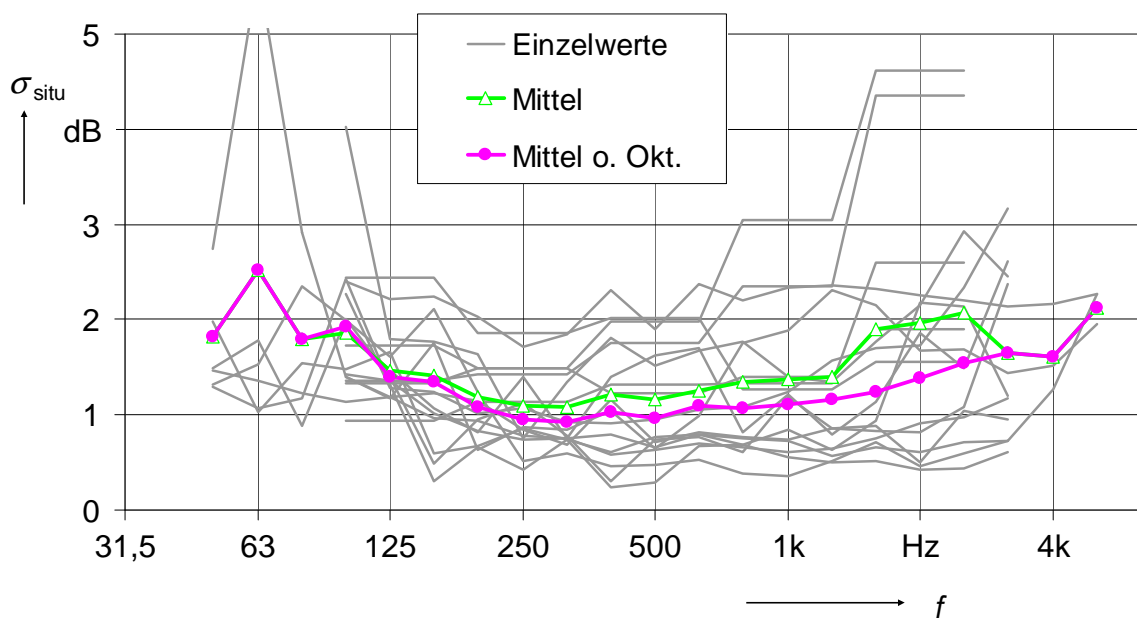


Bild 4 In-situ-Standardabweichungen für die Messung des Norm-Trittschallpegels, Mittelwert und Mittelwert ohne Einzelwerte in Oktavbändern

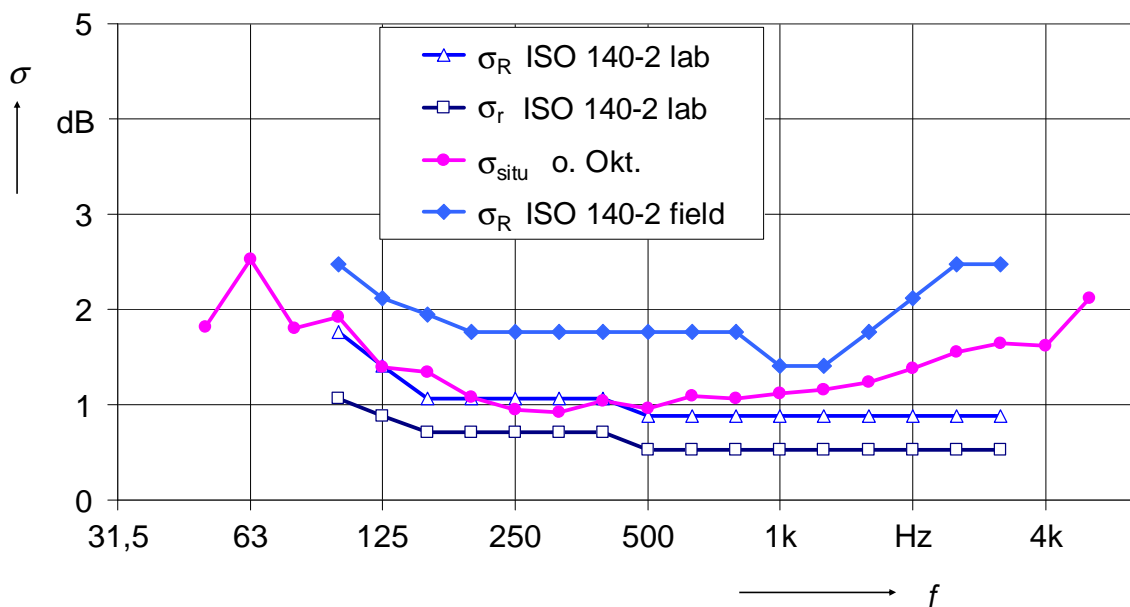


Bild 5 In-situ-Standardabweichungen für die Messung des Norm-Trittschallpegels sowie Wiederhol- und Vergleichs-Standardabweichungen aus der [DIN EN ISO 140-2]

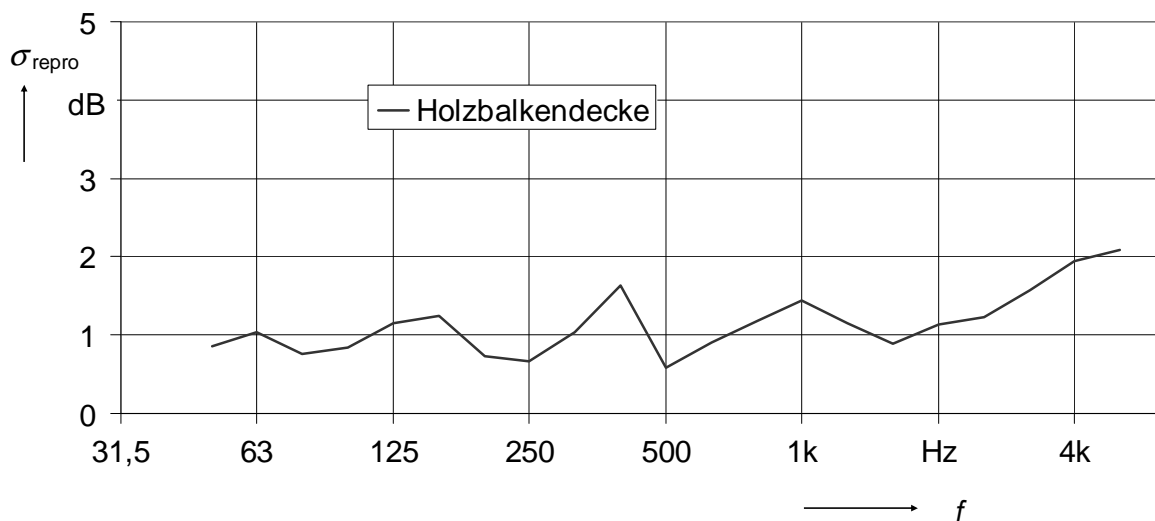


Bild 6 Standardabweichung für die Messung des Norm-Trittschallpegels von 8 nominell identischen Holzbalkendecken im selben Prüfstand [WB98]

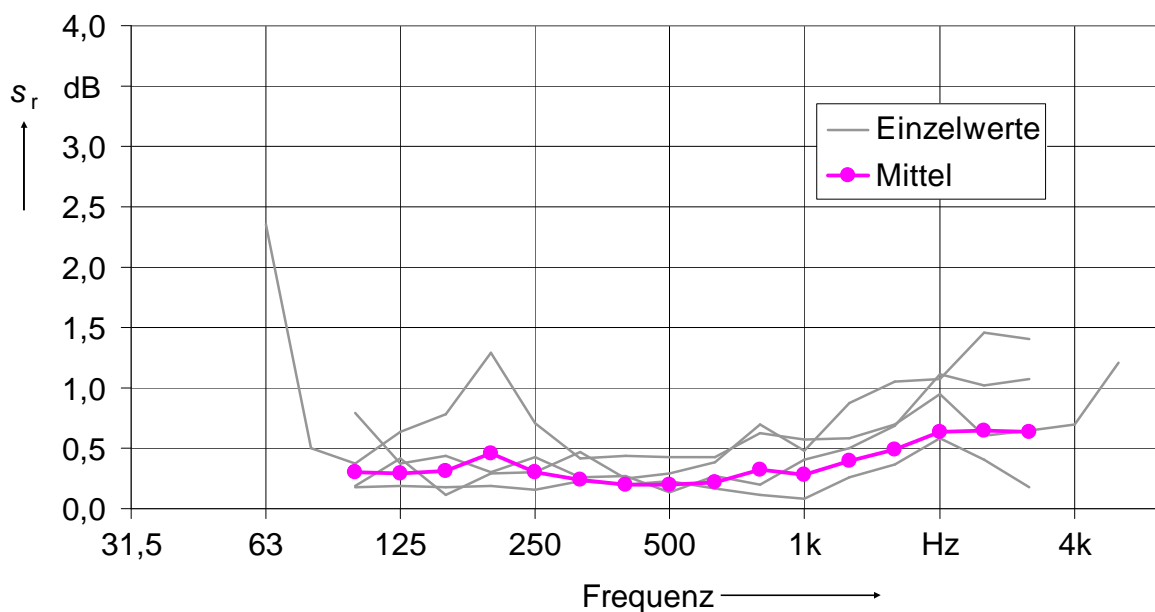


Bild 7 Wiederhol-Standardabweichungen für die Messung der Trittschallminderung von Deckenauflagen

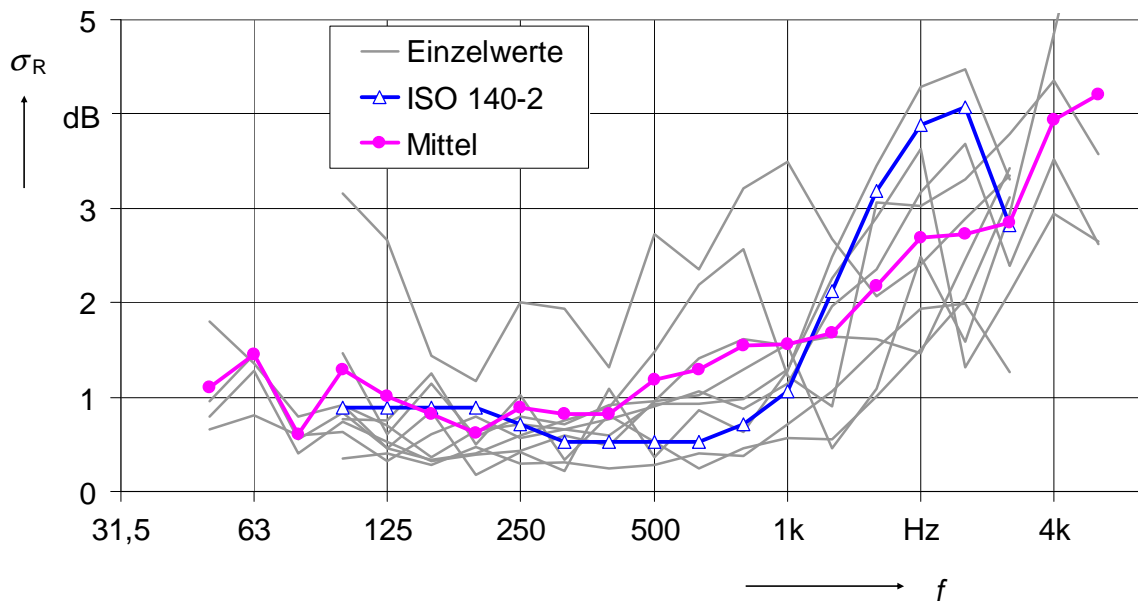


Bild 8 Vergleichs-Standardabweichungen für die Messung der Trittschallminderung von Deckenauflagen

4.4 Ergebnisse für Einzahlwerte

Neben den verschiedenen Standardabweichungen für die Terzwerte interessieren auch die Standardabweichungen für die Einzahlwerte. Alle für den Norm-Trittschallpegel vorliegenden Ergebnisse sind in Bild 9 zusammengefasst. Es treten recht unterschiedliche Standardabweichungen auf, die jedoch nicht systematisch vom bewerteten Norm-Trittschallpegel selbst abhängen. Damit erscheint es sinnvoll, alle vorliegenden Standardabweichungen durch entsprechende Mittelwerte zu repräsentieren.

Außerdem zeigt sich, dass die aus Oktaven berechneten Werte [Be87] stark von den übrigen Werten abweichen. Da die Messungen heute üblicherweise in Terzen ausgeführt werden, wurden die aus Oktaven berechneten Werte bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt. Eine Verschiebung der Bezugskurve in ganzen dB-Schritten [Le01] führt dagegen nicht zu Auffälligkeiten. In einigen Fällen erhöht sich die Standardabweichung dadurch, in einigen Fällen reduziert sich die Standardabweichung. Da der Effekt in beide Richtungen wirkt, können die zugehörigen Werte bei der Mittelwertbildung berücksichtigt werden. Als Mittelwert ergibt sich für die In-situ-Standardabweichung des bewerteten Norm-Trittschallpegels ein Wert von 1,0 dB und für die Wiederhol-Standardabweichung von 0,5 dB (Tabelle 5). Diese Werte sind etwas größer als die Werte für die Luftschalldämmung von 0,8 bzw. 0,4 dB. Die Ursachen liegen darin, dass beim Trittschall eine Absolutmessung mit einer genormten Quelle ausgeführt wird, während beim Luftschall eine Differenzmessung erfolgt.

Die mittlere Vergleichs-Standardabweichung für die bewertete Trittschallminderung repräsentiert mit einem Wert von 1,0 dB die drei vorliegenden Ergebnisse recht gut (Bild 10). Sie ist gleich der In-situ-Standardabweichung für den Norm-

Trittschallpegel, obwohl bei letzterer die Versuchsbedingungen viel weniger variiert wurden (Tabelle 1). Der Grund liegt wiederum darin, dass es sich bei Trittschallminderungen um Relativmessungen im gleichen Prüfstand handelt.

Für die Produktstreuungen liegen lediglich Werte für eine Holzbalkendecke vor (Tabelle 4 auf Seite 8). Der bewertete Norm-Trittschallpegel für verschiedene Exemplare der identischen Decke zeigt eine Standardabweichung von 0,3 dB. Wie auch bei den spektralen Ergebnissen kann dieser Wert als eine Untergrenze angesehen werden. Realistisch erscheint es hier, einen Wert von 1,0 dB anzusetzen, wie er auch für die Luftschalldämmung im aktuellen Sicherheitskonzept der DIN 4109 Verwendung findet.

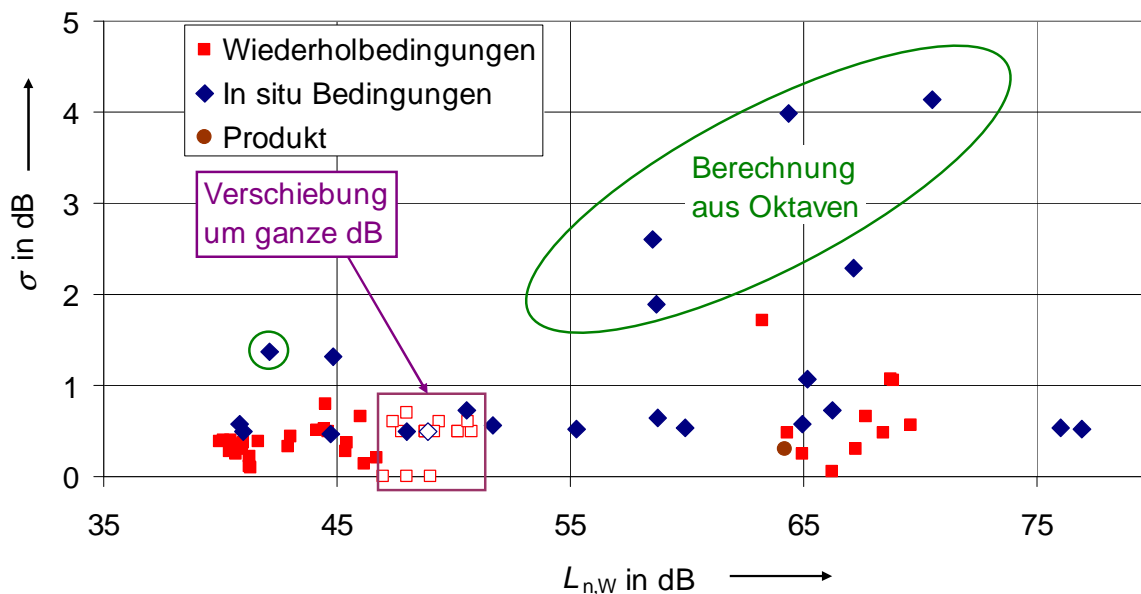


Bild 9 Standardabweichungen für die Messung des bewerteten Normtrittschallpegels

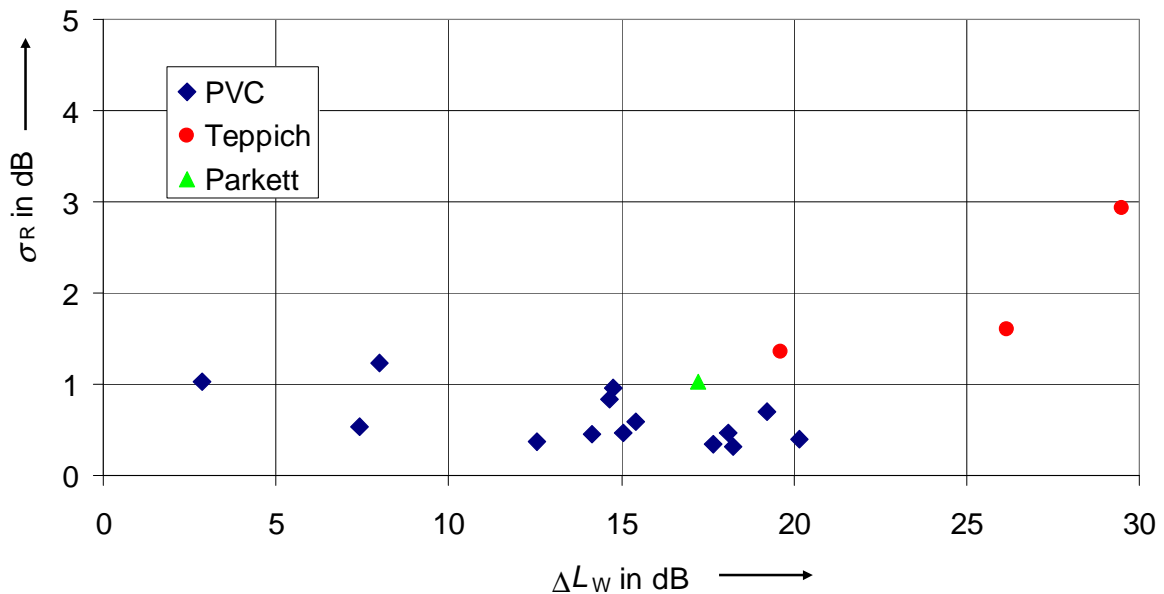


Bild 10 Vergleichs-Standardabweichungen für die Messung der bewerteten Trittschallminderung

4.5 Luft- und Trittschallunsicherheiten im Vergleich

Eine Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse im Vergleich zum Luftschall findet sich in Bild 11, Bild 12 und Tabelle 5. Zu erkennen ist, dass die spektralen Wiederhol-Standardabweichungen bei Luft- und Trittschall in der ähnlichen Größenordnung liegen (Bild 11). Lediglich bei hohen Frequenzen zeigen sich im Trittschall deutlich größere Werte. Bei den In-situ-Standardabweichungen zeigt der Luftschall bei tiefen Frequenzen größere Werte als der Trittschall, und bei höheren Frequenzen ist es umgekehrt. Interessant ist nun, dass die Unsicherheit des bewerteten Schalldämm-Maßes doch etwas unter der des bewerteten Norm-Trittschallpegels liegt. Da die Terz-Unsicherheiten bei Luft- und Trittschall eher in der selben Größenordnung liegen, muss beim Trittschall von größeren Korrelationen zwischen den Terzwerten ausgegangen werden.

In der aktuellen Fassung der [DIN EN ISO 140-2] wird angegeben, dass die Vergleichs-Standardabweichung des bewerteten Norm-Trittschallpegels, wie auch des bewerteten Schalldämm-Maßes, zwischen 0,4 und 1,2 dB und die Wiederhol-Standardabweichung bei 0,4 dB liegt. Die neuen Ergebnisse (Bild 12, Tabelle 5) liegen damit in der selben Größenordnung. Für die Vergleichs-Standardabweichung des bewerteten Norm-Trittschallpegels konnte mit 1,5 dB lediglich ein Schätzwert angegeben werden. Da es keine Ringversuche dazu gibt, wurde der Wert so festgesetzt, dass er über der Vergleichs-Standardabweichung des bewerteten Schalldämm-Maßes liegt.

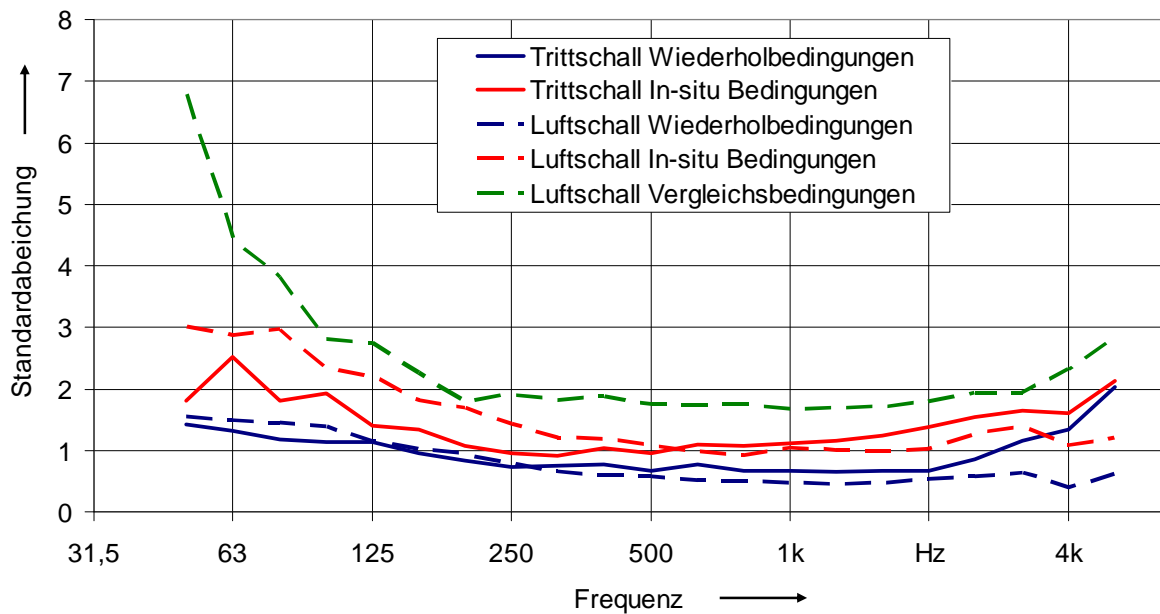


Bild 11 Mittlere Standardabweichungen für Luft- und Trittschallmessungen im Vergleich

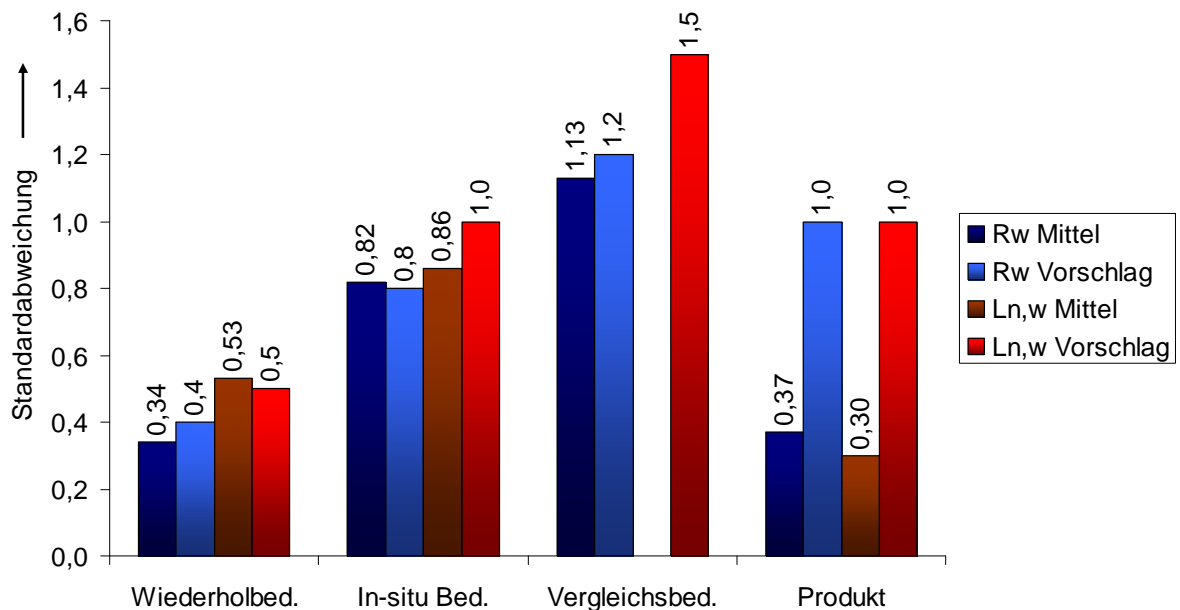


Bild 12 Mittlere Standardabweichungen für bewertete Schalldämm-Maße und bewertete Norm-Trittschallpegel im Vergleich zu den Vorschlägen für die DIN 4109 und die ISO 12999

Tabelle 5 Vorgeschlagene Unsicherheiten für die Messung von Einzahlwerten im Luft- und Trittschall abgeleitet durch Mittelung vorliegender Ringversuchsergebnisse sowie Schätzwert (in Klammern)

| | Bewerteter Norm-Trittschallpegel | Bewertetes Luftschalldämm-Maß | Bewertete Trittschallminderung |
|------------------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| σ_r | 0,5 dB | 0,4 dB | - |
| σ_{situ} | 1,0 dB | 0,8 dB | - |
| σ_R | (1,5 dB) | 1,2 dB | 1,0 dB |
| σ_{repro} | (1,0 dB) | (1,0 dB) | - |

4.6 Korrelationseffekte

Beim Luftschall wird die Unsicherheit der Einzahlwerte stark durch die Korrelation zwischen den Terzwerten beeinflusst [Wit07]. Dass dies auch beim Trittschall der Fall ist, lässt sich gut an den Messergebnissen von Fothergill [Fo80] erkennen. Damals wurden Messungen des Norm-Trittschallpegels in einem Gebäude durch 7 verschiedene Teams durchgeführt. Jedes Team hat dabei zwei verschiedene Messungen durchgeführt. Die erste erfolgte nach den Vorgaben der Messnorm, die von jedem Team individuell interpretiert wurden. Für die zweite Messung wurden engere Vorgaben in Bezug auf die geometrische Anordnung von Quelle und Mikrofon getroffen. Als Ergebnis konnte die in-situ-Standardabweichung der Norm-Trittschallpegel in Terzen bei tiefen Frequenzen erheblich reduziert werden (Bild 13, Bild 14). Bei 100 Hz reduzierte sich die Standardabweichung von 4,0 auf 1,9 dB (Bild 16). Außerdem erhöhen sich die Norm-Trittschallpegel in allen Terzen um ca. 1 – 2 dB (Bild 15).

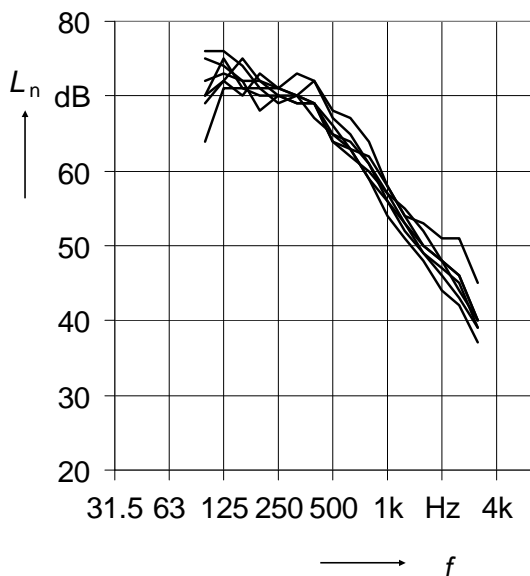


Bild 13 Gemessene Norm-Trittschallpegel aus [Fo80], individuelle Methode

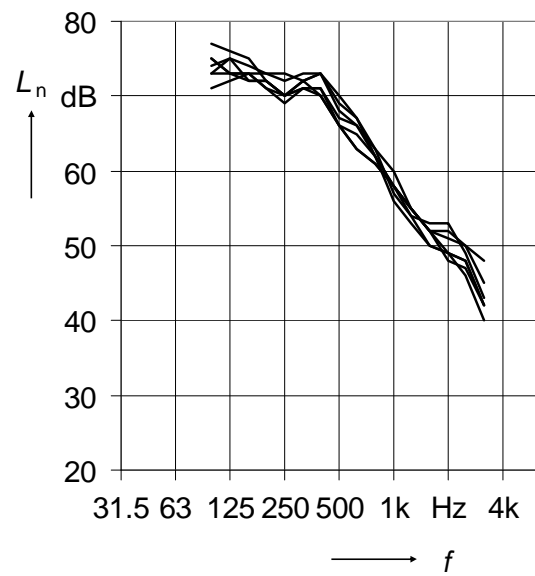


Bild 14 Gemessene Norm-Trittschallpegel aus [Fo80], Methode mit eingeschränkter Geometrie

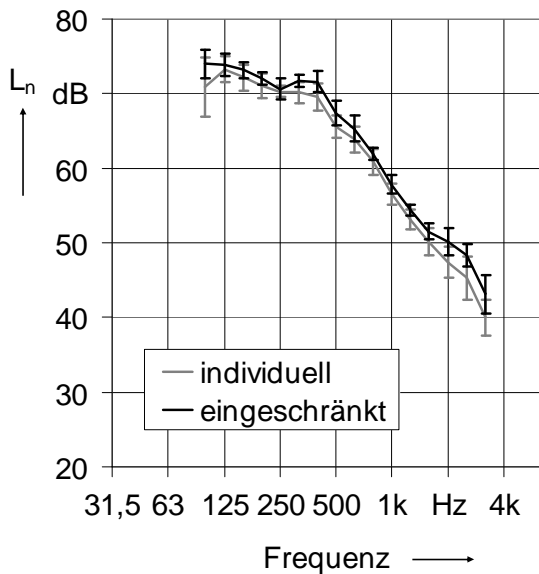


Bild 15 Mittlere Norm-Trittschallpegel aus [Fo80], individuelle Methode und Methode mit eingeschränkter Geometrie im Vergleich

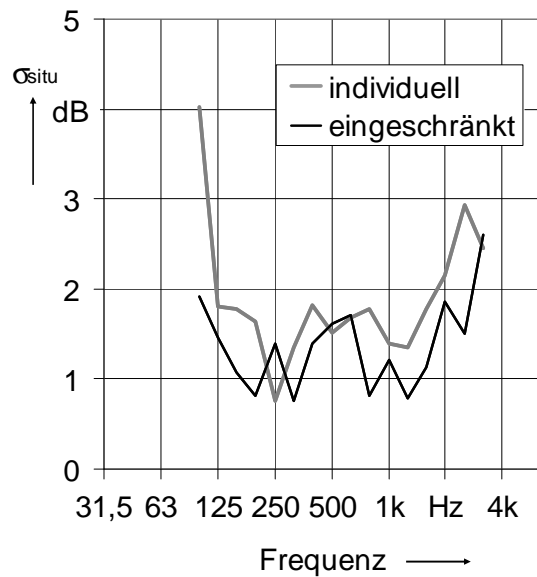


Bild 16 In-situ-Standardabweichungen aus [Fo80], individuelle Methode und Methode mit eingeschränkter Geometrie im Vergleich

Interessant ist nun, wie sich dies auf den bewerteten Norm-Trittschallpegel auswirkt. Der Mittelwert aus den 7 Ergebnissen steigt von 65,0 auf 66,3 dB an während sich die Standardabweichung von 0,58 auf 0,72 dB erhöht. Trotz einer erheblichen Reduktion der Terz-Standardabweichungen kommt es zu einer leichten Erhöhung der Standardabweichung für den bewerteten Norm-Trittschallpegel. Die Ursache liegt in einer Erhöhung der Korrelation zwischen den Terzwerten unter 500 Hz, die den Einzahlwert bestimmen. Die Unsicherheit des bewerteten Norm-Trittschallpegels $u(L_{n,w})$ ergibt sich aus den Unsicherheiten der zu berücksichtigenden Terzwerte $u(L_{n,i})$, den Sensitivitätskoeffizienten c_i und den Korrelationskoeffizienten zwischen den Terzwerten $r(L_{n,i}, L_{n,j})$.

$$u(L_{n,w}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(L_{n,i}) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(L_{n,i}) u(L_{n,j}) r(L_{n,i}, L_{n,j})} \quad (6)$$

Berechnet man die Korrelationskoeffizienten zwischen den Terzwerten zwischen 100 und 500 Hz und summiert diese auf, so ergibt sich für den Datensatz aus der individuellen Methode eine Summe von 1,6 und für die neue Methode 12,9. Der 2. Term in Gl. (6) wächst also so stark an, dass eine Verringerung des 1. Terms überkompensiert wird. An diesem Beispiel wird offenkundig, dass eine Veränderung der Messvorschrift kritisch ist, wenn dies die Korrelation zwischen den Terzwerten erhöht.

5. Unsicherheitsbeiträge durch das Hammerwerk

5.1 Modellierung des Hammerwerks als Körperschallquelle

Die Anregung einer Struktur durch ein Hammerwerk kann mit einem elektromechanischen Ersatzschaltbild modelliert werden (Bild 17). Die Quellkraft F_{bl} (blocked force) beschreibt dabei die Quellstärke des Hammerwerks. Ein Teil dieser Kraft wird benötigt, um die Hammermasse m zu bewegen. Die verbleibende Kraft F steht für die Anregung der Struktur mit der Mobilität Y zur Verfügung und bewirkt die Schnelle v .

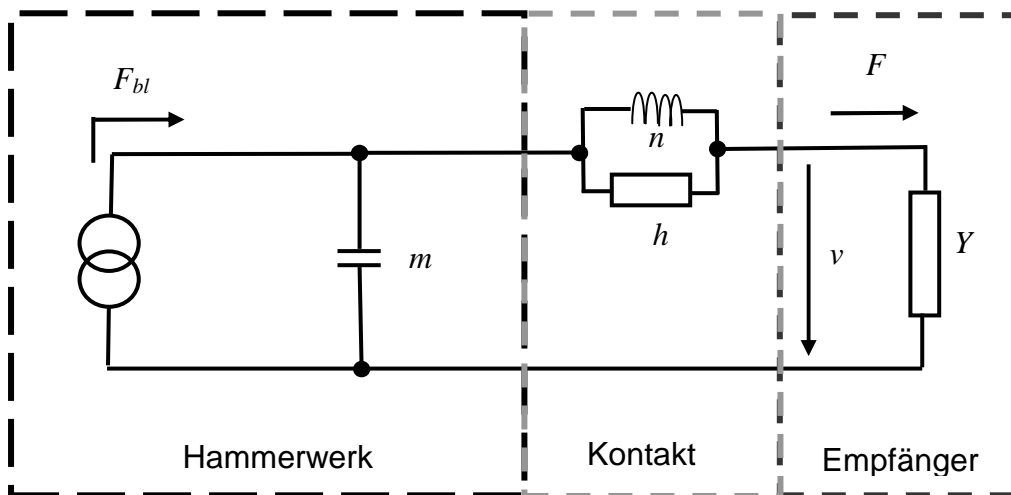


Bild 17 Elektromechanisches Ersatzschaltbild der Anregung einer Empfangsstruktur durch ein Hammerwerk

Der Kontakt des Hammers mit der angeregten Struktur wird durch eine verlustbehaftete Feder dargestellt. Ihre Nachgiebigkeit n beträgt für einen harten Stoß, z.B. auf Beton [Ho07]:

$$n = \frac{1 - \nu^2}{2 r E} \quad (7)$$

mit der Querkontraktion ν und dem E-Modul E der Empfangsplatte sowie dem Radius r der Kontaktfläche. Für Stöße auf weiche Unterlagen ergibt sich die Nachgiebigkeit dagegen aus der Schichtdicke d der Unterlage, ihrem E-Modul E und dem Radius der Kontaktfläche r

$$n = \frac{d}{\pi r^2 E} \quad (8)$$

Die Reibungsverluste des Kontakts h können aus dem Verlustfaktor η und der Kreisfrequenz ω berechnet werden

$$h = \frac{\omega n}{\eta} \quad (9)$$

Die in den Empfänger eingespeiste Leistung ergibt sich dann zu

$$\begin{aligned}
 P &= \operatorname{Re}\{F v^*\} \\
 &= |F|^2 \operatorname{Re}\{Y\}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Die Kräfte teilen sich wie folgt auf

$$F_{bl} = F + F_m. \tag{11}$$

Außerdem gilt

$$F \left(Y + \frac{j \omega n h}{h + j \omega n} \right) = \frac{F_m}{j \omega m} \tag{12}$$

bzw.

$$F_m = F j \omega m \left(Y + \frac{j \omega n h}{h + j \omega n} \right). \tag{13}$$

Damit folgt

$$\begin{aligned}
 F_{bl} &= F \left[1 + j \omega m \left(Y + \frac{j \omega n h}{h + j \omega n} \right) \right] \\
 &= F \left[1 + j \omega m \left(Y + \frac{\omega n (j + \eta)}{1 + \eta^2} \right) \right]
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

und

$$|F|^2 = F F^* = F_{bl}^2 \left\{ \frac{1}{\left[1 + j \omega m \left(Y + \frac{\omega n (j + \eta)}{1 + \eta^2} \right) \right]} \right\}^* . \tag{15}$$

Mit Gln. (10) und (15) ergibt sich die in den Empfänger eingeleitete Leistung aus der Kombination der Hammerwerks- und der Empfängereigenschaften

$$P = \frac{F_{bl}^2 \operatorname{Re}\{Y\}}{\left[1 + j \omega m \left(Y + \frac{\omega n (j + \eta)}{1 + \eta^2} \right) \right]} \left\{ \frac{1}{\left[1 + j \omega m \left(Y + \frac{\omega n (j + \eta)}{1 + \eta^2} \right) \right]} \right\}^* . \tag{16}$$

Bei einer angenommenen Quellkraft von 1 N folgen die Schalleistungsspektren nach Bild 18. Deutlich ist, dass das Hammerwerk in eine Betonplatte wesentlich geringere Leistungspegel einleitet als in eine Spanplatte, die als oberste Schicht einer Holzbalkendecke angenommen wurde.

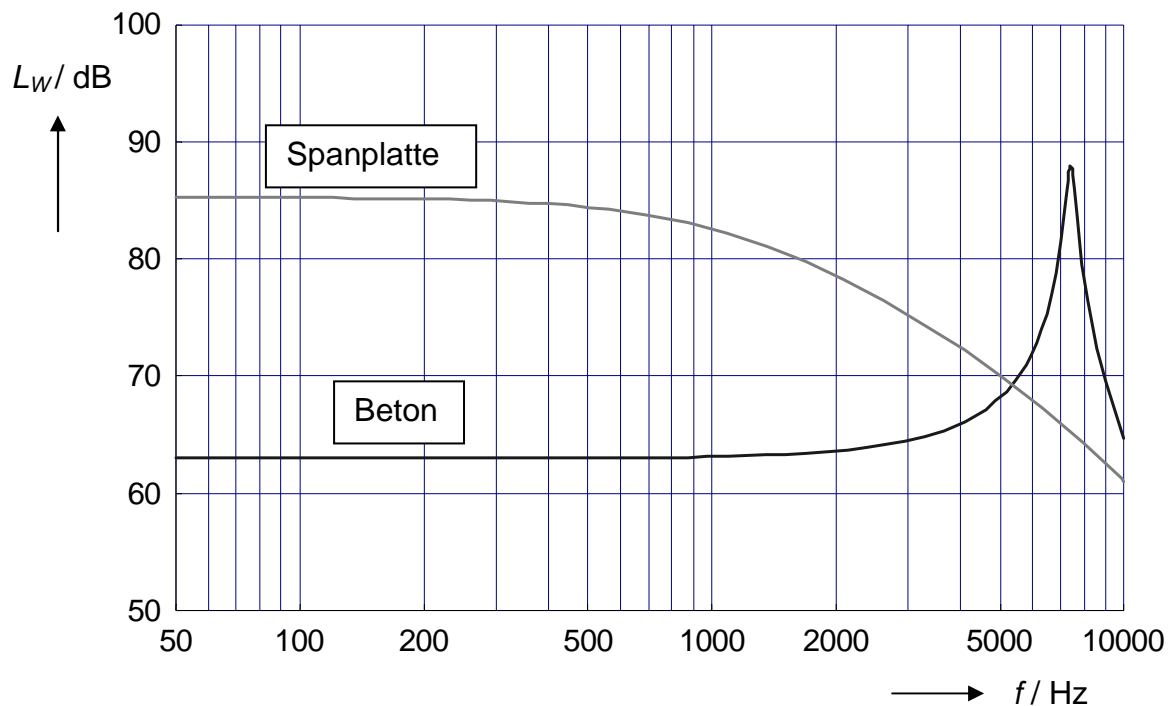


Bild 18 Von einem Hammerwerk in eine Betonplatte und in eine Spanplatte eingeleitete Leistungspegel

5.2 Bestimmung der Quellkraft des Hammerwerks und ihrer Unsicherheit

Wird die Quellkraft eines Hammerwerks als Folge kurzer Impulse mit dem Zeitabstand T_i betrachtet, so ergibt sich nach [CH67] die Kraft bei einer Spektrallinie aus der Hammermasse m und der Geschwindigkeit beim Auftreffen v_{\max} zu

$$F_N = 2 m v_{\max} \frac{1}{T_i} \quad (17)$$

Für den Effektivwert in einem Frequenzband der Breite B ergibt sich

$$F_Q^2 = F_N^2 \frac{B}{2} T_i \quad (18)$$

woraus die spektrale Dichte der Quellkraft

$$F_{Q,f} = \sqrt{2} m v_{\max} \sqrt{\frac{1}{T_i}} \quad (19)$$

folgt. Ihr Pegel ergibt sich zu

$$L_{Q,f} = 20 \lg \frac{F_{Q,f}}{F_{0f}} \text{ dB} \quad (20)$$

wobei der Bezugswert von

$$F_{0f} = 2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{N}}{\sqrt{\text{Hz}}} \quad (21)$$

verwendet wurde. Nach [GUM] folgt die Unsicherheit der spektralen Leistungsdichte aus der Unsicherheit der Hammermasse, der Fallgeschwindigkeit und des zeitlichen Abstands zwischen zwei Schlägen

$$u_c(L_{Q,f}) = \frac{20 \text{ dB}}{\ln(10)} \sqrt{\left[\frac{u(m)}{m}\right]^2 + \left[\frac{u(v_{\max})}{v_{\max}}\right]^2 + \left[\frac{u(T_i)}{2 T_i}\right]^2} \quad (22)$$

Die Unsicherheit der Eingangsgrößen kann aus den Anforderungen an das Hammerwerk nach [DIN EN ISO 140-6] abgeleitet werden, wenn die gegebenen Toleranzen als 95 % - Vertrauensbereiche interpretiert werden. Danach ergibt sich die kombinierte Standardunsicherheit der spektralen Leistungsdichte der Quellkraft zu 0,20 bzw. 0,19 dB (Tabelle 6, Tabelle 7), je nachdem welches der beiden Anforderungsprofile aus [DIN EN ISO 140-6] verwendet wird. Sowohl für die Hammermasse als auch für die Fallgeschwindigkeit werden in der Norm zwei verschiedene Toleranzen angegeben, wobei jeweils eine breite Toleranz für eine Größe einer schmalen Toleranz für die andere Größe zugeordnet ist. Die Toleranzen wurden so gewählt, dass die resultierende Unsicherheit der spektralen Leistungsdichte der Quellkraft in beiden Fällen praktisch gleich ist.

Für die spätere Anwendung interessiert nicht die spektrale Dichte der Kraft, sondern die Kraft in den Terzbändern. Da dazu die Kraftdichte lediglich mit der exakt bekannten Bandbreite zu multiplizieren ist, kommen keine weiteren Unsicherheiten hinzu. Damit ist die Unsicherheit der Quellkraft in den Terzbändern gleich der Unsicherheit der spektralen Kraftdichte.

Tabelle 6 Unsicherheitsbudget für die spektrale Leistungsdichte der Quellkraft des Hammerwerks bei Einhaltung der Toleranz für die Hammermasse von $\pm 6 \text{ g}$ und für die Fallgeschwindigkeit von $\pm 33 \text{ mm/s}$

| Größe | Erwartungswert | Anforderung | u_i | c_i | $(u_i c_i)^2$ |
|------------|----------------|-----------------------|-----------|------------------|-------------------------|
| m | 500 g | $\pm 6 \text{ g}$ | 3 g | 0,0174 dB/g | 0,00272 dB ² |
| v_{\max} | 886 mm/s | $\pm 33 \text{ mm/s}$ | 16,5 mm/s | 0,0098 dB/(mm/s) | 0,02617 dB ² |
| T_i | 100 ms | $\pm 5 \text{ ms}$ | 2,5 ms | 0,0434 dB/ms | 0,01179 dB ² |
| | | | | $u_c(L_{Q,f})$ | 0,20 dB |

Tabelle 7 Unsicherheitsbudget für die spektrale Leistungsdichte der Quellkraft des Hammerwerks bei Einhaltung der Toleranz für die Hammermasse von ± 12 g und für die Fallgeschwindigkeit von ± 22 mm/s

| Größe | Erwartungswert | Anforderung | u_i | c_i | $(u_i c_i)^2$ |
|------------|----------------|---------------|---------|------------------|-------------------------|
| m | 500 g | ± 12 g | 6 g | 0,0174 dB/g | 0,01086 dB ² |
| v_{\max} | 886 mm/s | ± 22 mm/s | 11 mm/s | 0,0098 dB/(mm/s) | 0,01163 dB ² |
| T_i | 100 ms | ± 5 ms | 2,5 ms | 0,0434 dB/ms | 0,01179 dB ² |
| | | | | $u_c(L_{Q,f})$ | 0,19 dB |

Die Berechnung der Quellkraft und ihrer Unsicherheit erfolgte bisher auf der Basis von Normanforderungen. Im Folgenden sollen dagegen Fallgeschwindigkeiten, Hammermassen und Zeitintervalle herangezogen werden, die im Rahmen der Vergleichsmessungen an realen Hammerwerken gemessen wurden. Die 24 Hammerwerke wurden dazu auf einer ca. 40 mm dicken polierten Natursteinplatte betrieben. Die Fallgeschwindigkeit wurde mit einem Laser-Vibrometer gemessen, während die Zeitintervalle durch Auswertung der Beschleunigung auf der Platte ermittelt wurden. Betrachtet wurden jeweils 50 Hammerschläge.

Die Mittelwerte liegen für beide Messgrößen sehr gut innerhalb der Normanforderungen (Bild 19, Bild 20). Lediglich bei Hammerwerk 2 ist das Zeitintervall zu lang. Die Standard-Unsicherheiten wurden für beide Messgrößen aus der Streuung der 50 Eingangswerte ermittelt. Sie sind ausreichend klein, um sicher entscheiden zu können, ob die Toleranz eingehalten wird oder nicht.

Die Hammermassen wurden durch Wägung aller 5 Hämmer pro Hammerwerk ermittelt. Die Mittelwerte erfüllen die Normanforderung sehr gut (Bild 21). Die zugehörige Standard-Unsicherheit wurde aus der Streuung der 5 Hammermassen pro Hammerwerk berechnet.

Werden mit Gln. (19) und (22) die Quellkraft und ihre Unsicherheit berechnet, so ergeben sich für jedes Hammerwerk Werte von ca. 99,9 dB mit einer sehr geringen Standard-Unsicherheit von ca. 0,05 dB (Bild 22). Alle Hammerwerke liegen in Bezug auf die Quellkraft innerhalb des Toleranzschlachts nach [DIN EN ISO 140-6].

Die Standardabweichung aller berechneten Quellkräfte liegt bei 0,11 dB. Sie ist geringer als die aus den Normtoleranzen berechnete Standard-Unsicherheit, da die Hammerwerke die Toleranz in ihrer Breite nicht ausschöpfen.

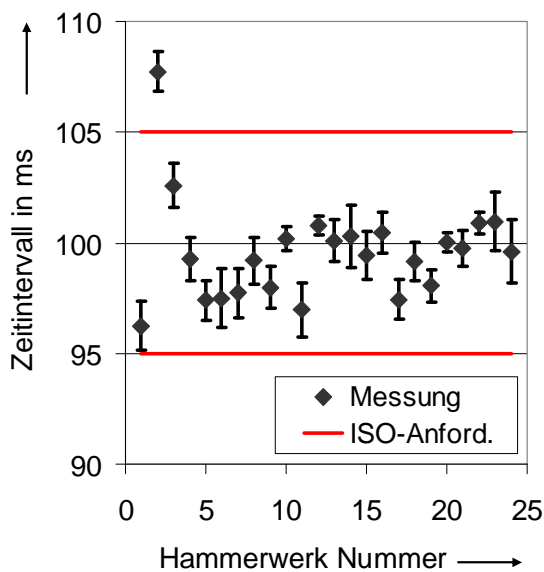


Bild 19 Gemessene Zeitintervalle zwischen Hammerschlägen, zugehörige Standard-Unsicherheit und ISO-Anforderung

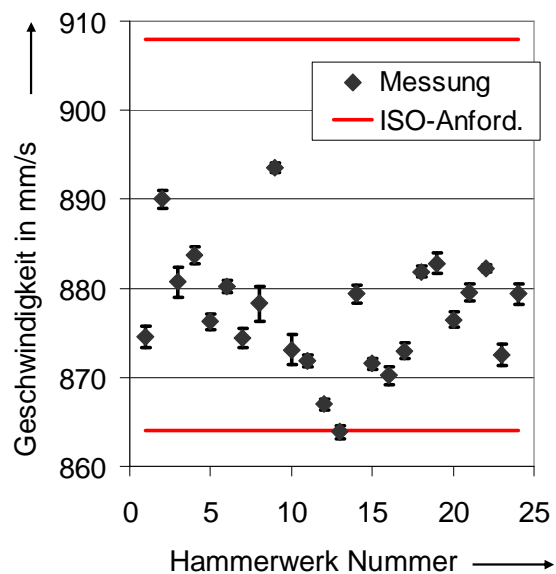


Bild 20 Fallgeschwindigkeit beim Auftreffen, zugehörige Standard-Unsicherheit und ISO-Anforderung

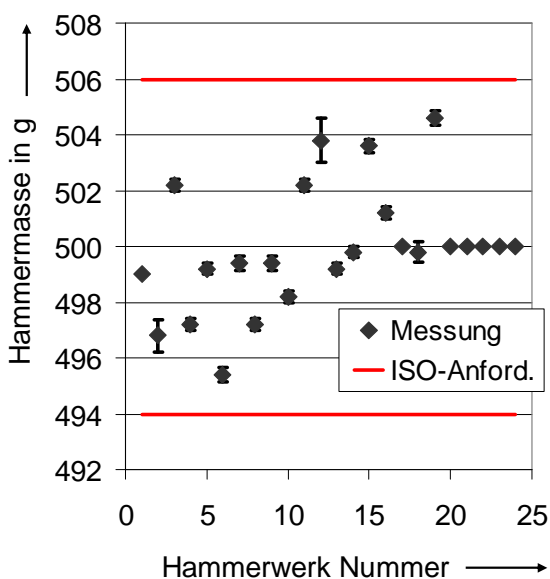


Bild 21 Gemessene Hammermassen, zugehörige Standard-Unsicherheit und ISO-Anforderung

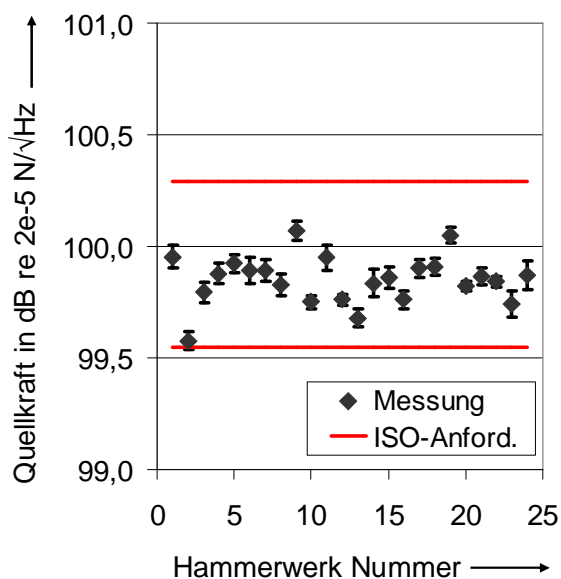


Bild 22 Quellkraft, zugehörige Standard-Unsicherheit und ISO-Anforderung

5.3 Emittiertes Spektrum

Eine weitere mit dem Hammerwerk verbundene Frage betrifft das emittierte Spektrum. Wird das Hammerwerk als eine Punktquelle mit einem einzigen Krafteinleitungspunkt aufgefasst, so ergibt sich ein emittiertes Spektrum aus einzelnen Tönen mit 10 Hz Linienabstand. Bei Decken mit einer geringen modalen Dichte, etwa einer Betondecke, ist damit zu erwarten, dass der Trittschallpegel davon abhängt, wie gut das anregende Linienspektrum auf die Eigenmoden passt. Um dies in der Praxis zu überprüfen, wurden auf einer Beton- und auf einer Holzbalkendecke die Beschleunigungsspektren schmalbandig gemessen, die sich bei Anregung durch ein Trittschallhammerwerk einstellen.

Bei der Betondecke zeigt sich lediglich unterhalb von 30 Hz ein ausgeprägtes Linienspektrum (Bild 23 – Bild 25). Allerdings beträgt der Linienabstand 2 Hz. Dies bedeutet, dass jeder einzelne Hammer als separate Quelle von außen sichtbar ist. Bei höheren Frequenzen ab ca. 40 Hz liegt eine breitbandige Anregung vor, da die Zeitintervalle zwischen den Hammerschlägen einer gewissen Streuung unterliegen und somit die Frequenzen verschmieren. Die in diesem Bereich beobachteten Maxima und Minima im Beschleunigungsspektrum werden nicht durch die Anregung sondern durch die modale Struktur der Transferimpedanz verursacht. Deutlich wird dies in Bild 25, da die Breiten der Maxima sehr groß sind.

Somit kann davon ausgegangen werden, dass alle Eigenfrequenzen einer Betondecke ausreichend durch ein Normhammerwerk angeregt werden. Bei tiefen Frequenzen ist die Liniendichte mit 2 Hz Linienabstand groß genug, verglichen mit den auftretenden Modenbreiten, und bei hohen Frequenzen liegt eine breitbandige Anregung vor.

Bei Holzbalkendecken zeigen sich ähnliche Effekte (Bild 26 – Bild 28). Auch hier handelt es sich um ein Linienspektrum mit 2 Hz Linienabstand. Allerdings erstreckt sich der Bereich der tonalen Anregung bis ca. 200 Hz. Die Ursache liegt darin, dass das verwendete mechanische Hammerwerk auf der Holzbalkendecke ruhiger läuft, da die auftretenden Kräfte und damit die Erschütterungen des Hammerwerks geringer sind als bei der Betondecke. Die Zeitabstände zwischen den Hammerschlägen variieren viel weniger, so dass das Linienspektrum bis zu höheren Frequenzen erhalten bleibt. Aufgrund der großen Modendichte und der relativ großen Dämpfung der Moden, kann auch bei Holzbalkendecken von einer ausreichenden Anregung der Eigenmoden durch das Hammerwerk ausgegangen werden.

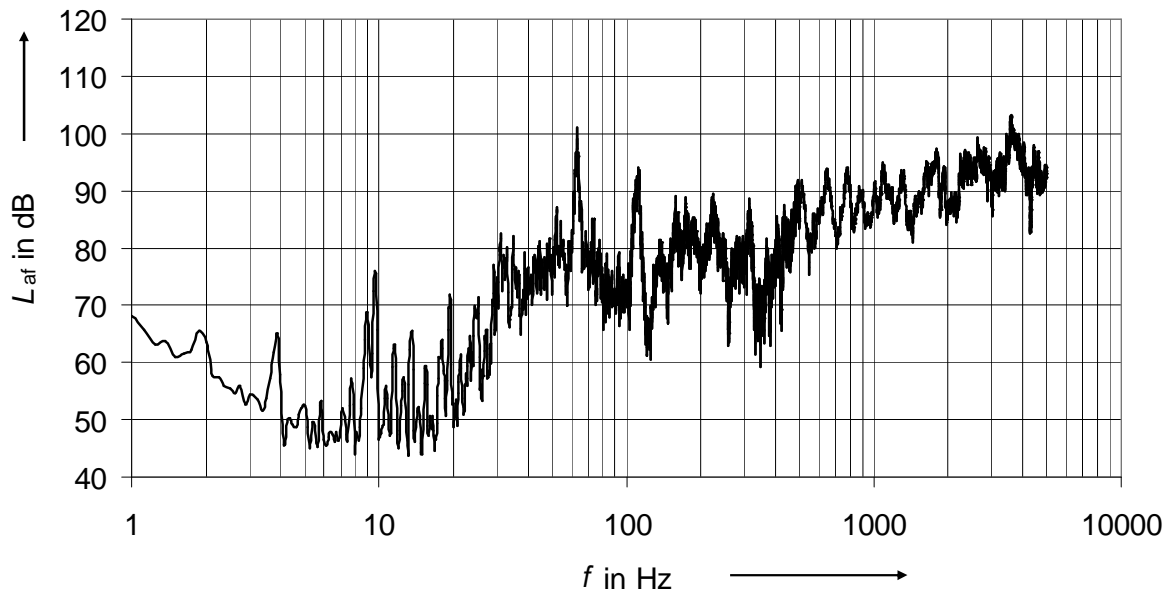


Bild 23 Spektrale Leistungsdichte der Beschleunigungen auf einer Betondecke bei Anregung mit einem Trittschall-Hammerwerk

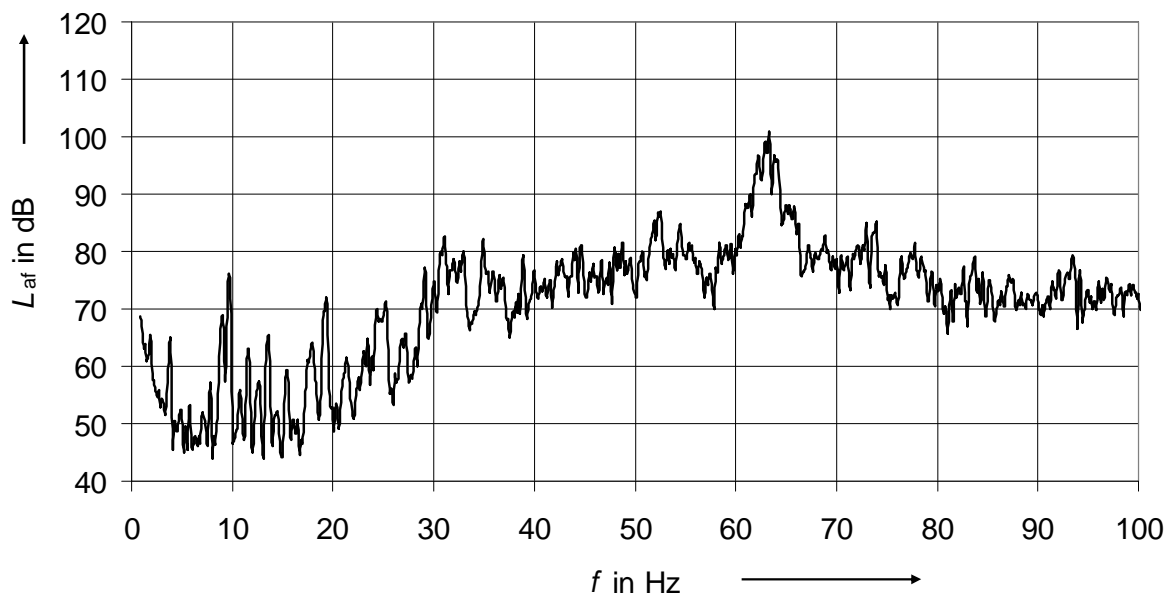


Bild 24 Spektrale Leistungsdichte der Beschleunigungen auf einer Betondecke bei Anregung mit einem Trittschall-Hammerwerk, Bereich zwischen 0 und 100 Hz vergrößert

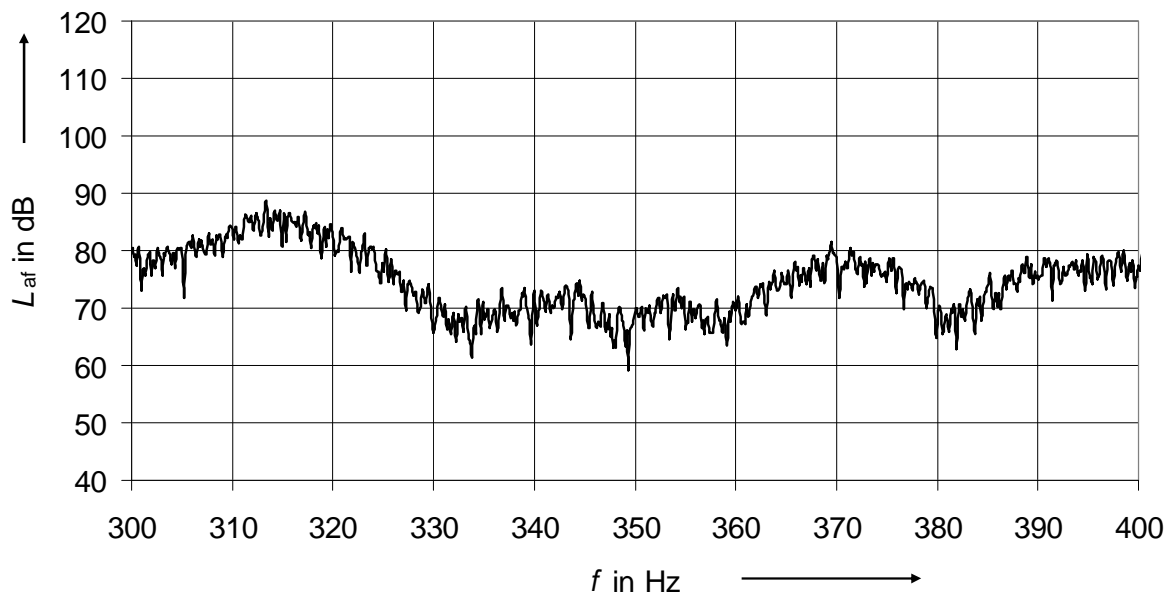


Bild 25 Spektrale Leistungsdichte der Beschleunigungen auf einer Betondecke bei Anregung mit einem Trittschall-Hammerwerk, Bereich zwischen 300 und 400 Hz vergrößert

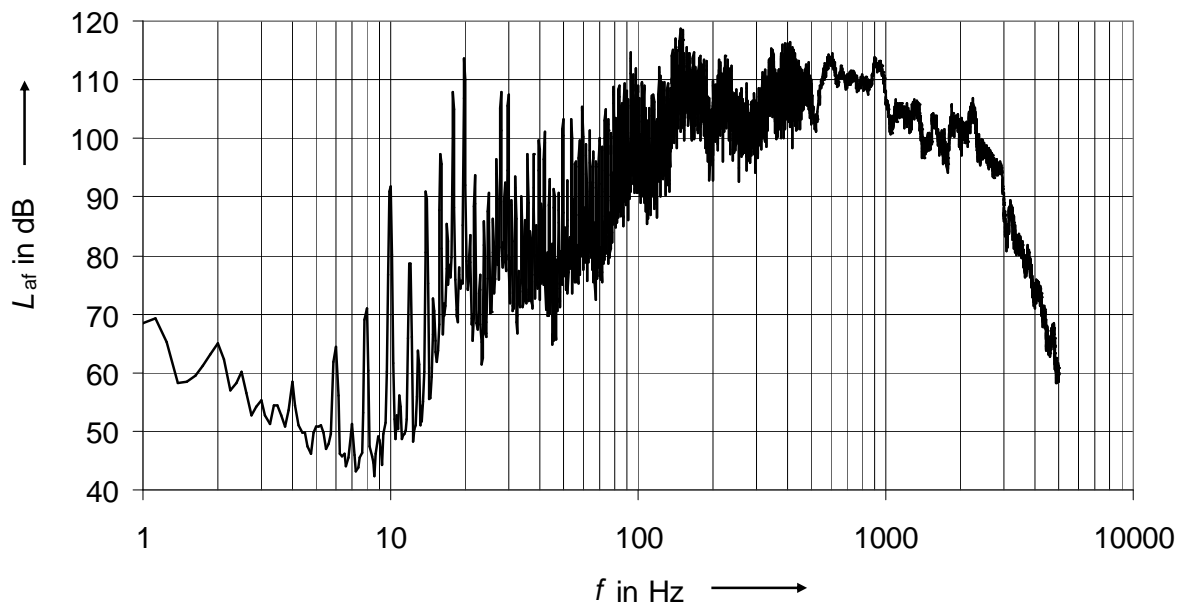


Bild 26 Spektrale Leistungsdichte der Beschleunigungen auf einer Holzbalkendecke bei Anregung mit einem Trittschall-Hammerwerk

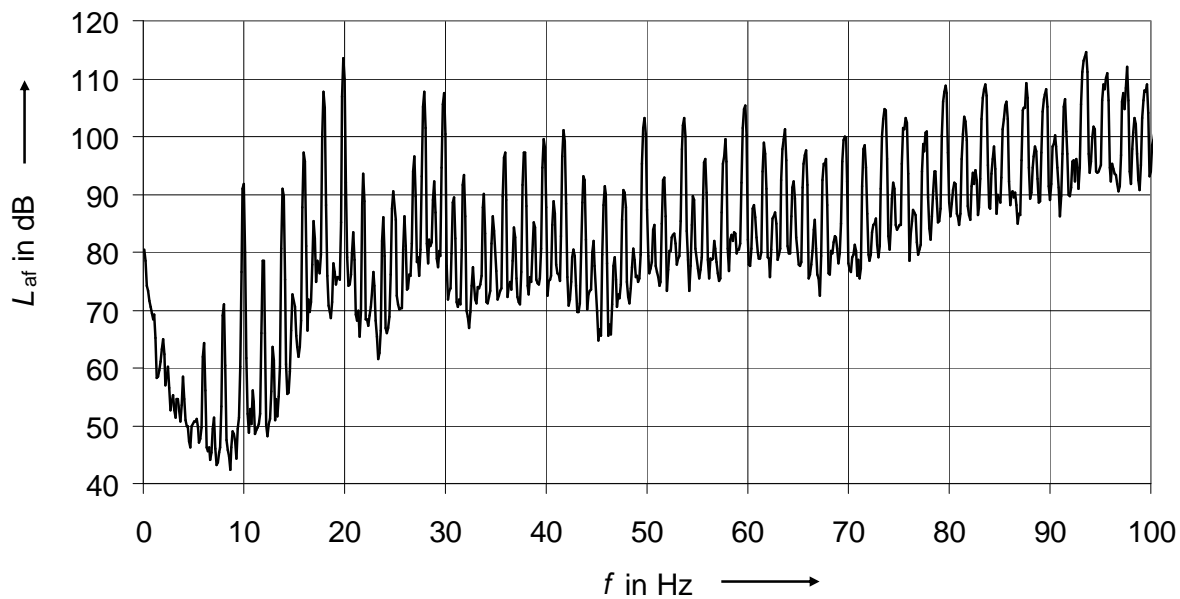


Bild 27 Spektrale Leistungsdichte der Beschleunigungen auf einer Holzbalkendecke bei Anregung mit einem Trittschall-Hammerwerk, Bereich zwischen 0 und 100 Hz vergrößert

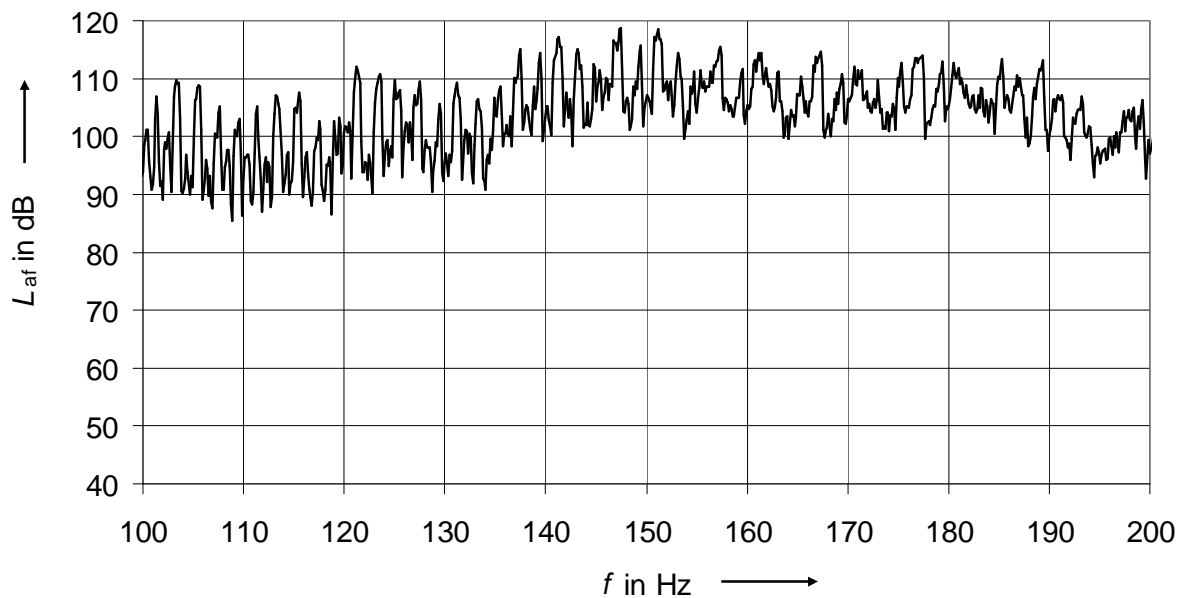


Bild 28 Spektrale Leistungsdichte der Beschleunigungen auf einer Holzbalkendecke bei Anregung mit einem Trittschall-Hammerwerk, Bereich zwischen 100 und 200 Hz vergrößert

5.4 Unsicherheit der eingespeisten Leistung

Die vom Hammerwerk in eine Empfangsstruktur eingespeiste Schalleistung erzeugt eine Schallausbreitung in der Gebäudestruktur, die dann letztlich zu einem Norm-Trittschallpegel in einem Empfangsraum führt. Der Beitrag der Hammerwerke zur Unsicherheit des Norm-Trittschallpegels lässt sich daher auf die Unsicherheit der eingespeisten Leistung zurückführen. Die eingespeiste Leistung ergibt sich aus der Quellkraft des Hammerwerks und aus den komplexen Quell- und Empfangsmobilitäten.

Um die Unsicherheit der eingespeisten Leistung realistisch abzuschätzen, wurden mit vier verschiedenen Typen von Hammerwerken Messungen auf vier verschiedenen Empfangsplatten durchgeführt. Alle Hammerwerke erfüllen die Anforderungen aus [DIN EN ISO 140-6]. Als Empfangsplatten dienten eine 16 cm dicke und 20 m² große Betonplatte sowie eine 1 cm dicke Stahlplatte, eine 8 mm dicke Spanplatte und eine 6 mm dicke Sperrholzplatte. Die drei letzten Platten waren ca. 1 m² groß und auf weichem Schaumstoff gelagert. Die eingeleitete Körperschalleistung wurde durch Messung der Körperschallschnelle sowie der Verlustfaktoren ermittelt.

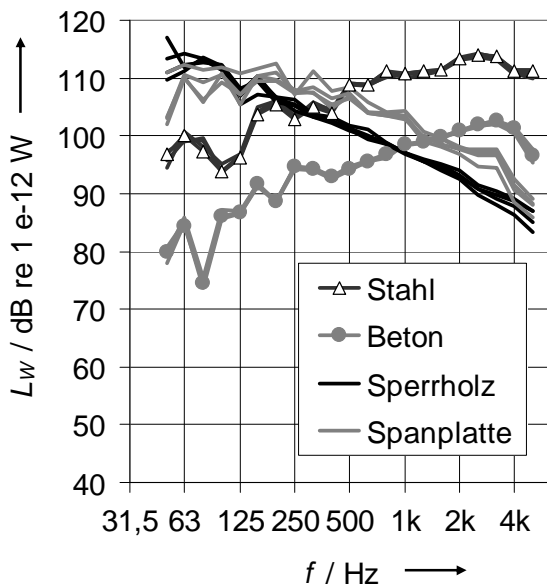


Bild 29 Von Hammerwerken in verschiedene Empfangsplatten eingeleitete Körperschall-Leistungspegel (4 verschiedene Hammerwerke pro Empfänger)

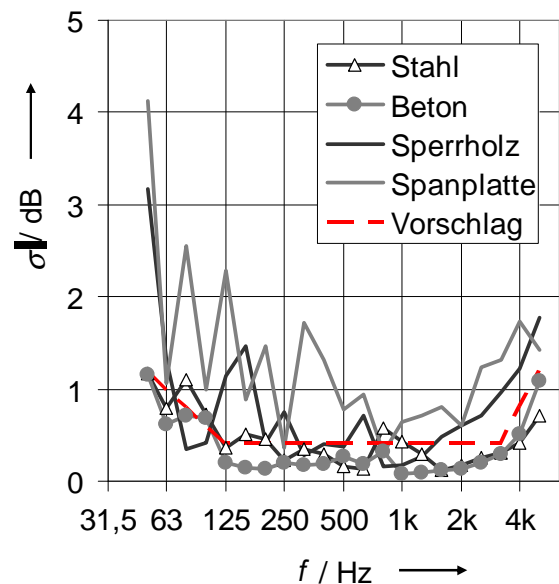


Bild 30 Standardabweichungen der von Hammerwerken in verschiedene Empfänger eingespeisten Körperschall-Leistungspegel

Alle 16 ermittelten Schalleistungen sind in Bild 29 zusammengefasst. Tatsächlich werden ganz unterschiedliche Leistungspegel in den verschiedenen Empfangsplatten detektiert. Werden daraus die Standardabweichungen berechnet, so ergeben sich Werte von meist unter einem dB bei Beton und Stahl (Bild 30). Bei der Sperrholz- und vor allem bei der Spanplatte kommt es zu wesentlich größeren Standardabweichungen. Der Grund liegt darin, dass diese relativ leichten Platten durch die verschiedenen Massen der Hammerwerke unterschiedlich stark belastet werden. Außerdem wird bei leichten und relativ weichen Empfängern ein Teil der Schalleistung durch die Füße des Hammerwerks eingeleitet. Da die Füße recht unterschiedlich sind, ergeben sich auch unterschiedliche Schalleistungen. Daneben

kommt es bei den sehr leichten, weich gelagerten Empfangsplatten zu starken Eigenbewegungen des Hammerwerks, die für einen normalen Betrieb untypisch sind. Auch dadurch kommt es zu stärkeren Schwankungen der emittierten Schalleistung.

Reale Deckenkonstruktionen zeigen eher ein Verhalten wie die in diesem Versuch verwendeten Empfangsplatten aus Stahl und Beton. Es wird daher vorgeschlagen, die Unsicherheit der eingeleiteten Schalleistung mit ca. 0,4 dB zwischen 125 Hz und 3,15 kHz anzusetzen. Zu höheren und tieferen Frequenzen steigt die vorgeschlagene Unsicherheit auf bis zu 1,2 dB an (Bild 30). Unter der Voraussetzung einer vollständigen positiven Korrelation zwischen den Terzwerten ergibt sich auch für den bewerteten Norm-Trittschallpegel eine Unsicherheit von 0,4 dB, allein durch die Unsicherheit der vom Hammerwerk in den Empfänger eingespeisten Leistung.

6. Modellmessungen

6.1 Motivation

In einem vorangegangenen Projekt zeigte sich, dass die Luftschalldämmung von Bauteilen auch von den Abmessungen des Prüfobjekts und des Sende- und Empfangsraums abhängt [Wit07-1]. Das Schalldämm-Maß nimmt zu, je kleiner das Prüfobjekt wird. Außerdem ist das bewertete Schalldämm-Maß zwischen zwei gleich großen Räumen im Mittel um ca. 1 dB niedriger als zwischen zwei unterschiedlich großen Räumen, wie sie für Laboratorien vorgeschrieben sind. Letzterer Effekt ist bei tiefen Frequenzen noch wesentlich stärker ausgeprägt.

Damit steht die Frage, ob solche Effekte auch für den Trittschall zu beobachten sind. Zur Klärung dieser Frage werden bauakustische Modellmessungen durchgeführt, bei denen systematische Parametervariationen im gesamten bauakustischen Frequenzbereich kostengünstig durchgeführt werden können.

6.2 Skalierungsgesetze für Luft- und Körperschall

Für eine korrekte Modellierung der Schallfelder muss die Helmholtzzahl für Luftschallwellen in Räumen mit der charakteristischen Länge L und der Wellenzahl k

$$He = k L \quad (23)$$

im Modell (Index M) und im Original (Index O) gleich sein. Damit folgt

$$\begin{aligned} (k L)_M &= (k L)_O \\ \left(\frac{\omega}{c} L\right)_M &= \left(\frac{\omega}{c} L\right)_O, \end{aligned} \quad (24)$$

wobei ω die Kreisfrequenz und c die Schallgeschwindigkeit ist. Da das Ausbreitungsmedium im Modell und im Original Luft mit der Schallgeschwindigkeit c ist, muss die Frequenz

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (25)$$

um den Faktor erhöht werden, um den die Längenabmessungen des Modells verkleinert werden. Dieser Faktor ist der Maßstabsfaktor M , und es folgen die Skalierungsgleichungen:

$$L_M = \frac{1}{M} L_O \quad (26)$$

$$f_M = M f_O \quad (27)$$

Neben dem Luftschallfeld ist für die korrekte Modellierung bauakustischer Effekte auch das Körperschallfeld auf den Bauteilen zu betrachten. Es wird durch Longitudinalwellen und vor allem Biegewellen bestimmt. Körperschall-Longitudinalwellen sind, ebenso wie Luftschallwellen, dispersionsfrei. In Platten bestimmt sich ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit c_L aus dem Elastizitätsmodul E , der Dichte ρ und der Querkontraktionszahl μ

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{1-\mu^2}}. \quad (28)$$

Mit den Skalierungen (26) und (27) ist die Helmholtzzahl und damit das Verhältnis von Wellenlänge λ_L zu Bauteilabmessung L im Original und im Modell gleich, wenn

$$c_{L,O} = c_{L,M} \quad (29)$$

gilt. Es muss also gelten

$$\sqrt{\frac{E_M}{\rho_M (1-\mu_M^2)}} = \sqrt{\frac{E_O}{\rho_O (1-\mu_O^2)}}. \quad (30)$$

Der Einfluss der Querkontraktionszahl ist im Allgemeinen so gering, dass hier auch

$$\sqrt{\frac{E_M}{\rho_M}} = \sqrt{\frac{E_O}{\rho_O}} \quad (31)$$

angesetzt werden kann.

Die Helmholtzzahl für Biegewellen ist zusätzlich noch durch die Plattendicke d bestimmt:

$$\text{He}_B = k_B L = \frac{\sqrt{\omega} L}{\sqrt[4]{\frac{E}{\rho} \frac{1}{1-\mu^2} \frac{d^2}{12}}} = \frac{\sqrt{\omega} L}{\sqrt[4]{c_L^2 \frac{d^2}{12}}}. \quad (32)$$

Um auch hierbei die Ähnlichkeit der Schallfelder zu gewährleisten, muss

$$\frac{\sqrt{f_M} L_M}{\sqrt{d_M}} = \frac{\sqrt{f_O} L_O}{\sqrt{d_O}} \quad (33)$$

eingehalten werden. Daraus ergibt sich

$$\frac{\sqrt{d_M}}{\sqrt{d_O}} = \frac{\sqrt{f_M} L_M}{\sqrt{f_O} L_O} = \frac{\sqrt{M}}{M} = \frac{1}{\sqrt{M}} \quad (34)$$

bzw.

$$d_M = \frac{1}{M} d_O. \quad (35)$$

Bei einer Verringerung der Plattendicke im Modellmaßstab sind die Biegewellenfelder im Original und im Modell ähnlich. Für eine korrekte Modellierung der Abstrahlung von Luftschallwellen sowie der Anregung von Körperschall durch Luftschall muss zusätzlich das Verhältnis von Körperschall- zu Luftschallwellenzahl konstant bleiben, was durch die Einhaltung der Bedingungen (26), (27), (30) und (35) gewährleistet ist.

Als nächstes sei die Anregung durch Körperschallquellen betrachtet. Eine unendlich große Platte dient als Empfängerstruktur, für deren Punktimpedanz gilt:

$$Z_P = 4 d^2 \sqrt{\frac{E \rho}{3(1-\mu^2)}}. \quad (36)$$

Für ingenieurtechnische Anwendungen wird die Querkontraktion hier meist vernachlässigt. Die Impedanz im Modell ist dann

$$Z_{P,M} = 4 d_M^2 \sqrt{\frac{E_M \rho_M}{3}}. \quad (37)$$

Daraus ergibt sich dann

$$\begin{aligned} Z_{P,M} &= 4 \frac{1}{M^2} d_O^2 \sqrt{\frac{\rho_M^2 E_O}{3 \rho_O}} \\ &= 4 \frac{1}{M^2} d_O^2 \sqrt{\frac{\rho_M^2 E_O \rho_O}{\rho_O^2 3}} \\ &= \frac{1}{M^2} \frac{\rho_M}{\rho_O} Z_{P,O} \end{aligned} \quad (38)$$

Die Punktimpedanz skaliert sich also mit $1/M^2$ und dem Verhältnis der Dichten der Plattenmaterialien im Original und im Modell.

Wird die Platte nun durch eine Punktkraft angeregt, z.B. durch einen Hammer eines Hammerwerks, so ist für den Leistungseintrag das Verhältnis von Quell- zu Plattenimpedanz maßgeblich. Dieses Verhältnis sollte demnach im Modell und im Original gleich sein. Daraus folgt

$$\frac{Z_{P,M}}{Z_{Q,M}} = \frac{Z_{P,O}}{Z_{Q,O}} \quad (39)$$

bzw.

$$Z_{Q,M} = Z_{Q,O} \frac{Z_{P,M}}{Z_{P,O}} = Z_{Q,O} \frac{1}{M^2} \frac{\rho_M}{\rho_O}. \quad (40)$$

Die Quellimpedanz muss also ebenso mit $1/M^2$ und dem Verhältnis der Plattendichten skaliert werden, wie die Impedanz der angeregten Platte. Ist die Quelle durch ein Masseverhalten gekennzeichnet, so beträgt ihre Impedanz

$$Z_Q = j \omega m. \quad (41)$$

Für die Modellierung bedeutet dies:

$$\frac{Z_{Q,M}}{Z_{Q,O}} = \frac{f_M m_M}{f_O m_O} = M \frac{m_M}{m_O}. \quad (42)$$

Für die Masse der Quelle (z.B. eines Hammers eines Normhammerwerks) bedeutet dies unter Verwendung von Gl. (40):

$$m_M = \frac{1}{M^3} \frac{\rho_M}{\rho_O} m_O. \quad (43)$$

Eine Original-Hammermasse von 500 g ist demnach auf 0,5 g im Modell zu reduzieren, wenn die Materialien im Original und im Modell ähnliche Dichten aufweisen und ein Maßstab $M = 10$ verwendet wird. Dies erscheint auch dadurch plausibel, dass sich eine Masse wie ein Volumen skalieren sollte, wenn Dichteänderungen vernachlässigt werden.

Wird die Quelle dagegen durch ein Federverhalten mit der Steifigkeit s bestimmt, so ist ihre Impedanz

$$Z_Q = \frac{s}{j\omega}. \quad (44)$$

Für diesen Fall liefert die Modellierung eine Federsteifigkeit

$$s_M = s_O \frac{1}{M} \frac{\rho_M}{\rho_O}. \quad (45)$$

Eine Steifigkeit ist also lediglich um den Modellmaßstab zu verringern. Ein ähnliches Ergebnis erhält man für die Steifigkeit einer elastischen Zwischenlage - etwa eines schwimmenden Estrichs - mit der Dicke d , der Fläche S und dem Elastizitäts-Modul E

$$s = E \frac{S}{d}. \quad (46)$$

Die Fläche skaliert mit $1/M^2$, die Dicke mit $1/M$, so dass für die Steifigkeit gilt

$$s_M = \frac{1}{M} \frac{E_M}{E_O} s_O. \quad (47)$$

Interessant sind nun noch Betrachtungen über die Energie-, Leistungs- und Feldgrößen. Meist werden Relativmessungen durchgeführt, bei denen das Verhältnis zweier Größen gebildet wird, etwa bei der Schalldämmung oder bei Impedanzen. Diese Verhältnisse werden im Modell auch in ihrer Größe richtig wiedergegeben. Für eine Schalldämmung gilt z.B. unterhalb der Koinzidenzfrequenz

$$R = 10 \log(f m'') \text{ dB} - 45 \text{ dB}. \quad (48)$$

Da f mit M und m'' mit $1/M$ skaliert, sind die Schalldämm-Maße im Modell und im Original bei Einhaltung aller Skalierungsbedingungen gleich.

Beim Trittschall werden hingegen Absolutwerte ermittelt. Die Anregung erfolgt durch eine aus 4 cm Höhe frei fallende Masse von 500 g. Die im Anregungskörper gespeicherte Energie beträgt

$$E = \frac{m}{2} v^2 = m g h, \quad (49)$$

mit der Masse m , der Erdbeschleunigung g und der Fallhöhe h . Wird dieser Prozess im Modellmaßstab nachgebildet, so ergibt sich bei Vernachlässigung von Dichteunterschieden zwischen Modell- und Originalmaterial

$$\frac{E_M}{E_O} = \frac{m_M h_M}{m_O h_O} = \frac{1}{M^4}, \quad (50)$$

da die Masse mit $1/M^3$ und die Höhe mit $1/M$ skaliert. Für die Leistung bedeutet dies

$$\frac{P_M}{P_O} = \frac{E_M}{t_M} \frac{t_O}{E_O} = \frac{1}{M^3}, \quad (51)$$

wobei verwendet wurde, dass sich die Zeit t umgekehrt proportional zur Frequenz skaliert. Die von einer schwingenden Platte abgestrahlte Luftschall-Leistung P ergibt sich aus der mittleren Plattenschnelle v , der Plattenfläche S , dem Abstrahlgrad σ und der Schallkennimpedanz für Luft ρc

$$P = \rho c S \overline{v^2} \sigma. \quad (52)$$

Der Abstrahlgrad ergibt sich im Wesentlichen aus dem Verhältnis von Luft- zu Körperschallwellenlänge. Da dieses Verhältnis im Original und im Modell gleich ist, folgt

$$\sigma_M = \sigma_O. \quad (53)$$

Da die Schallkennimpedanz im Modell und im Original unverändert bleibt, beträgt das Verhältnis der Leistungen

$$\frac{P_M}{P_O} = \frac{S_M}{S_O} \frac{\overline{v_M^2}}{\overline{v_O^2}} \quad (54)$$

Unter Verwendung der Beziehung (51) folgt für das Verhältnis der mittleren Plattenschnellen schließlich

$$\overline{v_M^2} = \overline{v_O^2} \frac{1}{M}. \quad (55)$$

Bei maßstäblicher Modellierung der Anregung ist die Schnelle im Modell demnach um den Maßstabsfaktor kleiner als im Original. Die Luftschalleistung im Diffusfeld berechnet sich aus dem mittleren Schalldruck p und der äquivalenten Absorptionsfläche A

$$P = \frac{\overline{p^2}}{\rho c} \frac{A}{4}. \quad (56)$$

Da sich die äquivalente Absorptionsfläche mit $1/M^2$ und die Leistung mit $1/M^3$ skaliert, ergibt sich der mittlere Diffusfeld-Schalldruck ganz analog zur mittleren Plattenschnelle

$$\overline{p_M^2} = \overline{p_O^2} \frac{1}{M}. \quad (57)$$

Die Körperschall-Leistung in einer Platte ergibt sich aus der mittleren Plattenschnelle v , der Kreisfrequenz ω , der Plattenmasse m und dem Verlustfaktor η

$$P = \overline{v^2} \eta \omega m. \quad (58)$$

Die mittleren Plattenschnellen im Modell sind damit auch durch die Verlustfaktoren im Original und im Modell beeinflusst

$$\overline{v_M^2} = \overline{v_O^2} \frac{1}{M} \frac{\eta_O}{\eta_M}. \quad (59)$$

Abschließend lässt sich feststellen, dass die Feldgrößen Schalldruck und Schallschnelle im Modell um den Modellmaßstab niedriger liegen als im Original. Voraussetzung hierfür ist eine korrekte Modellierung der Anregung und auch der beteiligten Luft- und Körperschallfelder.

6.3 Realisierung eines Trittschall – Modellprüfstands

Aufbauend auf den Skalierungsbedingungen wurde an der PTB im Rahmen einer Diplomarbeit [He09] ein Modellprüfstand zur Untersuchung von Trittschallphänomenen aufgebaut. Er besteht aus einem Empfangsraum, dessen Seitenwände modular aufgebaut sind, so dass sehr unterschiedliche Raumabmessungen bei konstanter Raumhöhe realisiert werden können (Bild 31).

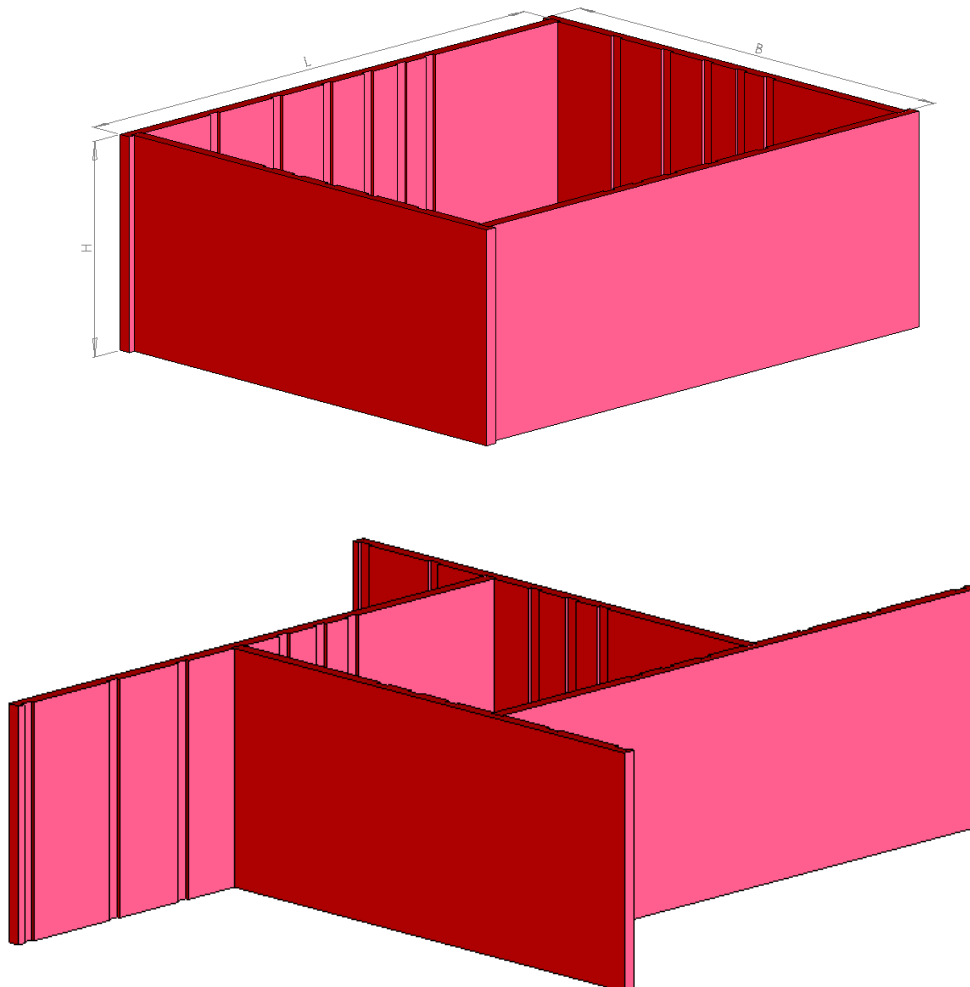


Bild 31 Aufbau des Empfangsraums zur Realisierung unterschiedlicher Abmessungen aus [He09]

Aus praktischen Erwägungen heraus wurde ein Skalierungsmaßstab von 1:5 gewählt. Die Abmessungen der untersuchten Decken liegen – auf den Originalmaßstab zurückgerechnet – zwischen 8 und 61 m² (Tabelle 8). Damit sind sie teilweise erheblich größer bzw. kleiner als übliche Prüfstandsdecken, die ca. 20 m² groß sind.

Tabelle 8 Verwendete Geometrieparameter für die Modellmessungen

| | Modell | | | | | Original | | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------------------|----------------------------|
| | <i>l</i> m | <i>b</i> m | <i>h</i> m | <i>S</i> m ² | <i>V</i> m ³ | <i>l</i> m | <i>b</i> m | <i>h</i> m | <i>S</i> m ² | <i>V</i> m ³ |
| 1 | 1,73 | 1,41 | 0,66 | 2,44 | 1,61 | 8,65 | 7,05 | 3,30 | 60,98 | 201,24 |
| 2 | 1,41 | 1,15 | 0,66 | 1,62 | 1,07 | 7,05 | 5,75 | 3,30 | 40,54 | 133,77 |
| 3 | 1,15 | 0,94 | 0,66 | 1,08 | 0,71 | 5,75 | 4,70 | 3,30 | 27,03 | 89,18 |
| 4 | 0,94 | 0,77 | 0,66 | 0,72 | 0,48 | 4,70 | 3,85 | 3,30 | 18,10 | 59,71 |
| 5 | 0,77 | 0,63 | 0,66 | 0,49 | 0,32 | 3,85 | 3,15 | 3,30 | 12,13 | 40,02 |
| 6 | 0,63 | 0,51 | 0,66 | 0,32 | 0,21 | 3,15 | 2,55 | 3,30 | 8,03 | 26,51 |

Die Wände des Prüfstands bestehen aus 38 mm dicken mitteldichten Faserplatten. Die untersuchten Decken wurden auf die Seitenwände aufgelegt, wobei ein umlaufendes Hohlgummiprofil als Dichtung diente (Bild 32). Die Nachhallzeit im Empfangsraum wurde durch spezielle Absorber auf die nach Norm erforderliche Nachhallzeit zwischen 0,2 und 0,4 s im Modellmaßstab eingestellt (Bild 35, Bild 36). Es kommt zu geringfügigen Abweichungen von der Normvorgabe, die vor allem durch die zu große Luftabsorption bei den hohen Frequenzen verursacht werden.

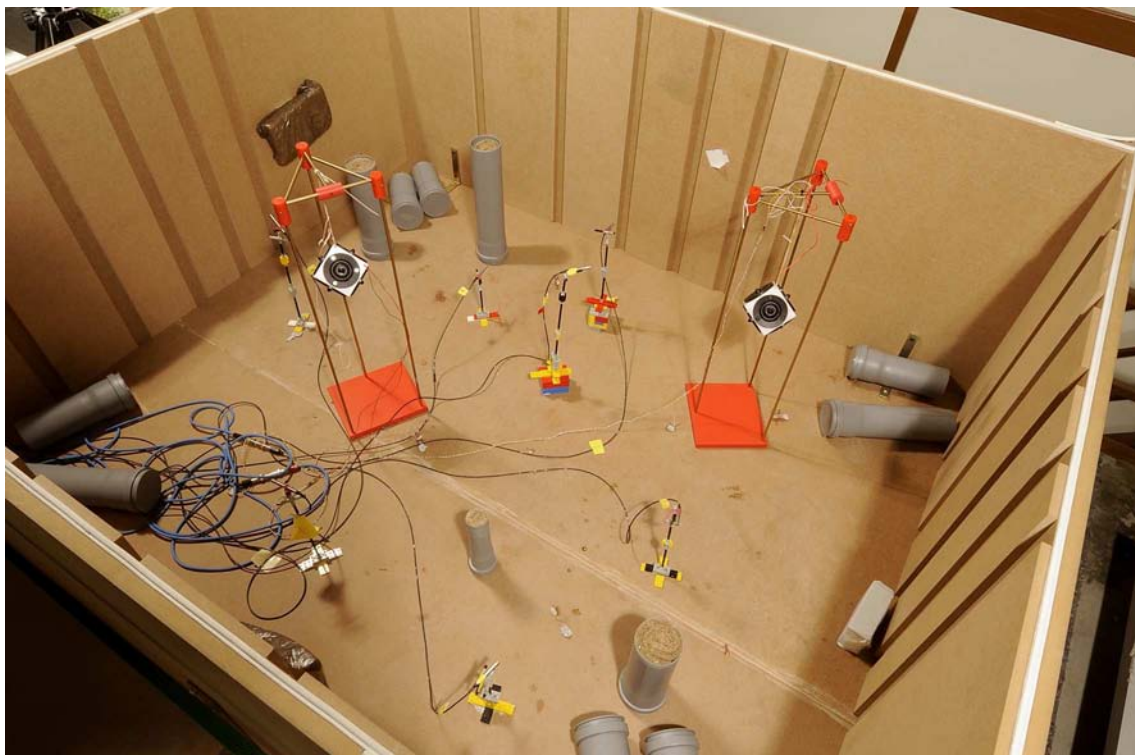


Bild 32 Blick in den Empfangsraum des Trittschall-Modellprüfstands [He09]

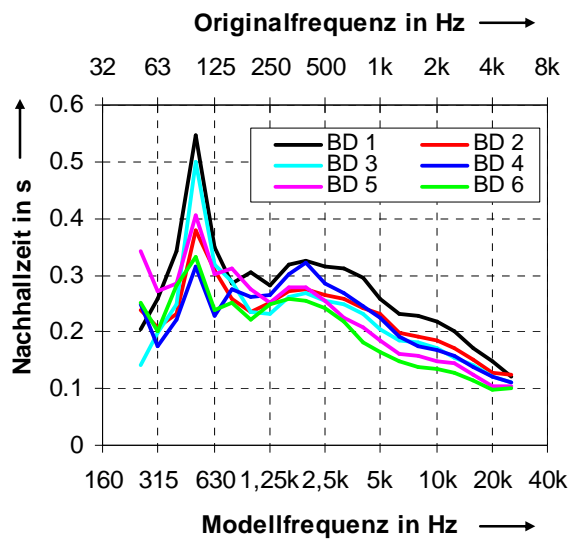


Bild 33 Nachhallzeiten im Empfangsraum bei der Messung der Betondecken

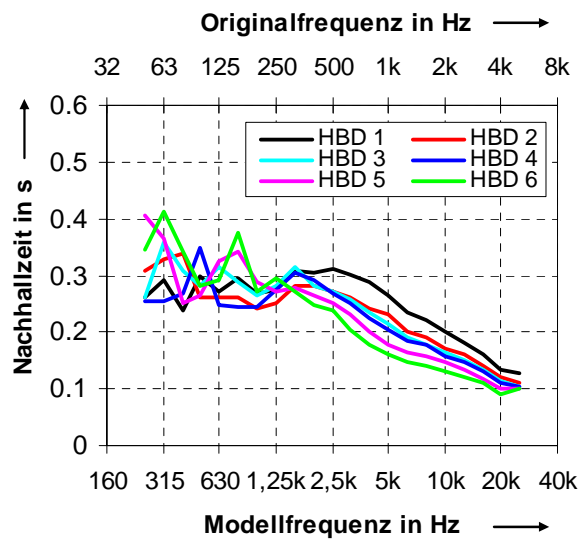


Bild 34 Nachhallzeiten im Empfangsraum bei der Messung der Holzbalkendecken

Es kamen eine homogene Betondecke und eine Holzbalkendecke zum Einsatz. Die unterschiedlich großen Betonplatten waren dabei 40 mm dick. Lediglich die größte Platte musste aus statischen Gründen 50 mm Dicke aufweisen. Die Holzbalkendecken wurden in Anlehnung an [DIN EN ISO 140-11] gefertigt. Die Unterseite besteht aus 3 mm dicken Hartfaserplatten, auf denen Kanthölzer von 25X35 mm angebracht sind, die die Deckenbalken modellieren. Die Oberseite besteht aus 4 mm dicken mitteldichten Faserplatten. Die Hohlräume sind mit Hanffasern locker aufgefüllt.

Es wurden zwei prinzipiell unterschiedliche Messreihen durchgeführt. Bei der ersten war die Deckengröße so gewählt, dass sie jeweils genau auf die Prüföffnung passt (Bild 35). Dieser für Prüfstände übliche Normalfall wurde sowohl für die Holzbalken- als auch für die Betondecke untersucht, wobei die Decken eines Typs sich jeweils nur um ihre Größe unterscheiden.

In einer zweiten Messreihe wurden dann die verschieden großen Betondecken auf den kleinsten Empfangsraum gelegt (Bild 36). Dies entspricht der Situation im Skelettbau, wo eine massive Geschossdecke mehrere Räume überspannt.

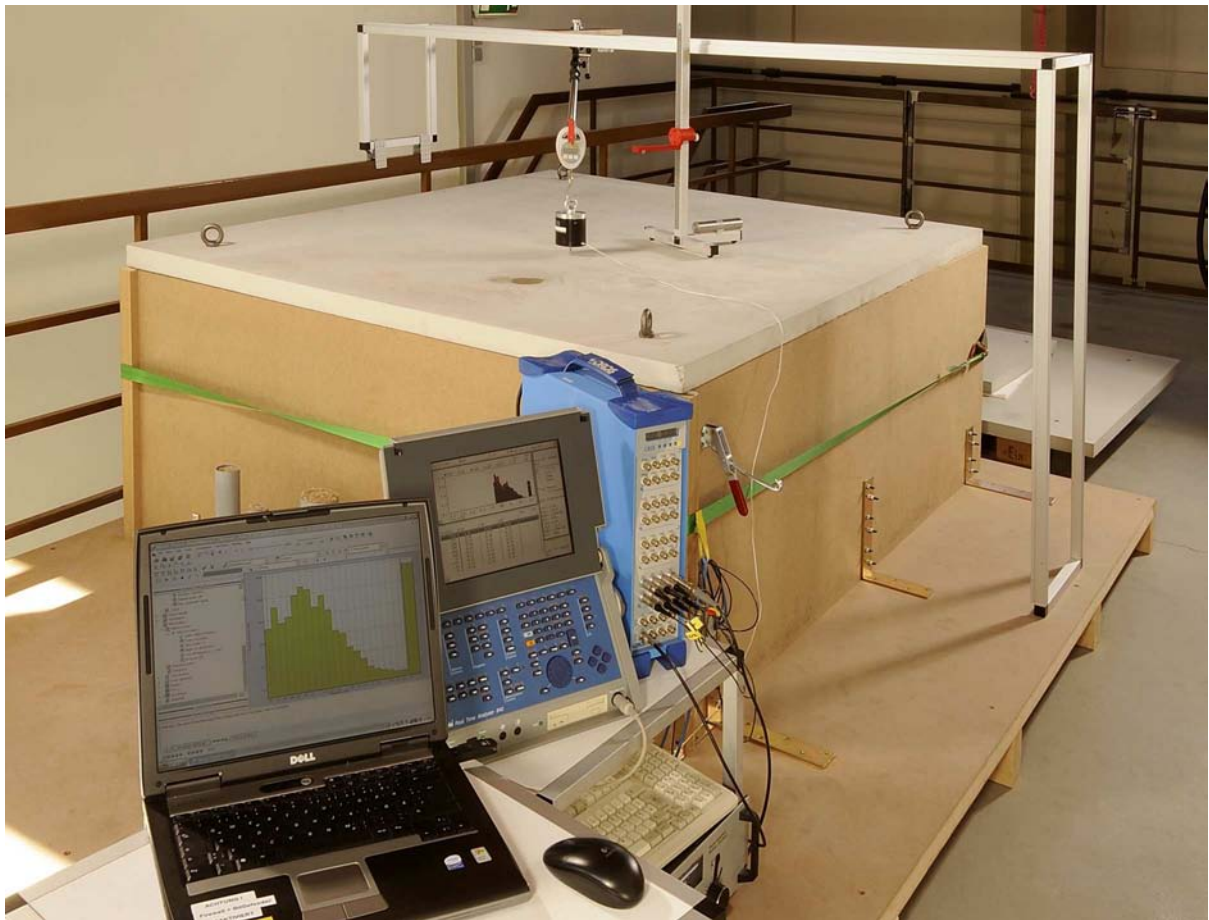


Bild 35 Gesamtansicht des realisierten Trittschall-Modellprüfstands [He09]



Bild 36 Realisierter Trittschall-Modellprüfstand aus [He09] in der Variante Skelettbau (Rohdecke größer als die Empfangsraum-Grundfläche)

6.4 Verwendete Anregung

Zu Beginn der Arbeiten wurden zwei verschiedene Möglichkeiten in Betracht gezogen, die Anregung durch das Hammerwerk im Modell korrekt zu modellieren [He09]. Bei der ersten Variante handelt es sich um einen elektrodynamischen Schwingerreger, der auf die Deckenplatte mit Hilfe einer Waage mit einem konstanten Anpressdruck aufgesetzt wird (Bild 37). Diese Art der Anregung bietet den Vorteil, dass verschiedene Signale verwendet werden können, die der tatsächlichen Anregung gut nachempfunden werden können. Der Nachteil ist allerdings, dass die Impedanzverhältnisse nicht korrekt modelliert werden. Die schwingende Masse liegt in der Größenordnung von 30 g und ist damit erheblich größer als die beim Modellmaßstab von 1:5 zu verwendende Masse von 4 g. Da sich außerdem gezeigt hatte, dass das Hammerwerk ein sehr dichtes Linienspektrum mit nur 2 Hz Linienabstand bzw. sogar ein breitbandiges Spektrum emittiert (Bild 23-Bild 28), wurde die zweite Anregungsart für die Untersuchungen verwendet. Dabei wird eine 4 g schwere Metallkugel aus einem Apparat fallen gelassen (Bild 37). Um zur gleichen räumlichen Mittelung wie beim Hammerwerk mit seinen fünf auf einer Linie liegenden Hämmern zu gelangen, wurde jede Hammerwerksposition durch fünf Kugelfall-Positionen repräsentiert, die geometrisch wie die 5 Hämmer angeordnet wurden.



Bild 37 Verwendete Anregungen für die Modellmessungen aus [He09]

Die verwendete Metallkugel weist gegenüber den Hämmern des Hammerwerks eine ganz andere Krümmung auf. Dieser Unterschied besteht trotz einer Umrechnung in den Modellmaßstab, da die Krümmung der Modellkugel der einer 500 g schweren Stahlkugel im Original entspricht. Die Krümmung der Hammerköpfe ist wesentlich kleiner. Die Geometrie des Kontakts ist für die Wirkung des Hammerwerks wesentlich. Die zugehörige Kontaktsteife muss im allgemeinen als nichtlinear

angenommen werden. Daher stellte sich die die Frage, ob es sich bei den Stößen der Modellkugel überhaupt um lineare Vorgänge handelt. Um dies zu überprüfen, wurde die Kugel aus verschiedenen Höhen auf eine Modell-Betondecke fallen gelassen und der zugehörige Schalldruckpegel im Empfangsraum gemessen. Hierbei stellt sich ein lineares Verhalten ein (Bild 38). Damit ist es auch möglich, zur Verbesserung der Dynamik, die Fallhöhe gegenüber der aus der Skalierung resultierenden Höhe von 8 mm deutlich zu vergrößern.

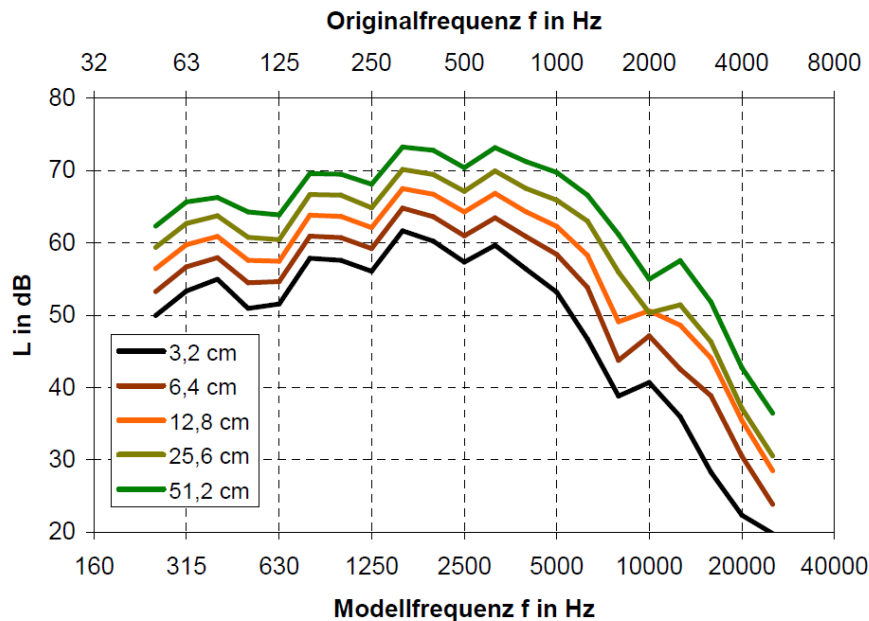


Bild 38 Schalldruckpegel im Empfangsraum bei verschiedenen Fallhöhen der Kugel aus [He09]

Ein weiterer erheblicher Unterschied des Kugelfalls zum Normhammerwerk besteht darin, dass es sich um ein einzelnes Ereignis handelt und nicht um einen stationären Vorgang. Daher wurde der mit einem Kugelfall verbundene Energiepegel L_E als charakterisierende Größe verwendet. Er ergibt sich aus dem Absorptionsvermögen im Empfangsraum A und der Messzeit T zu

$$\begin{aligned}
 L_E &= 10 \lg \frac{\int_0^T p^2(t) dt}{p_0^2 T_0} \text{ dB} + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB} \\
 &= 10 \lg \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}{p_0^2} \frac{T}{T_0} \text{ dB} + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB}
 \end{aligned}
 \tag{60}$$

und kann schließlich als Funktion des äquivalenten Dauerschallpegels angegeben werden

$$L_E = L_{eq} + 10 \lg \frac{T}{T_0} \text{ dB} + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB} .
 \tag{61}$$

Um aus diesem Energiepegel einen Norm-Trittschallpegel zu berechnen, müssen verschiedene Korrekturen eingerechnet werden. Die erste betrifft die Tatsache, dass im stationären Fall der Anregung durch ein Hammerwerk 50 Kugelfallereignisse pro Sekunde im Modellmaßstab auftreten. Außerdem muss die tatsächliche Fallhöhe der Kugel H und gemäß der Skalierungsgesetze auch der Modellmaßstab M berücksichtigt werden. Damit ergibt sich der Norm-Trittschallpegel zu

$$L_n = L_{eq} + 10 \lg \frac{T}{T_0} \text{ dB} + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB} - 10 \lg \frac{H}{H_0} \text{ dB} + 10 \lg 50 \text{ dB} + 10 \lg M \text{ dB} , \quad (62)$$

mit dem gemessenen äquivalenten Dauerschalldruckpegel L_{eq} , der Messzeit T , der äquivalenten Absorptionsfläche im Empfangsraum A und den oben genannten Größen. Die Bezugswerte sind

$$\begin{aligned} T_0 &= 1 \text{ s} \\ A_0 &= \frac{10 \text{ m}^2}{M^2} = \frac{10 \text{ m}^2}{25} = 0,4 \text{ m}^2 \quad . \\ H_0 &= \frac{40 \text{ mm}}{M} = \frac{40 \text{ mm}}{5} = 8 \text{ mm} \end{aligned} \quad (63)$$

Die Messzeiten wurden in einem Optimierungsprozess so eingestellt, dass der Energiegehalt des Kugelfalls vollständig erfasst wird, der zweite Aufprall der Kugel aber unberücksichtigt bleibt. Bei den vorliegenden Gegebenheiten liegt diese Zeit bei 300 ms. Als Fallhöhe wurde immer 256 mm verwendet. Die äquivalente Absorptionsfläche wurde aus Nachhallzeitmessungen bestimmt.

6.5 Test auf Wiederholbarkeit

Für die späteren Auswertungen ist es erforderlich, die Wiederhol-Standardabweichung der Ergebnisse zu kennen, die am Modellprüfstand ermittelt werden. Daher wurden an einer Holzbalken- und an einer Betondecke 5 Wiederholungsmessungen durchgeführt. Es zeigt sich eine hervorragende Wiederholbarkeit der Norm-Trittschallpegel (Bild 39, Bild 40), so dass die im Weiteren erzielten Messergebnisse als sehr zuverlässig eingestuft werden können.

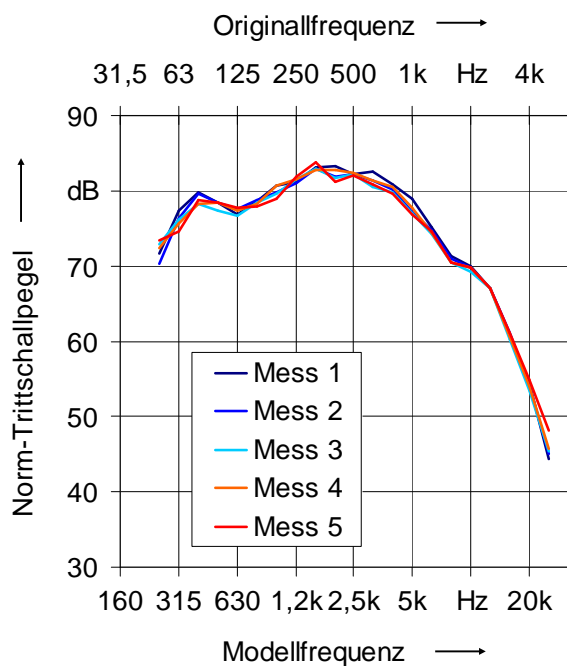


Bild 39 Norm-Trittschallpegel nach Gl. (62) aus fünf Wiederholungsmessungen an einer Holzbalkendecke gemessen mit dem Kugelfallapparat

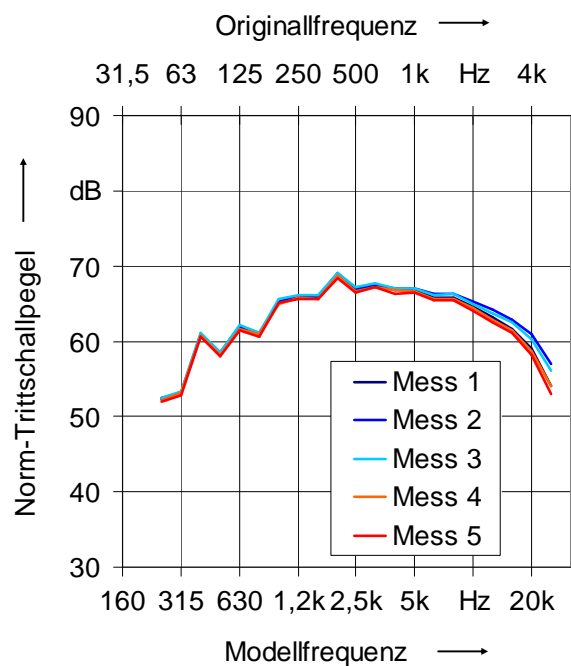


Bild 40 Norm-Trittschallpegel nach Gl. (62) aus fünf Wiederholungsmessungen an einer Betondecke gemessen mit dem Kugelfallapparat

6.6 Ergebnisse

Die Norm-Trittschallpegel der unterschiedlich großen Holzbalkendecken weisen eine äußerst geringe Streuung auf (Bild 41). Selbst bei den tiefen Frequenzen sind die auftretenden Streuungen sehr klein. Des Weiteren lässt sich feststellen, dass der spektrale Verlauf und auch die absolute Größe der im Modell ermittelten Norm-Trittschallpegel sehr gut mit der in [DIN EN ISO 140-11] festgelegten Referenzkurve, aber auch mit typischen einfachen Holzbalkendecken, übereinstimmt (Bild 42). Letztere wurden aus [RBH08] übernommen und sind nur solche Holzbalkendecken, die in etwa dem hier gewählten Deckenaufbau entsprechen. Insbesondere verfügen diese Decken über keine besonderen Schallschutzmaßnahmen. Der Modellprüfstand liefert demnach Ergebnisse, die mit der Realität sehr gut übereinstimmen. Der Norm-Trittschallpegel von Holzbalkendecken kann als unabhängig von der Deckengröße angenommen werden.

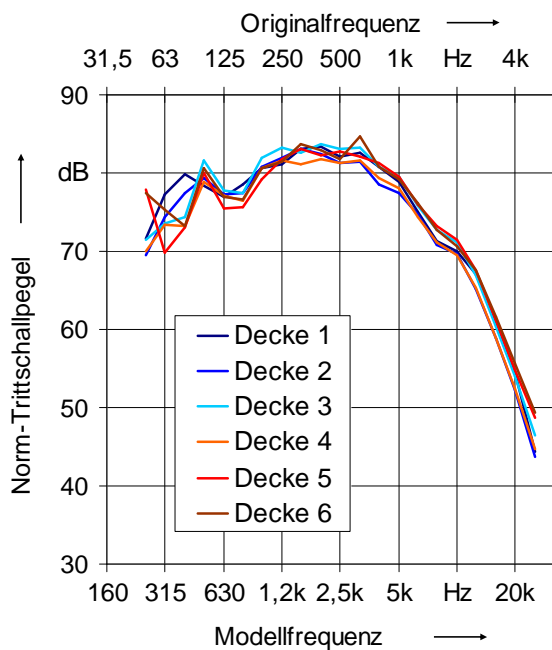


Bild 41 Norm-Trittschallpegel von sechs unterschiedlich großen Holzbalkendecken gemessen mit dem Kugelfallapparat

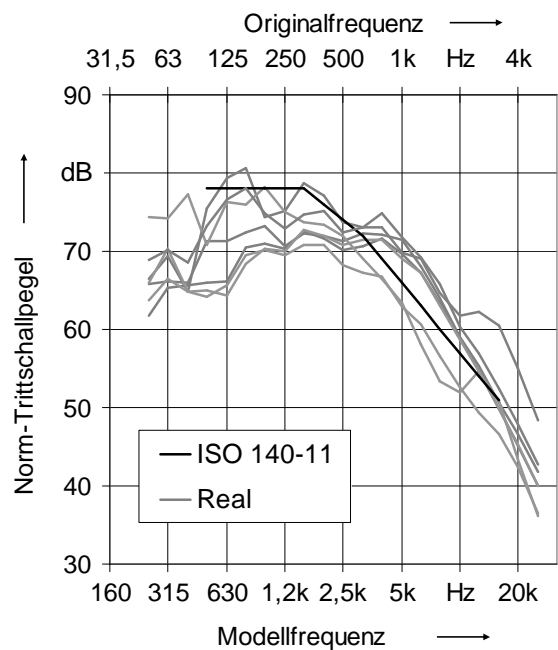


Bild 42 Norm-Trittschallpegel von realen einfachen Holzbalkendecken aus einem Prüfstand und aus Altbauten [RBH08] sowie aus [DIN EN ISO 140-11]

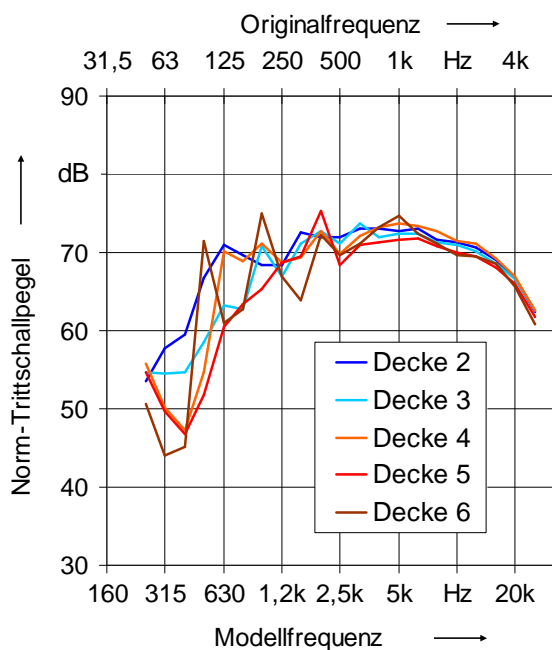


Bild 43 Norm-Trittschallpegel von fünf unterschiedlich großen Betondecken gemessen mit dem Kugelfallapparat

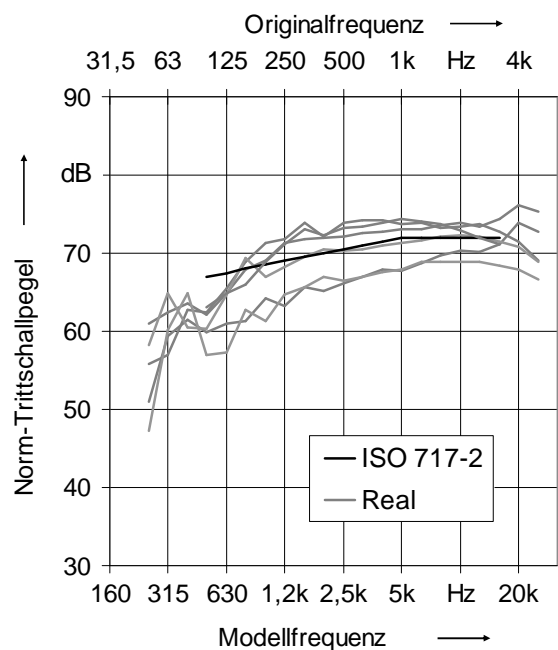


Bild 44 Norm-Trittschallpegel von Rohbetondecken aus realen Prüfständen und Bezugsdecke aus [DIN EN ISO 717-2]

Bei den unterschiedlich großen Betondecken ergeben sich bei den tiefen und mittleren Frequenzen deutlich größere Streuungen als bei den Holzbalkendecken (Bild 43). Je kleiner Decke und Empfangsraum werden (Tabelle 8), desto stärker sind die Schwankungen ausgeprägt. Die Ursache liegt in der geringen Modendichte, vor allem im Körperschallfeld auf der Betonplatte. Bei den höheren Frequenzen liefern die unterschiedlich großen Decken praktisch identische Norm-Trittschallpegel (Bild 43). Ein genereller Trend über die Größenabhängigkeit des Norm-Trittschallpegels lässt sich aus den Terzwerten nicht ablesen. Wie bei den Holzbalkendecken werden auch bei den Betondecken die Werte aus realen Prüfständen bzw. aus der Norm sehr gut durch die Modellmessungen angenähert (Bild 44). Lediglich bei den sehr hohen Frequenzen knickt der im Modell gemessene Norm-Trittschallpegel untypisch ab, was durch die Unterschiede in der Kontaktsteife zu erklären ist.

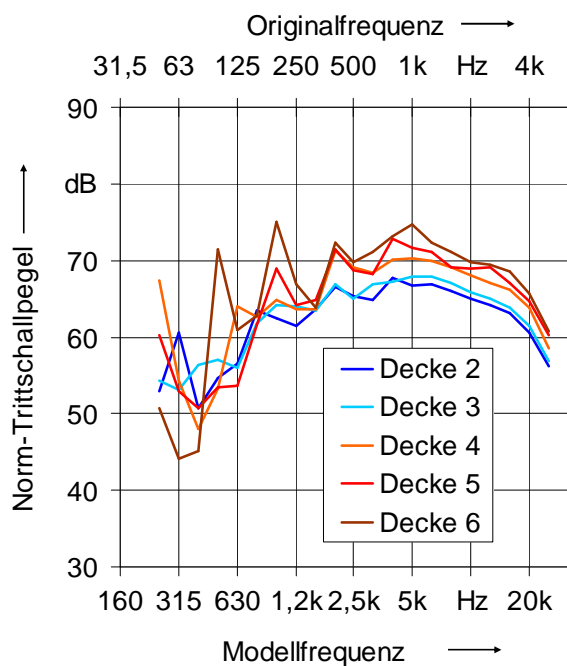


Bild 45 Norm-Trittschallpegel von fünf unterschiedlich großen Betondecken gemessen mit dem Kugelfallapparat, Senderraumvolumen blieb konstant (Skelettbau)

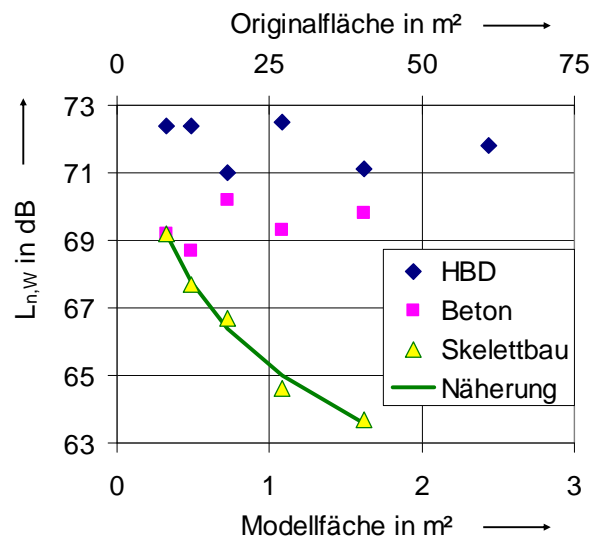


Bild 46 Bewertete Norm-Trittschallpegel der unterschiedlich großen Beton- und Holzbalkendecken sowie Näherung (64) für den Skelettbau

Werden nun verschieden große Betondecken auf den kleinsten Empfangsraum gelegt, so zeigt sich ein eindeutiger Trend (Bild 45). Je größer die Decke wird, desto geringer wird der Norm-Trittschallpegel. Außerdem reduzieren sich die tieffrequenten Schwankungen. Die Erklärung ist, dass sich bei konstantem Energieeintrag die Energie in der Betonplatte auf eine immer größere Fläche verteilt. Die Energiedichte und damit die mittlere Schnelle sinken. Der Empfangsraum greift nur den Anteil der Energie ab, der von dem Deckenanteil abgestrahlt wird, der über dem Empfangsraum liegt. Eine idealisierte Rechnung würde für diesen Mechanismus eine Reduktion des Norm-Trittschallpegels um 3 dB pro Flächenverdopplung prognostizieren. Für die bewerteten Norm-Trittschallpegel (Bild 46) wurde näherungsweise ein Zusammenhang von

$$L_{n,w}(S_1) = L_{n,w}(S_2) - 8 \lg \frac{S_2}{S_1} \text{ dB} \quad (64)$$

ermittelt. Dies entspricht einer Abnahme des bewerteten Schalldruckpegels von 2,4 dB pro Verdopplung der Fläche.

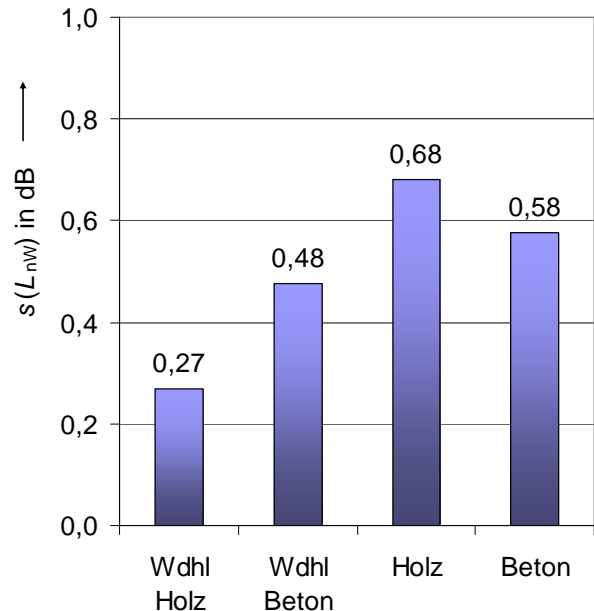
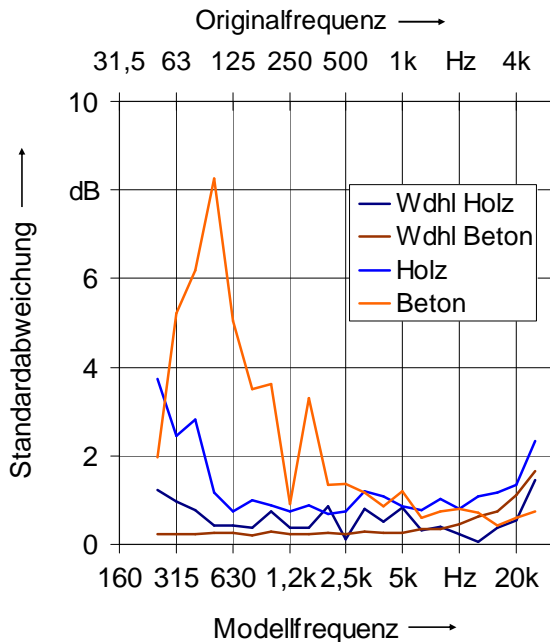


Bild 47 Standardabweichungen der Norm-Trittschallpegel von unterschiedlich großen Holzbalken- und Betondecken und zugehörige Wiederhol-Standardabweichungen (ohne Skelettbau)

Bild 48 Standardabweichungen der bewerteten Norm-Trittschallpegel von unterschiedlich großen Holzbalken- und Betondecken und zugehörige Wiederhol-Standardabweichungen (ohne Skelettbau)

Die bewerteten Norm-Trittschallpegel zeigen für die anderen Messergebnisse (Grundfläche = Deckenfläche) keinen systematischen Zusammenhang mit der Deckengröße (Bild 46). Der Größeneinfluss kann somit nur statistisch berücksichtigt werden. Bei der Holzbalkendecke liegen die beobachteten Standardabweichungen über der Wiederhol-Standardabweichung und in etwa bei der in-situ Standardabweichung für Norm-Trittschallpegel (Bild 47, Bild 11). Bei der Betondecke sind die Standardabweichungen vor allem bei mittleren und tiefen Frequenzen erheblich größer. Bei den Einzahlwerten sind die Standardabweichungen insgesamt relativ gering (Bild 48). Die Werte für die Wiederhol-Standardabweichung liegen etwas unter dem Wert von 0,5 dB, der für die DIN 4109 vorgeschlagen wird. Die Standardabweichungen für die verschieden großen Decken liegen nur unwesentlich darüber. Damit machen sie nur einen geringen Teil der für die DIN 4109 vorgeschlagenen 1,5 dB für die Vergleichs-Standardabweichung aus. Es ist somit nicht erforderlich, die Bauteilgröße als separaten Unsicherheitsbeitrag oder als systematischen Einfluss auf den Norm-Trittschallpegel zu berücksichtigen. Ausgenommen ist hier lediglich der Fall, dass eine Massivdecke mehrere darunter liegende Räume überspannt. Falls die Decke in diesem Fall schwingungstechnisch nicht durch die Wände beeinflusst wird, sinkt der Norm-Trittschallpegel mit der

Deckengröße. Ist der Deckenanschluss dagegen unklar, so entsteht eine erhebliche Unsicherheit, die je nach Deckengröße mehrere dB betragen kann.

7. Unsicherheiten bei der Prognose

7.1 Prognoseverfahren

Die Prognose des bewerteten Norm-Trittschallpegels kann nach [DIN 4109-1] oder nach [DIN EN 12354-2] erfolgen. Beide Verfahren beziehen sich auf massive Decken. Vereinfachend wird hier nur die Übertragung in einen unter der Decke liegenden Raum betrachtet.

Der Rechenwert des bewerteten Norm-Trittschallpegels $L'_{n,w,R}$ ergibt sich nach [DIN 4109-1] aus dem Rechenwert des äquivalenten bewerteten Norm-Trittschallpegels $L_{n,w,eq,R}$ und dem Rechenwert des Trittschallverbesserungsmaßes $\Delta L_{w,R}$

$$L'_{n,w,R} = L_{n,w,eq,R} - \Delta L_{w,R} \quad (65)$$

Der Rechenwert des Trittschallverbesserungsmaßes ist gemäß [DIN 4109], Kapitel 6.4.2, um 2 dB gegenüber den in Prüfständen ermittelten Werten zu vermindern. Der mit Gl. (65) ermittelte Rechenwert muss zusätzlich um mindestens 2 dB unter dem Anforderungswert liegen.

Auch bei der Prognose nach dem vereinfachten Modell der [DIN EN 12354-2] ergibt sich der bewertete Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ aus dem äquivalenten bewerteten Norm-Trittschallpegel $L_{n,w,eq}$ der Rohdecke und der bewerteten Trittschallminderung der Deckenauflage ΔL_w

$$L'_{n,w} = L_{n,w,eq} - \Delta L_w + K \quad (66)$$

Zusätzlich wird jedoch ein Korrekturterm K eingeführt, der die Flankenübertragung summarisch erfasst. Laut einer Tabelle in [DIN EN 12354-2] kann dieser Term Werte zwischen 0 und 6 dB annehmen. Vorhaltemaße sind nach [DIN EN 12354-2] nicht vorgesehen.

7.2 Zur Unsicherheit der Eingangswerte

Der bewertete äquivalente Normtrittschallpegel einer Massivdecke $L_{n,w,eq,R}$ kann aus gemessenen Norm-Trittschallpegeln nach dem in Anhang B der [DIN EN ISO 717-2] angegebenen Verfahren ermittelt werden. Dabei wird die Trittschallminderung einer genormten Deckenauflage in Terzen auf den gemessenen Norm-Trittschallpegel angerechnet. Eine anschließende Bewertung des summarischen Spektrums bei Berücksichtigung der bewerteten Trittschallminderung der genormten Deckenauflage liefert dann ein Maß dafür, wie stark eine Rohdecke durch die genormte Auflage verbesserungsfähig ist. Dieses Maß ist der bewertete äquivalente Normtrittschallpegel. Er ergibt sich in guter Übereinstimmung zwischen [DIN 4109-1] und [DIN EN 12354-2] aus der flächenbezogenen Masse m' [KSF06]

$$L_{n,w,eq,R} = 164 \text{ dB} - 35 \lg \frac{m'}{1 \text{ kg/m}^2} \text{ dB} \quad (67)$$

Die gute Übereinstimmung zwischen [DIN 4109-1] und [DIN EN 12354-2] überrascht, da sich erstere Werte mit und letztere ohne Flankenübertragung verstehen. Trotzdem kann von

$$L_{n,w,eq,R,4109-1} \approx L_{n,w,eq,12354-2} \cdot \quad (68)$$

ausgegangen werden.

Um die mittlere Kurve (67) herum streuen die realen Messwerte um ca. $\pm 3,0$ dB [MM09]. Bei Annahme einer Rechteckverteilung [GUM] entspricht dies einer Standard-Unsicherheit von 1,7 dB.

Setzt man für die Messung des Einzahlwerts eine Unsicherheit von 1,5 dB an (Vergleichs-Standardabweichung aus Tabelle 5, S. 18) und fügt dem eine Produktstreuung von 1,0 dB hinzu, so gelangt man zu einer Unsicherheit von 1,8 dB für den bewerteten Norm-Trittschallpegel einer massiven Rohdecke. Die beobachtete Spanne von $\pm 3,0$ dB lässt sich in ihrer Größenordnung also sehr gut durch die Summe der auftretenden Unsicherheiten beschreiben.

Die bewertete Trittschallminderung eines schwimmenden Estrichs ergibt sich aus der Steifigkeit der Unterlage s' und der Flächenmasse des Estrichs m' . In der [DIN EN 12354-2] sind im Anhang C Diagramme angegeben, während in der [DIN 4109-1] Tabellenwerte enthalten sind. Für heute übliche Massen von Estrichplatten stimmen die Rechenwerte der bewerteten Trittschallminderungen nach [DIN 4109-1] und nach [DIN EN 12354-2] gut überein [KSF06]

$$\Delta L_{w,R,4109-1} \approx \Delta L_{w,12354-2} \cdot \quad (69)$$

Auch diese Übereinstimmung ist unerwartet, da die Rechenwerte in der [DIN 4109-1] um 2 dB gegenüber Labormesswerten vermindert sind.

Des Weiteren wurde in [KSF06] untersucht, ob die so berechneten Werte eine gute Beschreibung realer Estriche darstellen. Die mittlere Abweichung Δ

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta L_{w,Mess,i} - \Delta L_{w,12354-2,i}) \quad (70)$$

nimmt je nach Estrichtyp Werte zwischen 2,5 und 4,5 dB an (Tabelle 9). Damit liegen die gemessenen bewerteten Trittschallminderungen im Mittel deutlich über den nach [DIN EN 12354-2] prognostizierten Werten.

Die Standardabweichungen der Differenz zwischen Messung und Rechnung σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta L_{w,Mess,i} - \Delta L_{w,12354-2,i})^2} \quad (71)$$

liegen im Labor für Zement- und Calciumsulfatestriche bei nur 1,2 dB, sind also sehr gering (Tabelle 9). In den beiden anderen Fällen sind die beobachteten Standardabweichungen wesentlich größer.

Es kann angenommen werden, dass die beobachteten Standardabweichungen sich nur aus der Vergleichs-Standardabweichung für die Messung von 1,0 dB (Tabelle 5, S. 18) und der Produktstreuung zusammensetzen. Daraus lässt sich die Produktstreuung mit

$$\sigma_{repro} = \sqrt{\sigma^2 - \sigma_R^2} \quad (72)$$

berechnen. Sie kann bei Estrichen sehr große Werte annehmen. Lediglich bei den in Laboren eingebauten Zement- und Calciumsulfatestrichen ist die Produktstreuung mit ca. 0,7 dB recht gering. Für die anderen beiden Konstellationen der Tabelle 9 ergeben sich Produktstreuungen von 2,5 bzw. 3,0 dB.

Tabelle 9 Mittlere Abweichung Δ zwischen Messwerten und Rechenwerten nach [DIN EN 12354-2] der bewerteten Trittschallminderung, Standardabweichung der mittleren Abweichung [KSF06] sowie Produkt-Standardabweichungen

| | Zement- und Calciumsulfatestriche | | Gussasphalt und Trockenestriche |
|------------------|-----------------------------------|--------|---------------------------------|
| | Labor | Bau | Labor |
| Δ | 2,4 dB | 4,5 dB | 4,2 dB |
| σ | 1,2 dB | 2,7 dB | 3,2 dB |
| σ_{repro} | 0,7 dB | 2,5 dB | 3,0 dB |

7.3 Unsicherheit durch Rechnung mit Einzahlwerten

Für die Unsicherheit bei der Prognose des Normtrittschallpegels muss außerdem geklärt werden, ob nicht die Berechnung mit Einzahlwerten zu erhöhten Unsicherheiten gegenüber der physikalisch korrekteren Rechnung in Terzbändern führt. Um dies zu untersuchen, wurden 16 verschiedene Trittschallminderungen ganz unterschiedlicher Estriche (Bild 50) mit 6 verschiedenen Rohdecken kombiniert, von denen an der PTB Messwerte vorliegen (Bild 44). Die Berechnung erfolgte dabei auf zwei unterschiedlichen Wegen (Bild 49). Zum Einen erfolgte die Differenzbildung für die jeweiligen Einzahlwerte und zum Anderen wurde die Differenz in Terzen gebildet und diese Differenz nach [DIN EN ISO 717-2] bewertet.

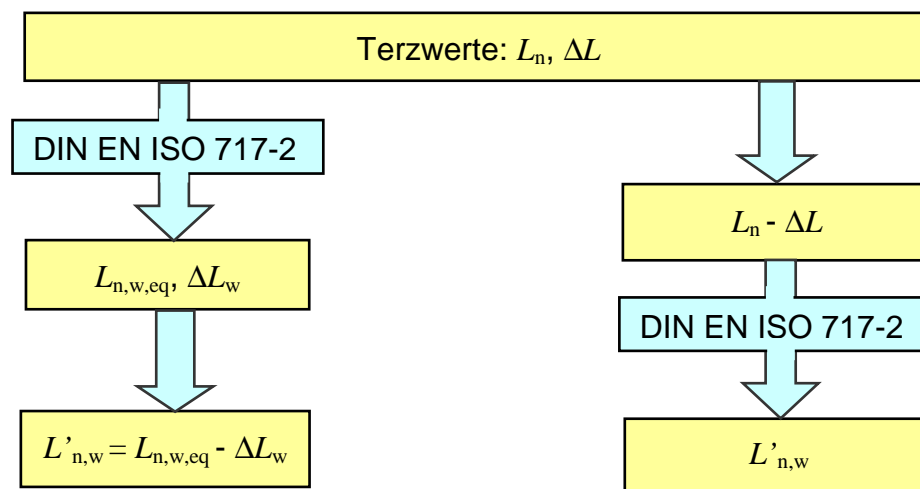


Bild 49 Berechnung des bewerteten Norm-Trittschallpegels einer Kombination aus Rohdecke und Estrich

Das Ergebnis dieser Berechnungen findet sich in Bild 51. Die nach den beiden Verfahren ermittelten bewerteten Norm-Trittschallpegel stimmen im Mittel sehr gut überein. Wenn die Referenzkurve in ganzen dB-Schritten verschoben wird, so ergibt sich eine mittlere Abweichung von nur 0,1 dB bei einer Standardabweichung von 0,9 dB. Wird die Referenzkurve dagegen in 1/10 dB-Schritten verschoben, so ergibt sich eine mittlere Abweichung von -0,4 dB bei einer Standardabweichung von 0,7 dB. Der systematische Unterschied ergibt sich daraus, dass bei jeder Einzahlwertbildung die nicht berücksichtigten Stellen abgeschnitten werden. Bei der Berechnung des bewerteten Norm-Trittschallpegels aus Einzahlwerten erfolgt eine zweimalige Bewertung, bei den Terzwerten eine einmalige Bewertung (Bild 49). Die derzeit vorgeschriebene Verschiebung in ganzen dB-Schritten ist so abgestimmt, dass beide Rechenverfahren im Mittel zum gleichen Ergebnis führen. Werden beim Bewertungsverfahren 1/10 dB –Stufen zugelassen, so macht sich die zweimalige Bewertung gegenüber der einmaligen Bewertung mit einer Verschiebung des Mittelwerts um 0,5 dB bemerkbar.

Abschließend kann der Unsicherheitsbeitrag durch die Rechnung mit Einzahlwerten als relativ klein im Vergleich zu den anderen Unsicherheitsbeiträgen eingeschätzt werden.

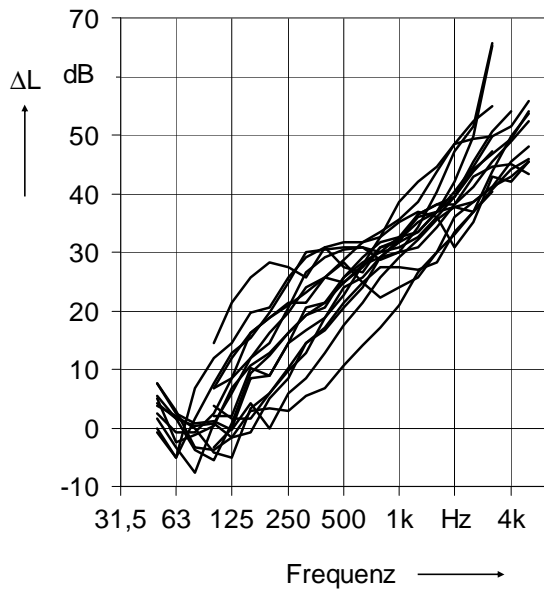


Bild 50 Trittschallminderungen verschiedener Estriche nach [MM09]

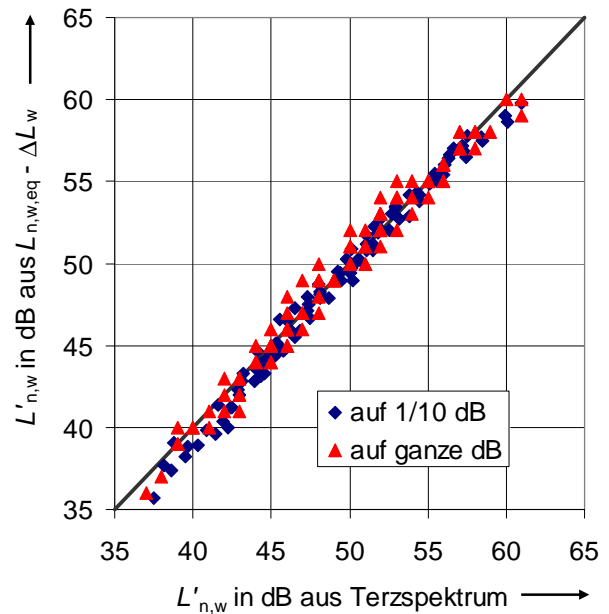


Bild 51 Berechnete bewertete Norm-Trittschallpegel aus Terzspektren und aus den Einzahlwerten

7.4 Vergleich zwischen prognostizierten und gemessenen bewerteten Norm-Trittschallpegeln

In einer umfangreichen Datensammlung aus den Jahren 2004 – 2007 [Mü08] sind insgesamt 292 Massivdecken mit Estrichen erfasst. In allen diesen Fällen wurden Kurzmessungen des Norm-Trittschallpegels durchgeführt, bei denen die Zahl der Mikrofon- und Hammerwerkspositionen gegenüber der Normvorschrift reduziert wurde. Der Autor gibt an, dass die so ermittelten Trittschallpegel im Vergleich zu den Norm-Ergebnissen eine Unsicherheit von $\pm 2,0$ dB aufweisen. Wird dies als 95%-Vertrauensbereich interpretiert, so ergibt sich hier eine zusätzliche, durch das Kurzverfahren verursachte Standard-Unsicherheit von 1,0 dB.

Für alle untersuchten Fälle wurde außerdem eine Prognose nach [DIN 4109-1] durchgeführt, wobei das Vorhaltemaß von 2 dB gleich mit eingerechnet wurde

$$L'_{n,w,Prognose} = L_{n,w,eq,R} - \Delta L_{w,R} + 2 \text{ dB} . \quad (73)$$

Etwaige Flankenübertragung blieb unberücksichtigt. Ausgewertet wurde die Differenz zwischen prognostizierten und gemessenen Norm-Trittschallpegeln

$$\delta = L'_{n,w,Prognose} - L'_{n,w,Mess} . \quad (74)$$

Diese Differenz ist sehr gut normalverteilt, was sich sowohl in der kumulativen Verteilungsfunktion (Bild 52) als auch in der Verteilungsdichte zeigt (Bild 53). Die Standardabweichung der Differenz zwischen prognostizierten und gemessenen Werten liegt bei 5,0 dB und der Erwartungswert bei 0,1 dB.

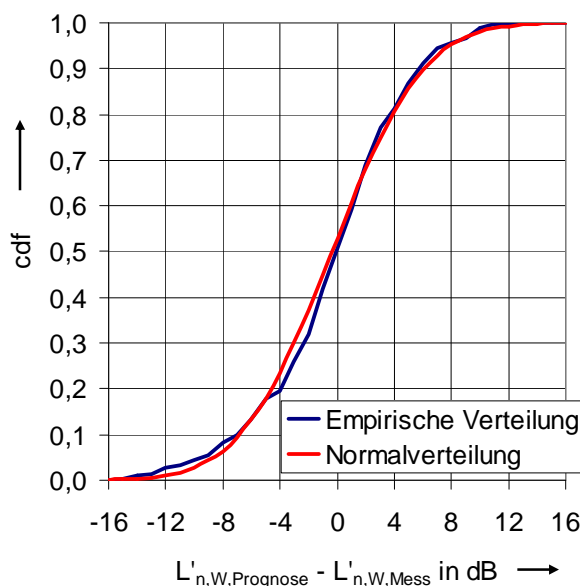


Bild 52 Kumulative Verteilungsfunktion der Abweichung zwischen berechneten und gemessenen bewerteten Norm-Trittschallpegeln aus 292 Messungen [Mü08] und ideale zugehörige Normalverteilung

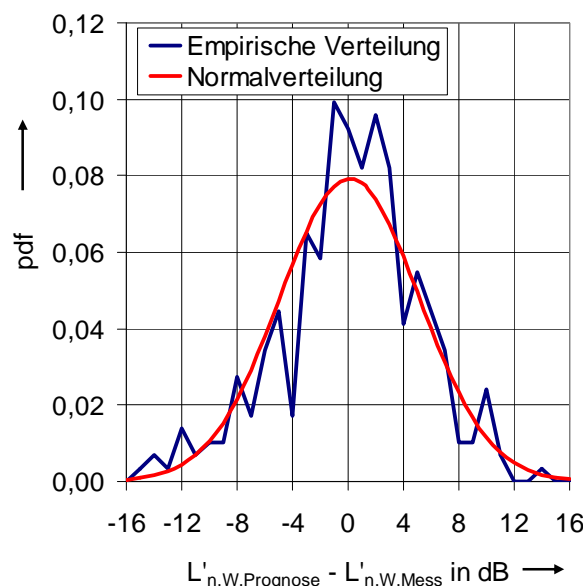


Bild 53 Verteilungsdichtefunktion der Abweichung zwischen berechneten und gemessenen bewerteten Norm-Trittschallpegeln aus 292 Messungen [Mü08] und ideale zugehörige Normalverteilung

Es stellt sich nun die Frage, ob die Höhe der beobachteten Abweichungen zwischen Prognose und Messung durch die vorliegenden Unsicherheiten erklärt werden kann. Dazu werden bei der Prognose der Einfluss der Flankenübertragung K gemäß [DIN EN 12354-2] sowie zwei weitere Korrekturen einbezogen. Der erste Korrekturwert berücksichtigt die mit der Prognose verbundenen Effekte und der zweite beinhaltet die Auswirkung des Kurz-Messverfahrens. Im Mittel sind diese Werte 0, doch in den Unsicherheiten sind sie zu berücksichtigen. Die Differenz δ zwischen Prognose und Messung wird damit

$$\delta = L_{n,w,eq,R} - \Delta L_{w,R} + K - K_{\text{prog}} - L'_{n,w,Mess} + K_{\text{kurz}}. \quad (75)$$

Die kombinierte Unsicherheit der Differenz ergibt sich daraus zu

$$u_c(\delta) = \sqrt{u^2(L_{n,w,eq,R}) + u^2(\Delta L_{w,R}) + u^2(K) + u^2(K_{\text{prog}}) + u^2(L'_{n,w,Mess}) + u^2(K_{\text{kurz}})}. \quad (76)$$

Als erstes ist festzustellen, dass es zu keiner systematischen Verschiebung zwischen Prognose und Messung kommt (Bild 52, Bild 53). Da die Eingangswerte für die Prognose nach [DIN 4109-1] und nach [DIN EN 12354-2] identisch sind (Gln. (68), (69)), lässt sich nur der Schluss ziehen, dass die Flankenübertragung K in den untersuchten Fällen im Mittel bei 2 dB liegt. Die Flankenübertragung nimmt nach [DIN EN 12354-2] Werte zwischen 0 und 6 dB an. Dies würde nach [GUM] einer Rechteckverteilung entsprechen, deren Erwartungswert bei 3,0 dB liegen würde. Nun ist jedoch bekannt, dass der Erwartungswert bei 2,0 dB liegt. Daher wurde bei einer Spanne von 6 dB eine Dreiecksverteilung so berechnet, dass der Erwartungswert bei 2,0 dB liegt (Bild 54). Die zugehörige Standardabweichung liegt bei 2,0 dB.

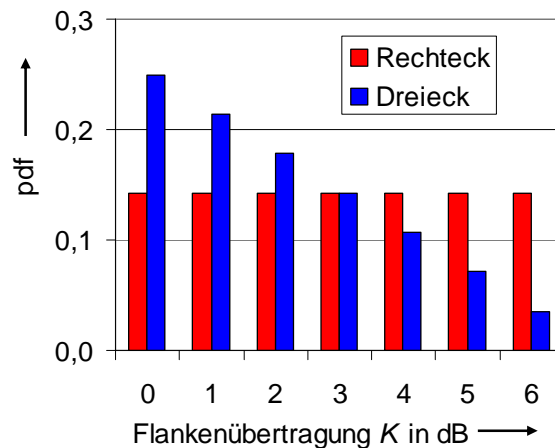


Bild 54 Verteilungsdichtefunktion für die flankierende Übertragung K

Mit den Eingangsdaten aus Kapitel 7.2 lässt sich nun ein Unsicherheitsbudget aufstellen (Tabelle 10). Dabei wird davon ausgegangen, dass die Prognose auf Labormessungen und nicht auf Massekurven und tabellierten Trittschallminderungen beruht. Ausgangspunkt ist dann die Messung einer Rohdecke im Labor. Die zugehörige Unsicherheit ist die Vergleichs-Standardabweichung für bewertete Norm-Trittschallpegel, die bei 1,5 dB liegt (Tabelle 5, Seite 18). Die Produktstreuung der verwendeten Decke wird mit 1,0 dB angesetzt. Dieser Wert ist zwei Mal zu berücksichtigen, da bei der Labormessung ein Exemplar und beim Einsatz im Gebäude ein anderes Exemplar verwendet wurde. Ganz analog ergeben sich die Werte für die bewertete Trittschallminderung. Allerdings liegt hier die Vergleichs-Standardabweichung bei 1,0 dB (Tabelle 5, Seite 18) und die Produktstreuung bei ca. 2,5 dB (Kapitel 7.2). Für die Flankenübertragung kann ein Unsicherheitsbeitrag von 2,0 dB angesetzt werden (siehe oben). Die Unsicherheit der Nachmessung am Bau ist die in-situ-Standardabweichung des bewerteten Norm-Trittschallpegels von 1,0 dB (Tabelle 5, Seite 18) und für den Ersatz der Norm-Messung durch eine Kurzmessung wird ein zusätzlicher Unsicherheitsbeitrag von 1,0 dB angesetzt (siehe oben). Die Unsicherheit des Prognoseverfahrens selbst bleibt dann ein Parameter, der so gewählt werden kann, dass die kombinierte Unsicherheit der Differenz zwischen Prognose- und Messwert 5,0 dB beträgt. Für die Prognoseunsicherheit ergibt sich dann ein Wert von 1,0 dB (Tabelle 10). Dieser Wert wird nur zum Teil durch die Rechnung mit Einzahlwerten an Stelle der physikalisch korrekteren Terzspektren verursacht. Es ist zu vermuten, dass ein weiterer Teil dadurch entsteht, dass Estrich und Rohdecke interagieren. Die Trittschallminderung hängt in geringem Maße auch von der Rohdecke ab und auch der äquivalente bewertete Norm-Trittschallpegel einer Rohdecke ist nicht völlig unabhängig von der Deckenaufgabe. Die Prognose setzt jedoch voraus, dass hier eine völlige Unabhängigkeit besteht, so dass dadurch ein zusätzlicher Unsicherheitsbeitrag entsteht.

Die beobachtete Standardabweichung von 5,0 dB kann also durch die bekannten Effekte sehr gut erklärt werden.

Tabelle 10 Unsicherheitsbudget für die Differenz δ zwischen Rechen- und Messwert

| | | u | c | $c^2 u^2$ |
|--------------------|----------------------------------|--------|-------|---------------------|
| Rohdecke | $\sigma_R(L_{n,w,eq,R})$ | 1,5 dB | 1 | 2,3 dB ² |
| Rohdecke | $\sigma_{repro}(L_{n,w,eq,R})$ | 1,0 dB | 1 | 1,0 dB ² |
| Rohdecke | $\sigma_{repro}(L_{n,w,eq,R})$ | 1,0 dB | 1 | 1,0 dB ² |
| Estrich | $\sigma_R(\Delta L_{w,R})$ | 1,0 dB | 1 | 1,0 dB ² |
| Estrich | $\sigma_{repro}(\Delta L_{w,R})$ | 2,5 dB | 1 | 6,3 dB ² |
| Estrich | $\sigma_{repro}(\Delta L_{w,R})$ | 2,5 dB | 1 | 6,3 dB ² |
| Flankenübertragung | $u(K)$ | 2,0 dB | 1 | 4,0 dB ² |
| Prognose | $u(K_{prog})$ | 1,0 dB | 1 | 1,0 dB ² |
| Baumessung | $\sigma_{situ}(L'_{n,w,})$ | 1,0 dB | 1 | 1,0 dB ² |
| Kurzmessung | $u(K_{kurz})$ | 1,0 dB | 1 | 1,0 dB ² |
| | | | u_c | 5,0 dB |

7.5 Vorschläge für die Unsicherheit bei der Trittschall-Prognose

Die bisherige Philosophie für den Umgang mit Unsicherheiten in der DIN 4109 bestand darin, vor Durchführung der Rechnungen bestimmte Abschläge (Vorhaltemaße) zu berücksichtigen, damit das Prognoseergebnis auf der sicheren Seite liegt. Beim Luftschall wurde diese Philosophie durch ein neues Konzept ersetzt. Dabei wird z.B. von Laborwerten für die Schalldämmung ausgegangen, denen Unsicherheiten beigemessen sind, die aus Ringversuchen ermittelt wurden. Unter Berücksichtigung der Produktstreuung, der abweichenden Baurealität und der Unsicherheit des Prognoseverfahrens ergibt sich schließlich ein Prognoseergebnis und eine zugehörige kombinierte Standard-Unsicherheit. Daraus kann anschließend ein Vertrauensbereich bei einer gewählten statistischen Sicherheit berechnet werden. Für die Bauakustik üblich wäre hier ein einseitiger Vertrauensbereich bei einer Sicherheit von 84%. Damit müsste die einfache Standardunsicherheit vom Prognosewert subtrahiert werden.

Dieses Verfahren besitzt entscheidende Vorteile, vor allem durch die große Transparenz in Bezug auf die Herkunft der einzelnen Unsicherheitsbeiträge. Es ist daher anzustreben, dieses Verfahren auch für den Trittschall anzuwenden.

Die derzeitigen Vorschläge sind, das (künftig nicht mehr verwendete!) Vorhaltemaß beim Trittschall auf 3 dB [KSF06] bzw. auf 4 dB [Mü08] zu erhöhen. Nach dem Budget der Tabelle 10 ergibt sich ohne die durch die Messung verursachten Unsicherheitsbeiträge (Summation nur über die ersten 8 Zeilen) eine Standardunsicherheit des prognostizierten Norm-Trittschallpegels von 4,8 dB. Werden nun die gleichen statistischen Sicherheiten wie beim Luftschall herangezogen, so müsste dieser Wert zum prognostizierten Norm-Trittschallpegel addiert werden, um mit 84% Wahrscheinlichkeit zu einer Unterschreitung zu kommen.

Eine Zusammenfassung des Vorschlags zum Umgang mit den Unsicherheiten in der DIN 4109 zeigt Bild 55. Hier sind Luft- und Trittschall miteinander verglichen. In

beiden Fällen besteht die Möglichkeit, die Prognose auf Labordaten aufzubauen. Die zugehörigen Unsicherheiten wurden für den Luftschall in Vorgängerprojekten und für den Trittschall in diesem Projekt ermittelt. Liegen Messergebnisse für die Gesamtkonstruktion aus einem Prüfstand vor, so beträgt die kombinierte Standardunsicherheit des prognostizierten Norm-Trittschallpegels 3,0 dB. Ergibt sich der Norm-Trittschallpegel dagegen aus der Kombination einer Deckenauflage mit einer Rohdecke, so liegt die Standardunsicherheit bei 4,8 dB.

Werden die Prognosen dagegen auf Bemessungskurven, z.B. Massekurven, aufgebaut, so steht die Frage, welche Unsicherheit den Bemessungskurven und vor allem Werten, die aus Bemessungskurven berechnet wurden, beizumessen sind. Die entsprechenden Prognosezweige in Bild 55 sind daher noch nicht mit Zahlenwerten versehen.

DIN 4109: Unsicherheitsschema

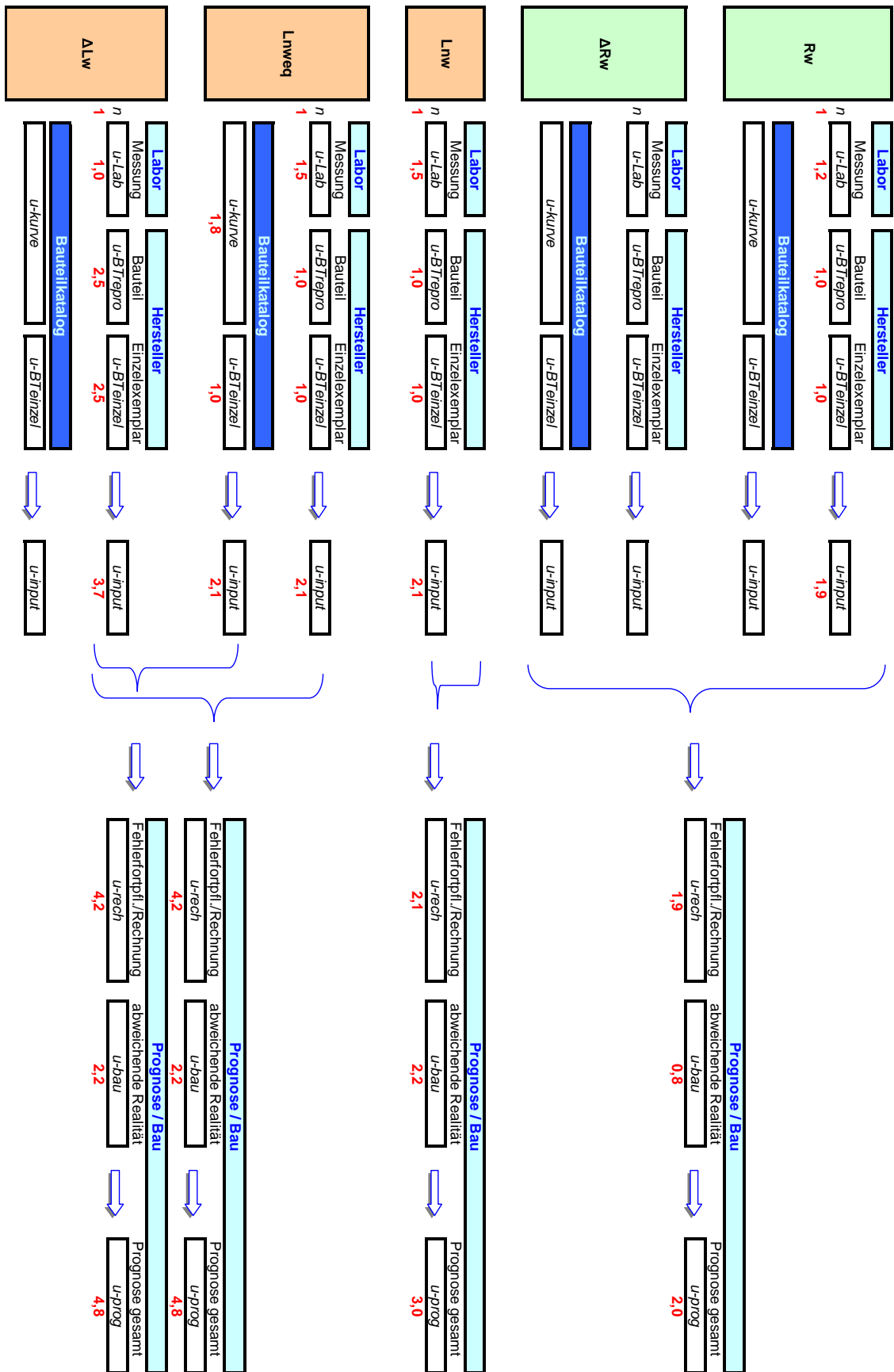


Bild 55 Vorschlag für ein Konzept zur Berücksichtigung der Unsicherheiten bei Prognosen in der DIN 4109, Luft- und Trittschall im Vergleich

8. Zusammenfassung

Die Unsicherheiten von Trittschallmessungen am Bau und im Labor werden durch verschiedene Effekte beeinflusst. Eine summarische Betrachtung aller Effekte ist durch Ringversuche gegeben. Durch eine umfangreiche Auswertung vorliegender Ringversuchsergebnisse konnte ermittelt werden, dass die Wiederhol-Standardabweichung (selbes Team, selbe Geräte, selbe Labor- oder Bausituation) für den bewerteten Norm-Trittschallpegel im Mittel bei 0,5 dB liegt. Für die In-situ-Standardabweichung (verschiedene Teams, verschiedene Geräte, selbe Labor- oder Bausituation) ergibt sich ein Wert von 1,0 dB. Dies ist die Unsicherheit für die Ermittlung eines bewerteten Norm-Trittschallpegels in einer konkreten Bau- oder Laborsituation. Messungen unter Vergleichsbedingungen liegen nicht vor, da keine Deckenkonstruktion in verschiedenen Laboratorien vermessen wurde. Deshalb kann für die Vergleichs-Standardabweichung nur ein Schätzwert angegeben werden kann. Er liegt bei 1,5 dB. Dieser Wert ist gemessenen bewerteten Norm-Trittschallpegeln von Bauteilen als Standard-Unsicherheit beizumessen.

Für bewertete Trittschallminderungen wurde aus Ringversuchen eine Vergleichs-Standardabweichung von 1,0 dB ermittelt. Dieser Wert kann somit als Standard-Unsicherheit den bewerteten Trittschallminderungen zugeordnet werden.

Als separater Einfluss wurde im Rahmen des Projekts der Beitrag des Hammerwerks untersucht. Es zeigte sich, dass Hammerwerke in weiten Frequenzbereichen ein breitbandiges Spektrum emittieren. Lediglich bei tiefen Frequenzen (Holzbalkendecke bis ca. 200 Hz, Betondecke bis ca. 50 Hz) liegt ein Linienspektrum mit 2 Hz Linienabstand vor. Der Linienabstand ist damit so gering im Vergleich zur Bandbreite von Körperschallmoden, dass man immer von einer ausreichenden Anregung aller Moden ausgehen kann. Durch Messung von vier verschiedenen Hammerwerken auf unterschiedlichen Empfangsplatten wurde zudem ermittelt, dass sich die Unsicherheit der emittierten Schalleistung mit einem Beitrag von ca. 0,4 dB im bewerteten Norm-Trittschallpegel widerspiegelt.

Des Weiteren wurde geprüft, ob die Verwendung bestimmter Bauteilgrößen in Prüfständen zu einer erhöhten Unsicherheit bei der Übertragung auf reale Gebäude mit anderen Bauteilgrößen führt. Diese Untersuchungen wurden im Modellmaßstab durchgeführt. Es zeigte sich, dass - im Gegensatz zum Luftschall-Dämmmaß - der Norm-Trittschallpegel unabhängig von der Deckengröße ist. Dies gilt sowohl für homogene Beton- als auch für Holzbalkendecken. Wenn allerdings eine Massivdecke mehrere Räume überspannt, so verteilt sich die Schwingungsenergie auf die gesamte Deckenfläche, so dass in diesen Fällen der Norm-Trittschallpegel mit zunehmender Deckenfläche sinkt. Die Größe dieses Effekts beträgt 2,4 dB pro Verdopplung der Deckenfläche. Er kann durch eine entsprechende Korrektur berücksichtigt werden.

Auch zu den Unsicherheiten der Prognose wurden Untersuchungen angestellt. Dabei zeigte sich, dass die vereinfachende Rechnung mit Einzahlwerten nur einen geringen Unsicherheitsbeitrag liefert. Beobachtete Abweichungen zwischen prognostizierten und gemessenen bewerteten Norm-Trittschallpegeln konnten in ihrer Höhe erklärt werden. Die wichtigsten Unsicherheitsbeiträge kommen hier von den kennzeichnenden Bauteilgrößen, vor allem von der Trittschallminderung der Estriche.

Danksagung

Mein Dank gilt allen Kollegen, die Messergebnisse zur Verfügung gestellt haben. Dies sind insbesondere A. Terskan, J. Lang, C. Simmons, E. Gerretsen, W. Beentjes, A. Warnock, C. Lechner, E. Müller und C. Scrosati. Die Messungen an der PTB wurden von H. Bietz und I. Hentschker ausgeführt.

Literatur

- [Be87] W. G. M. Beentjes: *Round Robin onderzoek naar praktijkmetingen van de geluidisolatie*, Rapport nr. 6404/1987, Bouwcentrum, Rotterdam, August 1987
- [Bo83] Kaj Bodlund: *Laboratory measurement of the improvement of impact sound insulation by floor coverings on a standard floor*. Nordtest Project 279-81, Technical Report SP-RAPP 1983:01, Boras, 1983
- [CH67] L. Cremer, M. Heckl: *Körperschall. Physikalische Grundlagen und Technische Anwendungen*. Springer, Berlin / Heidelberg / New York, 1967
- [DIN 4109] *Schallschutz im Hochbau, Anforderungen und Nachweise*, November 1989
- [E DIN 4109-1] *Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Anforderungen*, Januar 2006
- [DIN 4109-1] *Schallschutz im Hochbau – Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren*, Beiblatt 1 zu DIN 4109, November 1989
- [DIN EN ISO 140-1] *Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 1: Anforderungen an Prüfstände mit unterdrückter Flankenübertragung* (ISO 140-1:1997 + AM 1:2004); Deutsche Fassung EN ISO 140-1:1997 + A1:2004
- [DIN EN ISO 140-2] *Akustik; Messung der Schalldämmung in Bauten und von Bauteilen; Teil 2: Bestimmung, Überprüfung und Anwendung von Präzisionsdaten*, 1991-06
- [DIN EN ISO 140-6] *Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 6: Messung der Trittschalldämmung von Decken in Prüfständen* (ISO 140-6:1998); Deutsche Fassung EN ISO 140-6:1998
- [DIN EN ISO 140-7] *Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 7: Messung der Trittschalldämmung von Decken in Gebäuden* (ISO 140-7:1998); Deutsche Fassung EN ISO 140-7:1998
- [DIN EN ISO 140-8] *Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 8: Messung der Trittschallminderung durch eine Deckenauflage auf einer massiven Bezugsdecke in Prüfständen* (ISO 140-8:1997); Deutsche Fassung EN ISO 140-8:1997
- [DIN EN ISO 140-11] *Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 11: Messung der Trittschallminderung durch Deckenauflagen auf leichten Bezugsdecken in Prüfständen* (ISO 140-11:2005); Deutsche Fassung EN ISO 140-11:2005
- [DIN EN ISO 717-2] *Akustik – Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 2: Trittschalldämmung* (ISO 717-2:1996 + AM1:2006); Deutsche Fassung EN ISO 717-2:1996 + A1:2006

- [DIN EN 12354-2] *Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 2: Trittschalldämmung zwischen Räumen* Deutsche Fassung EN 12354-2:2000
- [DIN ISO 5725-2] *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen – Teil 2: Grundlegende Methode für Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichpräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens (ISO 5725-2:1994 einschließlich Technisches Korrigendum 1:2002)*
- [Fo80] L. C. Fothergill: *Recommendations for the measurement of sound insulation between dwellings*. Applied Acoustics 13, 1980, 171-187
- [GUM] *Guide to the expression of uncertainties in measurement*. first edition, 1993, corrected and reprinted 1995, International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland)
- [Ha86] J. Hartung, B. Elpelt, K.-H. Klösener: *Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. 5., durchgesehene Auflage, R. Oldenbourg Verlag München Wien, 1986
- [He09] I. Hentschker: *Untersuchung des Einflusses der Raumgeometrie auf den Norm-Trittschallpegel (Messungen an Modellprüfständen)*. Diplomarbeit, Hochschule Mittweida, 2009
- [Ho07] C. Hopkins: *Sound insulation*. Elsevier, Oxford, 2007
- [ISO WD 12999] *Determination and application of uncertainties in building acoustics*. 2009-11-09
- [KSF06] K. Kohler, M. Schneider, H.-M. Fischer: *Schallschutznachweis für die Trittschalldämmung auf der Basis der DIN EN 12354-2*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2006
- [Ky03] M. Kylliäinen: *Uncertainty of impact sound insulation measurements in the field*. Research report 125, Tampere university of technology, Finland, 2003
- [La96] J. Lang: *Results from two round robins for building acoustic measurements in buildings*. (in German) UBA-BE-067, Report of the Umweltbundesamt, Vienna, Austria, 1996
- [Le01] C. Lechner: *Ringversuch für bauakustische Messungen 2001*. (in German) UBA-BE-207, Report of the Umweltbundesamt, Vienna, Austria, 2001
- [MM09] J. Mack, T. Möck: *Trittschallschutz*. in Bauphysik-Kalender 2009, herausgegeben von N.A. Fouad, Ernst&Sohn, Berlin, 2009
- [Mü08] E. Müller: *Anmerkungen zur Normvorlage DIN 4109-3*. Diskussionspapier für den NABau, 2008
- [RBH08] A. Rabold, S. Bacher, J. Hessinger: *Holzbalkendecken in der Altbausanierung*. Forschungsbericht des ift, Rosenheim, 2008

- [SS09] F. Scamoni, C. Scrosati, M. Mussin, E. Galbusera, M. Bassanino, G. Zambon, S. Radaelli: *Repeatability and reproducibility of field measurements in buildings*. erscheint in: Proceedings of EURONOISE 2009 on CDROM, Edinburgh, Schottland, Oktober 2009
- [Sim05] C. Simmons: *Uncertainty of measured and calculated sound insulation in buildings – results of a round robin test*. Proceedings of the Symposium Managing Uncertainty in Noise Measurement and Prediction, Le Mans, France, 27.-29. June 2005
- [SW09] M. Sommerfeld, V. Wittstock: *Kompaktverfahren zur Ermittlung von Trittschallminderungen*. DAGA, Berlin, 2010
- [WB98] A.C.C. Warnock, J.A. Birta: *Summary report for consortium on fire resistance and sound insulation of floors: sound transmission class and impact insulation results*. Internal Report IRC-IR-766, NRC-CNRC, Canada, 1998
- [Wit04] Volker Wittstock: *Quantitative Kriterien für die Verwendbarkeit bauakustischer Messergebnisse und für die bauaufsichtliche Anerkennung von Prüfstellen für bauakustische Messungen nach den neuen europäischen Messnormen*. PTB-Bericht zu den DIBt-Projekten P 32-5-5-5.61-1010/02 und P 32-5-5.61.1-1043/03, Dezember 2004
- [Wit05] Wittstock, V.; *Uncertainties in building acoustics*. Proceedings of Forum Acusticum 05, CDROM, Budapest, 30.08.-02.09 2005
- [Wit07] Wittstock, V.; *On the uncertainty of single-number quantities for rating airborne sound insulation*. ACUSTICA united with ACTA ACUSTICA, Volume 93, Number 3, May/June 2007, pp. 375-386(12)
- [Wit07-1] Wittstock, V.; *Erarbeitung brauchbarer Schalldämm-Definitionen für die neue DIN 4109*. Abschlussbericht zum gleichnamigen DIBt-Projekt, Braunschweig, Oktober, 2007
- [WS08] Wittstock, V.; Scholl, W.: *Berechnung der Prognoseunsicherheit nach DIN 4109*. Abschlussbericht zum gleichnamigen DIBt-Forschungsprojekt, Braunschweig, September, 2008

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig und Berlin ist das natur- und ingenieurwissenschaftliche Staatsinstitut und die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Messwesen und Teile der Sicherheitstechnik. Die PTB gehört zum Dienstbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit. Sie erfüllt die Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien auf der Grundlage der DIN EN ISO/IEC 17025.

Zentrale Aufgabe der PTB ist es, die gesetzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darzustellen, zu bewahren und - insbesondere im Rahmen des gesetzlichen und industriellen Messwesens – weiterzugeben. Die PTB steht damit an oberster Stelle der metrologischen Hierarchie in Deutschland.

Zur Sicherstellung der weltweiten Einheitlichkeit der Maße arbeitet die PTB mit anderen nationalen metrologischen Instituten auf regionaler europäischer Ebene in EUROMET und auf internationaler Ebene im Rahmen der Meterkonvention zusammen. Das Ziel wird durch einen intensiven Austausch von Forschungsergebnissen und durch umfangreiche internationale Vergleichsmessungen erreicht.

The Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig and Berlin is the national institute for science and technology and the highest technical authority of the Federal Republic of Germany for the field of metrology and certain sectors of safety engineering. The PTB comes under the auspices of the Federal Ministry of Economics and Labour. It meets the requirements for calibration and testing laboratories as defined in the EN ISO/IEC 17025.

It is the fundamental task of the PTB to realize and maintain the legal units in compliance with the International System of Units (SI) and to disseminate them, above all within the framework of legal and industrial metrology. The PTB thus is on top of the metrological hierarchy in Germany.

To ensure worldwide coherence of measures, the PTB cooperates with other national metrology institutes within EUROMET on the regional European level and on the international level within the framework of the Metre Convention. The aim is achieved by an intensive exchange of results of research work carried out and by comprehensive international comparison measurements.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Bundesallee 100
D-38116 Braunschweig

Abbestraße 2-12
D-10587 Berlin