

Isabel Hentschker

Untersuchung des Einflusses der Raumgeometrie auf den Norm-Trittschallpegel  
(Messungen an Modellprüfständen)

**DIPLOMARBEIT**

HOCHSCHULE MITTWEIDA

---

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich Mathematik / Physik / Informatik

Mittweida, Braunschweig 2009

Isabel Hentschker

Untersuchung des Einflusses der Raumgeometrie auf den Norm-Trittschallpegel  
(Messungen an Modellprüfständen)

eingereicht als

**DIPLOMARBEIT**

an der

**HOCHSCHULE MITTWEIDA**

---

**UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES**

Fachbereich Mathematik / Physik / Informatik

Mittweida, Braunschweig 2009

durchgeführt an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB)  
Braunschweig

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. J. Hübel (Hochschule Mittweida)

Zweitprüfer: Dr.-Ing. V. Wittstock (PTB Braunschweig)

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

Hentschker, Isabel

„Untersuchung des Einflusses der Raumgeometrie auf den Norm-Trittschallpegel (Messungen an Modellprüfständen)“ – 2009 - 63 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida – University of Applied Sciences,

Fachbereich Mathematik / Physik / Informatik, Diplomarbeit, 2009

Referat:

Ziel der Diplomarbeit ist es, den Einfluss der Raumgeometrie auf den Norm-Trittschallpegel experimentell zu ermitteln. Dafür wird ein bauakustischer Modellprüfstand im Maßstab 1:5 entwickelt und erprobt. Der Prüfstand ermöglicht die Realisierung verschiedener Raumgrößen. Die Erprobung von möglichen Anregungsquellen der Modeldecken stellt ein zentrales Thema der Diplomarbeit dar. Weiterhin erfolgt eine Untersuchung der Abnahme des Norm-Trittschallpegels beim Skelettbau.

## **Dankeswort**

Diese Arbeit entstand an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig.

Mein Dank geht an Herrn Prof. Dr.- Ing. Werner Scholl, der mir die Möglichkeit für die Durchführung dieser Arbeit gegeben hat.

Ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr.- Ing. Volker Wittstock, der als Betreuer dieser Diplomarbeit eine außergewöhnliche Hilfs- und Diskussionsbereitschaft zeigte. Mit wertvollen Ratschlägen schaffte er die Grundlage für das Gelingen dieser Arbeit.

Außerdem möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe 1.71 Bauakustik bedanken, die mir bei allen Fragen und Problemen hilfreich zur Seite gestanden haben.

Ich danke Herrn Prof. Dr.- Ing. Jörn Hübelt von der Hochschule Mittweida für die Betreuung meiner Diplomarbeit. Weiterhin danke ich allen Professoren sowie wissenschaftlichen Mitarbeitern der Hochschule für die Vermittlung meines fachlichen Wissens und für die angenehme Studienzzeit.

Besonders hervorheben möchte ich meine Familie, denn ohne ihre kritischen Anmerkungen, ihre moralische sowie finanzielle Unterstützung, wären mein Studium und die Diplomarbeit nicht möglich gewesen. Dafür möchte ich mich ganz herzlich bedanken.

Mein abschließender Dank gilt all jenen Personen die mir während der Diplomarbeitszeit mit großer Hilfsbereitschaft zur Seite standen. Dieses warmherzige Umfeld ermöglichte mir eine sehr angenehme Zeit.

# Inhaltsverzeichnis

|   |               |
|---|---------------|
| <b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....  | <b>V</b>      |
| <b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....  | <b>VII</b>    |
| <b>VERWENDETE FORMELZEICHEN UND EINHEITEN</b> .....                             | <b>VIII</b>   |
| <br>  |               |
| <b>1 EINLEITUNG</b> .....   | <b>- 1 -</b>  |
| <b>2 WISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN</b> .....                                     | <b>- 3 -</b>  |
| 2.1 KÖRPERSCHALL .....  | - 3 -         |
| 2.2 TRITTSCHALLDÄMMUNG.....   | - 4 -         |
| 2.3 ERMITTLUNG DES EINZAHLWERTES FÜR DEN TRITTSCHALL .....                      | - 6 -         |
| 2.4 HOLZBALKEN- UND BETONDECKEN .....   | - 7 -         |
| <b>3 DER MODELLPRÜFSTAND</b> .....  | <b>- 9 -</b>  |
| 3.1 BEDINGUNGEN FÜR PRÜFSTÄNDE MIT UNTERDRÜCKTER FLANKENSCHALLÜBERTRAGUNG ..... | - 9 -         |
| 3.2 SKALIERUNGSGESETZE .....  | - 9 -         |
| 3.3 AUFBAU DES MODELLPRÜFSTANDES .....  | - 14 -        |
| 3.4 AUFBAU DER HOLZBALKEN- UND BETONDECKEN .....                                | - 16 -        |
| 3.5 MESSAUSRÜSTUNG .....  | - 18 -        |
| 3.6 MESSVERFAHREN.....  | - 18 -        |
| 3.6.1 Messung der Nachhallzeit.....   | - 18 -        |
| 3.6.2 Messung des Trittschallpegels.....  | - 20 -        |
| 3.7 EINSTELLUNG DER NACHHALLZEIT.....   | - 21 -        |
| <b>4 MODELLIERUNG DER QUELLE</b> .....  | <b>- 25 -</b> |
| <b>5 VORUNTERSUCHUNGEN</b> .....  | <b>- 28 -</b> |
| 5.1 AUSWAHL DER KÖRPERSCHALLQUELLEN .....                                       | - 28 -        |
| 5.2 KUGELFALLAPPARAT .....  | - 28 -        |
| 5.2.1 Höhenmessung und –korrektur.....  | - 29 -        |
| 5.2.2 Maximalpegel oder Energiepegel .....                                      | - 31 -        |
| 5.2.3 Anpassung des Kugelfallapparates an das Hammerwerk .....                  | - 36 -        |

|          |  |               |
|----------|--|---------------|
| 5.3      | SHAKER.....  | - 36 -        |
| 5.3.1    | Erste Testmessung auf der Holzbalkendecke .....                  | - 37 -        |
| 5.3.2    | Strommessung .....   | - 38 -        |
| 5.4      | WIEDERHOLBARKEITSTUDIE .....                                     | - 39 -        |
| 5.5      | STROMMESSUNG DES SHAKERS.....                                    | - 43 -        |
| 5.6      | ZUSAMMENFASSUNG VORUNTERSUCHUNGEN .....                          | - 44 -        |
| <b>6</b> | <b>MESSERGEBNISSE DER PRÜFSTANDSGEOMETRIEN.....</b>              | <b>- 45 -</b> |
| 6.1      | DURCHFÜHRUNG.....  | - 45 -        |
| 6.2      | MESSUNGEN MIT DEN HOLZBALKENDECKEN .....                         | - 46 -        |
| 6.2.1    | Kugelfallapparat .....   | - 46 -        |
| 6.2.2    | Shaker .....   | - 48 -        |
| 6.3      | MESSUNGEN MIT DEN BETONDECKEN .....                              | - 50 -        |
| 6.3.1    | Kugelfallapparat .....   | - 50 -        |
| 6.3.2    | Shaker .....   | - 52 -        |
| 6.3.3    | Sonderfall bei Verwendung der Betondecke 1 .....                 | - 54 -        |
| 6.4      | VERGLEICH MIT DECKEN AUS PRÜFSTÄNDEN UND GEBÄUDEN.....           | - 55 -        |
| 6.5      | ZUSAMMENFASSUNG DER MESSERGEBNISSE .....                         | - 58 -        |
| <b>7</b> | <b>MESSUNGEN SKELETTBAU .....</b>                                | <b>- 59 -</b> |
| <b>8</b> | <b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>                         | <b>- 62 -</b> |
|          | <b>ANHANG .....</b>  | <b>XI</b>     |
|          | <b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>                                | <b>XVIII</b>  |
|          | <b>ERKLÄRUNG ZUR SELBSTSTÄNDIGEN ANFERTIGUNG DER ARBEIT.....</b> | <b>XX</b>     |

# Abbildungsverzeichnis

|  |        |
|--|--------|
| Abbildung 1: Schemazeichnung möglicher Trittschallübertragungswege .....   | - 4 -  |
| Abbildung 2: Schemazeichnungen des Messaufbaus zur Bestimmung der Trittschalldämmung.....  | - 4 -  |
| Abbildung 3: Bezugskurve zur Bewertung der Trittschalldämmung .....  | - 7 -  |
| Abbildung 4: Schematische Darstellung der Seitenwände zur Veränderung der Raumgeometrie des<br>Modellprüfstandes .....                     | - 15 - |
| Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer Holzbalkendecke (HBD) .....  | - 16 - |
| Abbildung 6: Aufbau der Holzbalkendecke im Modell (ohne Absorptionsmaterial).....  | - 17 - |
| Abbildung 7: Gewichtszunahme der Decken .....  | - 17 - |
| Abbildung 8: Anregungsquellen – links ist der Shaker dargestellt und rechts der Kugelfallapparat .....                                     | - 21 - |
| Abbildung 9: Schematische Darstellung: mögliche Anregungspunkte auf der Holzbalkendecke.....   | - 21 - |
| Abbildung 10: Nachhallzeit im Empfangsraum Raumgeometrie 1 mit Holzbalkendecke mit und ohne<br>Absorptionsmaterial .....                   | - 24 - |
| Abbildung 11: Spektrale Leistungsdichte einer Betondecke und Holzbalkendecke .....   | - 27 - |
| Abbildung 12: Spektrale Leistungsdichte im Frequenzbereich bis 40 Hz.....  | - 27 - |
| Abbildung 13: Anregung der Decke durch eine Kugel bei Höhenvariation.....  | - 30 - |
| Abbildung 14: Prinzipieller Zeitverlauf des Schalldruckpegels im Empfangsraum.....   | - 32 - |
| Abbildung 15: Messung des Energiepegels mit verschiedenen Mittelungszeiten .....   | - 33 - |
| Abbildung 16: Experimenteller Aufbau .....   | - 36 - |
| Abbildung 17: Wiederholstandardabweichung des Shakers bei der Messung an einem Punkt.....  | - 37 - |
| Abbildung 18: Messung des Stromes über die gesamte Dauer des Shakersignals bei $f = 250$ Hz .....  | - 38 - |
| Abbildung 19: Messergebnisse Kugelfall.....  | - 41 - |
| Abbildung 20: Messergebnisse Shaker.....   | - 43 - |
| Abbildung 21: Eingestellte Nachhallzeiten der Raumgeometrien bei Messung der Holzbalkendecken .....  | - 46 - |
| Abbildung 22: Eingestellte Nachhallzeiten der Raumgeometrien bei Messung der Betondecken .....   | - 46 - |
| Abbildung 23: Holzbalkendecke: Norm-Trittschallpegel $L_n$ der verschiedenen Raumgeometrien – Messung<br>mit dem Kugelfallapparat .....    | - 47 - |
| Abbildung 24: normierter Schalldruckpegel $L_{S,n}$ der verschiedenen Raumgeometrien – Messung mit dem<br>Shaker .....                     | - 49 - |
| Abbildung 25: Messungen mit dem Shaker – normierter Schalldruckpegel $L_{S,n}$ umgerechnet auf den Norm-<br>Trittschallpegel .....         | - 50 - |
| Abbildung 26: Norm-Trittschallpegel $L_n$ der verschiedenen Raumgeometrien – Messung mit dem<br>Kugelfallapparat.....                      | - 51 - |
| Abbildung 27: normierter Schalldruckpegel $L_{S,n}$ der verschiedenen Raumgeometrien – Messung mit dem<br>Shaker .....                     | - 52 - |
| Abbildung 28: Messungen mit dem Shaker – Umrechnung der normierten Schalldruckpegel $L_{S,n}$ auf den<br>Norm-Trittschallpegel $L_n$ ..... | - 53 - |
| Abbildung 29: Sonderfall: Norm-Trittschallpegel der Betondecke 1 und Raumgeometrie 1.....  | - 54 - |

---

|   |        |
|---|--------|
| Abbildung 30: Vergleich der gemessenen Modellholzbalkendecken mit Rohdecken aus Prüfständen bzw. einer Holzbalkendecke (ohne Schüttung) eines Altbaus ..... | - 56 - |
| Abbildung 31: Vergleich der gemessenen Modellbetondecken mit Rohdecken aus Prüfständen .....  | - 57 - |
| Abbildung 32: Norm-Trittschallpegel $L_n$ bei Raumgeometrie 6 unter Verwendung verschieden großer Betondecken – Messung mit Kugelfallapparat .....          | - 59 - |
| Abbildung 33: Ergebnisse der Messungen in Skelettbauweise .....   | - 61 - |
| Abbildung 34: Messkurven des Energiepegels auf der Holzbalkendecke mit Kugelfallapparat (links: auf Balken, rechts: Zwischenraum) .....                     | XI     |
| Abbildung 35: Messkurven des Maximalpegels auf der Holzbalkendecke mit Kugelfallapparat (links: auf Balken, rechts: Zwischenraum) .....                     | XI     |
| Abbildung 36: Gesamtansicht des Modellprüfstandes .....   | XVI    |
| Abbildung 37: Innenansicht des Modellprüfstandes .....  | XVI    |
| Abbildung 38: Modellprüfstand mit Betondecke und Aufhängung .....   | XVII   |
| Abbildung 39: Messung in der Skelettbauweise .....  | XVII   |



## Tabellenverzeichnis

|  |        |
|--|--------|
| Tabelle 1: Abmessungen des Modells im Maßstab 1:5 und die dazugehörigen Maße im Original.....  | - 15 - |
| Tabelle 2: Mindestabstände der Mikrofonpositionen .....  | - 19 - |
| Tabelle 3: Ermittlung der Wiederholstandardabweichungen durch Messungen auf dem Balken der<br>Holzbalkendecke ( $h = 25,6$ cm und bei $L_E: T = 300$ ms).....                | - 35 - |
| Tabelle 4: Ermittlung der Wiederholstandardabweichungen durch Messungen auf dem Zwischenraum der<br>Holzbalkendecke ( $h = 25,6$ cm und bei $L_E: T = 300$ ms) .....         | - 35 - |
| Tabelle 5: Standardabweichungen der Wiederholbarkeitsstudie für Kugelfallapparat und Shaker.....   | - 40 - |
| Tabelle 6: Einzahlwerte Kugelfallapparat .....   | - 41 - |
| Tabelle 7: Einzahlwerte, Messungen auf den Holzbalkendecken mit dem Kugelfallapparat, Bestimmung der<br>Standardabweichung.....  | - 48 - |
| Tabelle 8: Standardabweichungen der Norm-Trittschallpegel der Holzbalkendecke (Messung mit<br>Kugelfallapparat) .....  | - 48 - |
| Tabelle 9: Einzahlwerte für Shaker .....   | - 50 - |
| Tabelle 10: Einzahlwerte, Messungen auf den Betondecken .....  | - 52 - |
| Tabelle 11: Einzahlwerte für Shaker .....  | - 53 - |
| Tabelle 12: Einzahlwerte .....   | - 60 - |
| Tabelle 13: Messung der Wiederholstandardabweichung mit dem Shaker auf der Holzbalkendecke an einem<br>Punkt .....   | XII    |
| Tabelle 14: Standardabweichungen der Norm-Trittschallpegel der Holzbalkendecke (Messung mit Shaker) ....   | XII    |
| Tabelle 15: Norm-Trittschallpegel der verschiedenen Raumgeometrien für die Holzbalkendecken, angeregt<br>durch Kugelfallapparat.....   | XIII   |
| Tabelle 16: Trittschallpegel der verschiedenen Raumgeometrien für die Holzbalkendecken, angeregt durch<br>Shaker .....   | XIII   |
| Tabelle 17: auf den Norm-Trittschallpegel umgerechneter normierter Schalldruckpegel der verschiedenen<br>Raumgeometrien für die Holzbetondecken, angeregt durch Shaker ..... | XIV    |
| Tabelle 18: Norm-Trittschallpegel der verschiedenen Raumgeometrien für die Betondecken, angeregt durch<br>Kugelfallapparat.....  | XIV    |
| Tabelle 19: Trittschallpegel der verschiedenen Raumgeometrien für die Betondecken, angeregt durch<br>Shaker .....  | XV     |
| Tabelle 20: auf den Norm-Trittschallpegel umgerechneter normierter Schalldruckpegel der verschiedenen<br>Raumgeometrien für die Betondecken, angeregt durch Shaker .....     | XV     |

## Verwendete Formelzeichen und Einheiten

| Formelzeichen      | Bedeutung   | Einheit          |
|--------------------|---|------------------|
| $a$                | Beschleunigung                                      | m/s <sup>2</sup> |
| $A$                | äquivalente Schallabsorptionsfläche                 | m <sup>2</sup>   |
| $A_0$              | Bezugsabsorptionsfläche                             | m <sup>2</sup>   |
| $b$                | Breite  | m                |
| $B$                | Bandbreite  | Hz               |
| $c_0$              | Schallgeschwindigkeit in Luft unter Normbedingungen | m/s              |
| $c_B$              | Biegewellengeschwindigkeit                          | m/s              |
| $c_L$              | Longitudinalwellengeschwindigkeit                   | m/s              |
| $C_I$              | Übertragungsfaktor                                  | V/A              |
| $d$                | Materialdicke                                       | m                |
| $D$                | Differenz (z. B. von Trittschallpegeln)             |                  |
| $E$                | Elastizitätsmodul                                   | N/m <sup>2</sup> |
| $E_{\text{pot}}$   | potenzielle Energie                                 | J                |
| $f$                | Frequenz  | Hz               |
| $f_R$              | Resonanzfrequenz                                    | Hz               |
| $h$                | Höhe  | m                |
| $He$               | Helmholtz-Zahl                                      |                  |
| $I$                | elektrische Stromstärke                             | A                |
| $k$                | Wellenzahl  | 1/m              |
| $l$                | Länge   | m                |
| $L_p$              | Schalldruckpegel                                    | dB               |
| $L_b$              | Fremdgeräuschpegel                                  | dB               |
| $L_E$              | Energiepegel  | dB               |
| $L_{f,\text{max}}$ | Maximalpegel  | dB               |
| $L_i$              | Trittschallpegel im Empfangsraum                    | dB               |
| $L_l$              | Strompegel  | dB               |
| $L_n$              | Norm-Trittschallpegel                               | dB               |
| $L_{n,W}$          | bewerteter Norm-Trittschallpegel                    | dB               |

| <b>Formelzeichen</b> | <b>Bedeutung</b>                              | <b>Einheit</b>    |
|----------------------|---|-------------------|
| $L_{n,eq,W}$         | äquivalenter bewerteter Norm-Trittschallpegel | dB                |
| $L_{sb}$             | Pegelkombination aus Signal und Störgeräusch  | dB                |
| $L_{S,n}$            | normierter Schalldruckpegel des Shakers       | dB                |
| $L_v$                | Schnellepegel                                 | dB                |
| $m$                  | Masse   | kg                |
| $m''$                | flächenbezogene Masse                         | kg/m <sup>2</sup> |
| $M$                  | Maßstabsfaktor                                |                   |
| $n$                  | Stichprobenumfang                             |                   |
| $N$                  | Anzahl der Abtastwerte                        |                   |
| $N_B$                | Anzahl der Spektrallinien                     |                   |
| $p$                  | effektiver Schalldruck                        | Pa                |
| $p_0$                | Bezugsgröße für den Schalldruck               | Pa                |
| $p(t)$               | Impulsantwort des Schalldruckes               | Pa                |
| $P$                  | Modendichte auf dem Bauteil                   | 1/Hz              |
| $R$                  | Schalldämm-Maß                                | dB                |
| $s$                  | Federsteifigkeit                              | N/m               |
| $S$                  | Fläche, Deckengröße                           | m <sup>2</sup>    |
| $S_0$                | Bezugsgröße einer Fläche                      | m <sup>2</sup>    |
| $T, T_{20}$          | Nachhallzeit                                  | s                 |
| $T$                  | Integrationszeit                              | s                 |
| $U$                  | elektrische Spannung                          | V                 |
| $v_0$                | Bezugsgröße für Schnelle                      | m/s               |
| $v_n$                | Schwingungsschnelle                           |                   |
| $V$                  | Raumvolumen                                   | m <sup>3</sup>    |
| $\bar{x}$            | arithmetischer Mittelwert                     | dB                |
| $x_i$                | Schalldruckpegel am i-ten Element             | dB                |
| $x,y,z$              | Koordinatenrichtungen                         | m                 |
| $Z_0$                | Schallkennimpedanz                            | Ns/m <sup>3</sup> |
| $Z_p$                | Punktimpedanz                                 | Ns/m <sup>3</sup> |
| $Z_Q$                | Quellimpedanz                                 | Ns/m <sup>3</sup> |

| <b>Formelzeichen</b> | <b>Bedeutung</b>            | <b>Einheit</b>    |
|----------------------|-----------------------------|-------------------|
| $\mu$                | Querkontraktionszahl        |                   |
| $\alpha$             | Schallabsorptionsgrad       |                   |
| $\rho$               | Dichte                      | kg/m <sup>3</sup> |
| $\lambda$            | Wellenlänge                 | m                 |
| $\sigma$             | Wiederholstandardabweichung | dB                |

Indizes

|     |  |
|-----|--|
| $n$ | Normalkomponente senkrecht zur Plattenoberfläche |
| $M$ | Modell   |
| $O$ | Original   |

# 1 Einleitung

Lärm ist eine der relevantesten Umwelteinwirkungen auf den Menschen. In Ballungsgebieten sind mehr als 80% der Einwohner davon betroffen. Vor allem im baulichen Bereich werden wirkungsvolle Schallschutzmaßnahmen erwartet. Die Umsetzung dieser Maßnahmen ist eine der Aufgaben der Bauakustik. [Fas98] Diese wird in drei Hauptgebiete unterteilt:

- die Luftschalldämmung von Decken, Wänden, Türen, Fassaden und Fenstern,
- die Körperschalldämmung von Decken, wobei das Hauptaugenmerk auf der Trittschalldämmung liegt,
- der Schallschutz von haustechnischen Anlagen, z. B. Wasserinstallationen, Heizungsanlagen oder Fahrstühle.

Durch die Anregung eines Bauteils durch Luft- oder Körperschall kommt es in benachbarten Räumen zu einer Luftschallabstrahlung. Für die Sicherstellung einer guten Wohnqualität in Gebäuden wird ein möglichst hoher Schallschutz angestrebt. Normen und Richtlinien, vor allem die DIN 4109, schreiben Mindestanforderungen an die Schalldämmung für Aufenthaltsräume vor, bzw. geben Empfehlungen für den erhöhten Schallschutz.

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Trittschalldämmung. In der DIN 4109 sind die Anforderungen für den Trittschall festgelegt. Für die bauakustische Planung und Ausführung werden spezielle Eingangsdaten benötigt. Diese Daten werden in Prüfständen gewonnen. Während es am Bau viele unterschiedliche Deckengrößen gibt, sind Decken in Prüfständen üblicherweise 20 m<sup>2</sup> groß. Mögliche Abhängigkeiten zwischen dem Trittschallpegel und den Abmessungen des Empfangsraumes und der Deckengröße werden in der Norm jedoch nicht berücksichtigt.

In den letzten Jahren wurden in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt bereits viele Untersuchungen zum Einfluss der Raumabmessungen auf die Luftschalldämmung durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die Größe der Trennfläche zwischen den Räumen einen Einfluss auf die Schalldämmung oberhalb der Koinzidenzfrequenz besitzt. Messwerte unterhalb der Koinzidenzfrequenz streuen sehr stark. Diese Untersuchungen sollen auf den Trittschall erweitert werden. Ziel der Arbeit ist es, den Einfluss der Raumgeometrie auf den Norm-Trittschallpegel mithilfe der Modellmesstechnik experimentell zu ermitteln. Anhand der Messungen sollen Veränderungen des Norm-Trittschallpegels aufgezeigt und in Form von Unsicherheiten und Korrekturen ausgedrückt werden.

Messungen im Modellmaßstab haben viele Vorteile. Ein Modellprüfstand ist gegenüber einem Originalprüfstand wesentlich unkomplizierter und kostengünstiger an Laborbedingungen anzupassen. Die Variation der Randbedingungen wird vereinfacht. Somit können der Aufwand und die Kosten dieser Untersuchungen stark reduziert werden.

Es wird ein Modellprüfstand im Maßstab 1:5 angefertigt und erprobt. Mit dem Prüfstand ist die Einstellung verschiedener Raumgeometrien möglich. Es kommen zwei Deckentypen zum Einsatz. Für jede Raumgeometrie wird der Trittschallpegel auf einer Holzbalkendecke sowie auf einer Betondecke bestimmt. Holzbalkendecken spielen vor allem in der Altbausanierung eine große Rolle, während in Neubauten bevorzugt Stahlbetondecken verwendet werden. Zur Anregung der Modelldecken ist ein Modell-Hammerwerk vorgesehen. Im Vorfeld jedoch zeichnet sich ab, dass der Bau eines solchen Modell-Hammerwerks im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht realisierbar ist. Deshalb wird nach möglichen anderen Anregungsquellen gesucht, die erforscht und getestet werden müssen.

Mit den Modellmessungen soll nicht der identische spektrale Verlauf des Norm-Trittschallpegels einer Prüfstandsdecke erreicht werden, sondern es sollen Unterschiede bei verschiedenen Raumgeometrien aufgezeigt werden. Eine möglichst genaue Anpassung der Körperschallquellen an ein Norm-Hammerwerk ist dennoch sinnvoll, damit Einzahlwerte bestimmt werden können.

Wird ein Gebäude in Skelettbauweise errichtet, wird auch vom *leisen Wohnen* gesprochen. Ein Teil der Untersuchungen der Wirkung des Trittschallpegels werden auch am Skelettbau durchgeführt. Dafür wird eine kleine Raumgeometrie eingestellt und verschieden große Betondecken aufgelegt. Wie stark der Effekt der Verringerung des Trittschallpegels im Skelettbau ist, wird anhand der ermittelten Werte untersucht.

## 2 Wissenschaftliche Grundlagen

### 2.1 Körperschall

Viele Schallereignisse werden durch schwingende Festkörper erzeugt, weitergeleitet oder abgestrahlt. Dieses Gebiet der Physik wird als „Körperschall“ bezeichnet. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem hörbaren Frequenzbereich zwischen 20 Hz bis 20 kHz. Die Erschütterungen oder Erdbeben bei tieferen Frequenzen fallen in das Gebiet der mechanischen Schwingungen und die Schwingungen bei hohen Frequenzen werden dem weiten Gebiet des Ultraschalls zugeordnet. [Cre67]

Die Bauakustik beschäftigt sich vor allem mit der Weiterleitung von Schall in Gebäuden, die durch Dehn- und BiegeWellen erfolgt. Es wird bezüglich der Schwingungsanregung zwischen Luft- und Körperschall unterschieden. Bei der Luftschallanregung werden durch Luftschallwellen, die z. B. beim Sprechen, durch Lautsprecher oder von äußeren Lärmquellen erzeugt werden, die Bauteile zu Schwingungen angeregt. Körperschall entsteht durch den festen Kontakt mit einer Kraftquelle, wodurch Wechselkräfte und -momente in Wand oder Decke eingeleitet werden. Die Wand- und Deckenschwingungen führen zur Luftschallabstrahlung in die darunter- oder danebenliegenden Räume. Diese Abstrahlung ist häufig unerwünscht. Weiterhin ist es möglich, dass durch Weiterleitung der Schwingungen in der Gebäudestruktur die Abstrahlung an anderer Stelle erfolgt. Wird z. B. die Decke durch eine Punktquelle angeregt, breitet sich die entstehende BiegeWelle kreisförmig aus. Eine der wichtigsten Körperschallquellen in einem Gebäude stellt das Umhergehen von Personen und der damit verbundene Schwingungseintrag in die Gebäudestruktur dar. Dies wird als „Trittschall“ bezeichnet.

Weitere Körperschallquellen in Häusern sind:

- Spielende Kinder
- Verschiedene Musikinstrumente (z. B. Klavier, Cello, Schlagzeug)
- Technische Anlagen (z. B. Heizungsanlage, Wasserleitungen, Armaturen, Waschmaschine)

Körperschall wird gekennzeichnet durch den Schnellepegel  $L_v$ , der auch als Körperschallpegel bezeichnet wird. [Kut04]

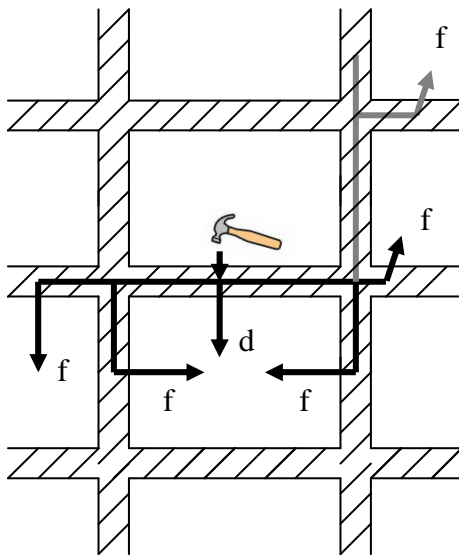
$$L_v = 20 \lg \left( \frac{\tilde{v}_n}{\tilde{v}_0} \right) \text{dB} \quad (2.1)$$

$\tilde{v}_0$  Bezugsgröße =  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s

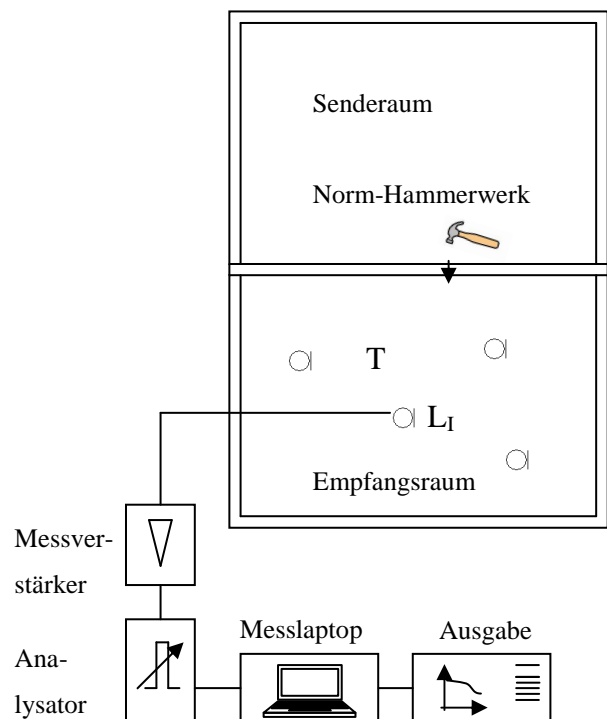
$n$  Normalkomponente senkrecht zur Plattenoberfläche

## 2.2 Trittschalldämmung

Beim Trittschall handelt es sich um eine spezielle Art der Körperschallanregung. Zur Messung der Trittschalldämmung wird auf eine genormte Körperschallquelle zurückgegriffen, das Norm-Hammerwerk. Mit fünf gleichmäßig in einer Reihe angeordneten Hämmern soll es u. a. das Trittschallverhalten von Decken nachbilden. Der Abstand der einzelnen Hämmer beträgt 100 mm. Jeder der Hämmer wiegt 500 g. Die Anregung des Bauteils erfolgt durch den freien Fall der Hämmer aus einer Höhe von vier Zentimetern. In einer Sekunde treffen zehn impulshaltige Schläge auf das zu prüfende Bauteil. Der Empfangsraum befindet sich meistens im direkt darunter liegenden Raum, kann aber auch horizontal oder diagonal liegen (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2).



**Abbildung 1:** Schemazeichnung möglicher Trittschallübertragungswege  
d- Direktschall, f - Flankenschall



**Abbildung 2:** Schemazeichnungen des Messaufbaus zur Bestimmung der Trittschalldämmung



Die Messung des Trittschallpegels erfolgt in Frequenzbändern der Breite einer Terz. Die Anregung der Decke muss an mindestens vier unregelmäßig verteilten Positionen erfolgen. Bei Holzbalkendecken oder ähnlichen Konstruktionen ist eine erhöhte Anzahl von Hammerwerkspositionen sinnvoll, und das Norm-Hammerwerk sollte diagonal zur Deckenspannrichtung aufgestellt werden. Im Empfangsraum wird, meist mit bewegten Mikrofonen, der Schalldruckpegel zeitlich und räumlich gemittelt. Voraussetzung für die räumliche Mittelung ist eine ausreichende Diffusität des Schallfeldes. Aus den Ergebnissen der Messungen wird nun der Trittschallpegel durch energetische Mittelung errechnet. Weiterhin ist die Durchführung einer Messung der Nachhallzeit notwendig. Mit der Nachhallzeit ist es dann möglich, die äquivalente Schallabsorptionsfläche zu berechnen, die zur Eliminierung der Eigenschaften des Empfangsraums dient. [Kut04] [Fas98]

Die Berechnung des Norm-Trittschallpegels  $L_n$  erfolgt mit folgender Gleichung:

$$L_n = L_i + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB} \quad (2.2)$$

$L_i$  Trittschallpegel im Empfangsraum in dB

$A$  äquivalente Schallabsorptionsfläche im Empfangsraum in  $\text{m}^2$

$A_0$  Bezugsabsorptionsfläche, die  $10 \text{ m}^2$  beträgt

$$L_i = 10 \lg \frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} \text{ dB} \quad (2.3)$$

$\tilde{p}$  effektiver Schalldruck in Pa

$p_0$  Bezugswert =  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$

Bei der Bestimmung des Trittschallpegels wäre es eigentlich interessant zu wissen, welche Schalleistung in den Empfangsraum übertragen wird. In der Bauakustik wird aber der Schalldruckpegel  $L_i$  im Empfangsraum als Maß für die von der Decke abgestrahlte Schalleistung betrachtet. Die Energiedichte in einem Raum ist umgekehrt proportional zu seiner äquivalenten Absorptionsfläche  $A$ . Daher werden Schalldruckpegel auf eine einheitliche Absorption von  $10 \text{ m}^2$  bezogen.

Die äquivalente Schallabsorptionsfläche berechnet sich mithilfe der Sabine'schen Nachhallzeitformel aus der Nachhallzeit  $T$  und dem Volumen  $V$  des Raumes.

$$A = \frac{24 \ln 10 V}{c_0 T} \quad (2.4)$$

- $V$      Volumen des Empfangsraumes in  $\text{m}^3$   
 $T$      gemessene Nachhallzeit im Empfangsraum in s  
 $c_0$     Schallgeschwindigkeit in Luft = 343 m/s

Zur Sicherstellung, dass keine Verfälschung der Messwerte durch Fremdgeräusche hervorgerufen wird, ist zusätzlich eine Störpegelkorrektur notwendig. Dazu wird eine Fremdgeräuschmessung durchgeführt. Das Fremdgeräusch muss mindestens 6 dB unter dem gemessenen Schalldruckpegel liegen. Dieser Schalldruckpegel stellt eine Kombination aus Signal und Fremdgeräusch dar. Ist die Pegeldifferenz kleiner als 15 dB, ist eine Störgeräuschkorrektur nach Gleichung (2.5) notwendig:

$$L = 10 \lg(10^{L_{sb}/10\text{dB}} - 10^{L_b/10\text{dB}}) \text{ dB} \quad (2.5)$$

- $L$      korrigierter Signalpegel in dB  
 $L_{sb}$     Signal und Fremdgeräusch in dB  
 $L_b$      Fremdgeräuschpegel in dB

## 2.3 Ermittlung des Einzahlwertes für den Trittschall

Alle verwendeten Größen, die zur Kennzeichnung der Trittschalldämmung von Bauteilen dienen, sind frequenzabhängig. Für eine einfachere Handhabung dieser Größen werden Einzahlangaben eingeführt. Ein Nachteil dieser Angaben besteht darin, dass die tatsächliche Störwirkung bei tiefen Frequenzen in der Bewertung als zu gering eingestuft wird und hohe Frequenzen zu stark bewertet werden. Weiterhin kann eine schlechte Trittschalldämmung in einem bestimmten Frequenzbereich durch eine gute Schalldämmung in anderen Frequenzbereichen ausgeglichen werden. Die Ermittlung des Einzahlwertes  $L_{n,w}$  erfolgt mithilfe der DIN EN ISO 717-2. Dabei werden die Ergebnisse der Messungen (nach

DIN EN ISO 140-6) mit Bezugswerten im Frequenzbereich von 100 Hz bis 3150 Hz verglichen.

Für die Bewertung der Ergebnisse wird die Bezugskurve solange in 1-dB-Schritten verschoben, bis die Summe der ungünstigsten Abweichung, also die mittlere Überschreitung der Messkurve, so groß wie möglich, aber nicht größer als 32,0 dB wird. Der Einzahlwert  $L_{n,w}$  wird auf der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz abgelesen.

Für ein genaueres Ergebnis des Einzahlwertes, um auch kleinere Unterschiede in der Trittschalldämmung sichtbar zu machen, wird zusätzlich die Bezugskurve um 1/10 dB verschoben. Damit ergibt sich ein Einzahlwert auf eine Stelle nach dem Komma genau. [DIN717-2]

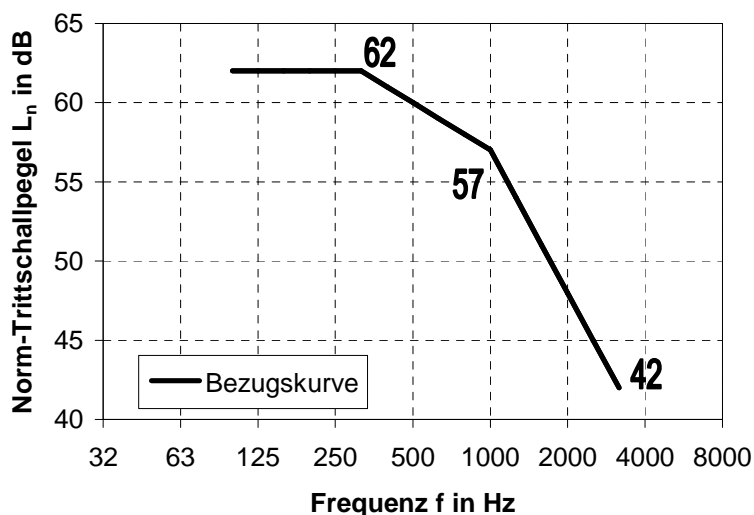


Abbildung 3: Bezugskurve zur Bewertung der Trittschalldämmung [Fas98]

## 2.4 Holzbalken- und Betondecken

Die Trittschalldämmungsmessungen erfolgen in dieser Arbeit an Rohdecken, also Decken ohne Deckenauflagen. Solche Decken können als einschalige Massivdecken oder als zweischalige Konstruktionen gebaut sein. Bei der Massivdecke wird davon ausgegangen, dass sie eine homogene Deckenplatte darstellt. Holzbalkendecken besitzen aufgrund anderer akustischer Eigenschaften als Massivdecken eine Sonderstellung.

Der bewertete äquivalente Trittschallpegel  $L_{n,eq,w}$  für homogene Schwerbeton-Decken ist näherungsweise nach Gleichung (2.6) zu bestimmen. Dafür ist die Kenntnis der

flächenbezogenen Masse  $m''$  notwendig. Die Gleichung ist anwendbar für Decken mit flächenbezogenen Massen zwischen 100 und 600 kg/m<sup>2</sup>.

$$L_{n,eq,w} = 164 - 35 \lg m'' \text{ dB} \quad (2.6)$$

$m''$  flächenbezogene Masse in kg/m<sup>2</sup>

Bei Holzbalkendecken ist der Trittschallpegel schwerer abschätzbar, da die Rohdecken im Regelfall weder als besonders schwer noch als besonders steif eingestuft werden können. Die einzelnen Elemente der Decke können sich gegenseitig beeinflussen und dadurch Systeme mit mehreren Resonanzen ausbilden (vgl. Aufbau der Holzbalkendecke in Kapitel 3.4). Aufgrund einer geringen flächenbezogenen Masse und ausgeprägter Körperschallbrücken zwischen den Schalen treten vor allem in den tiefen Frequenzbereichen hohe Schallübertragungen auf. Es zeigen sich große Verbesserungen der Trittschallübertragung, wenn der Balkenabstand erhöht wird, da dadurch die Körperschallübertragung reduziert wird. [Fas98] [Koh06]

## **3 Der Modellprüfstand**

### **3.1 Bedingungen für Prüfstände mit unterdrückter Flankenschallübertragung**

Ein Teil der DIN EN ISO 140-1 enthält die Anforderungen an Prüfstände zur Messung der Schalldämmung von Bauteilen. Diese Norm gilt für Prüfstände mit unterdrückter Flankenschallübertragung bzw. für Prüfstände, bei denen eine bauliche Trennung zwischen Sende- und Empfangsraum besteht.

Für Prüfstände gibt es Festlegungen über Größe, Beschaffenheit, Einbaubedingungen u. ä. Nach DIN EN ISO 140-1 muss das Volumen des Empfangsraumes mindestens 50 m<sup>3</sup> betragen. Damit ein diffuses Schallfeld entsteht, müssen im Empfangsraum Diffusoren angebracht werden. Die Abmessungen dieses Raumes sind so zu wählen, dass Eigenfrequenzen in tiefen Frequenzbändern möglichst gleichmäßig auftreten. Auf diese Weise wird die Überlagerung mehrerer stehender Wellen in einer Terz erreicht und es bildet sich ein gleichmäßiges Schallfeld aus. Die Nachhallzeit sollte bei tiefen Frequenzen eine Dauer von zwei Sekunden nicht überschreiten und nicht kleiner als eine Sekunde werden. Weiterhin ist die Unabhängigkeit der gemessenen Trittschalldämmung von der Nachhallzeit zu überprüfen.

Ebenso ist der Störpegel zu bestimmen, der ausreichend niedrig sein muss (vgl. Kapitel 2.2.). Damit sichergestellt ist, dass im Empfangsraum nur das Schallfeld von der Trittschallanregung gemessen wird, ist eine Überprüfung der Luftschalldämmung zwischen Sende- und Empfangsraum notwendig. Die Luftschalldämmung muss ausreichend groß sein. Sind alle Bedingungen erfüllt, ist gewährleistet, dass eine ordnungsgemäße Messung nach DIN EN ISO 140-1 durchgeführt werden kann. [DIN140-1]

### **3.2 Skalierungsgesetze**

Ziel der Modellierung ist es, die akustischen Eigenschaften des Originalraumes nachzubilden. Die grundlegendste Voraussetzung für die Übertragbarkeit von Ergebnissen vom Modell auf das Original ist die geometrische Ähnlichkeit eines Modells mit der Originalausführung. Für die Modellierung der Luft- und Körperschallfelder ist dies aber nicht hinreichend, sondern es

müssen weitere Ähnlichkeitsbedingungen, wie z. B. die materialspezifischen Anforderungen, erfüllt sein.

In welcher Form Messergebnisse vom Modell auf ein Original zu übertragen sind, wird von der Ähnlichkeitstheorie bestimmt. Eine Vielzahl von technischen Einflussgrößen werden zu wenigen Größen zusammengefasst. Für die Übertragung vom Original auf das Modell werden dimensionslose Ähnlichkeitskennzahlen (wie z. B. Reynolds-Zahl, Helmholtz-Zahl oder Strouhal-Zahl) definiert. [Kli07] [Köl99] [Sur07] [Witt07]

In der Akustik spielt die Helmholtz-Zahl  $He$  als Ähnlichkeitskennzahl eine entscheidende Rolle. Die Definition der Helmholtz-Zahl lautet wie folgt.

$$He = \frac{l}{\lambda} = kl \quad (3.1)$$

$l$  Länge in m

$\lambda$  Wellenlänge in m

Es besteht dann physikalische Ähnlichkeit, wenn die Helmholtz-Zahl im Original und im Modell den gleichen Zahlenwert besitzt.

$$He_M = He_O \quad (3.2)$$

$M$  Modell

$O$  Original

Die geometrische Ähnlichkeit zwischen Original und Modell ist dann gegeben, wenn alle Abmessungen des Raumes (Länge  $l$ , Breite  $b$  und Höhe  $h$ ) mit dem gleichen Maßstabsfaktor  $M$  nachgebildet werden können. Dies gilt ebenfalls für die Lage und Position der Mikrofone bzw. Lautsprecher ( $x$ ,  $y$  und  $z$ ) im Raum, sowie die Position der Quellen auf der Decke. Diese Ähnlichkeitsbeziehung gilt ebenso für das Verhältnis der Plattendicken  $d$ .

$$(l, b, h, x, y, z, d)_M = \frac{1}{M} (l, b, h, x, y, z, d)_O \quad (3.3)$$

Aus den beiden Gleichungen (3.1) und (3.3) ergibt sich die Modellwellenlänge:

$$\lambda_M = \frac{1}{M} \lambda_O \quad (3.4)$$

Das Ausbreitungsmedium Luft findet sich sowohl im Original als auch im Modell. Die Schallgeschwindigkeit  $c_0$  in Luft ist nur von der Temperatur abhängig, die konstant ist. Unter Nutzung der Gleichung  $c = \lambda \cdot f$  ergibt sich folgende Beziehung für die Modellfrequenz:

$$f_M = M \cdot f_O \quad (3.5)$$

Weiterhin ist die Skalierung der Nachhallzeit notwendig. Das in der Gleichung vorkommende Volumen  $V$  geht nach den Skalierungsgesetzen (Gleichung (3.3)) mit  $1/M^3$  ein und die äquivalente Schallabsorptionsfläche  $A$  mit  $1/M^2$ . Daraus ergibt sich:

$$T_M = \frac{24 \ln 10}{c_0} \frac{\frac{1}{M^3} V_O}{\frac{1}{M^2} A_O} = \frac{1}{M} \left( \frac{24 \ln 10}{c_0} \frac{V_O}{A_O} \right) \quad (3.6)$$

$$T_M = \frac{1}{M} T_O \quad (3.7)$$

Für eine genaue Modellierung ist auch das Körperschallfeld auf den Bauteilen zu betrachten, welches durch Longitudinalwellen und Biegewellen bestimmt wird. Auf eine Gleichheit der Helmholtz-Zahl beider Systeme ist zu achten. Das Verhältnis der Körperschall-Longitudinalwellen in einem festen Medium und einer Luftschallwelle ist unveränderlich.

$$\frac{\lambda_{\text{Körperschall}}}{\lambda_{\text{Luftschall}}} = \text{const.} \quad \left( \frac{\lambda_L}{\lambda_{\text{Luft}}} \right)_M = \left( \frac{\lambda_L}{\lambda_{\text{Luft}}} \right)_O \quad (3.8)$$

$$c_{L,M} = c_{L,O} \quad (3.9)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Platten wird bestimmt aus dem Elastizitätsmodul  $E$ , der Dichte  $\rho$  und der Querkontraktionszahl  $\mu$ . Der Einfluss von  $\mu$  ist häufig so gering, dass er vernachlässigt werden kann.

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}} \quad c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.10)$$

$$\sqrt{\left(\frac{E}{\rho}\right)_M} = \sqrt{\left(\frac{E}{\rho}\right)_O} \quad (3.11)$$

$E$  Elastizitätsmodul in N/m<sup>2</sup>

$\rho$  Dichte in kg/m<sup>3</sup>

Aus dieser Gleichung folgt, dass das Plattenmaterial eine entscheidende Rolle bei der Modellierung des Körperschallfeldes spielt. Für die Modendichte auf den Bauteilen ergibt sich:

$$P_M = P_O \quad (3.12)$$

$P$  Modendichte in 1/Hz

Die Anregung des Trennbauteils erfolgt durch eine Körperschallquelle. Es wird eine unendliche Platte betrachtet, die durch eine Punktkraft (z. B. Hammer eines Hammerwerks) angeregt wird. Für die Punktimpedanz im Modell gilt:

$$Z_{P,M} = 4d_M^2 \sqrt{\frac{E_M \rho_M}{3}} \quad (3.13)$$

$Z_P$  Punktimpedanz in Ns/m<sup>3</sup>

$$Z_{P,M} = 4 \frac{1}{M^2} d_O^2 \sqrt{\frac{\rho_M^2 E_O}{3\rho_O}} \quad Z_{P,M} = 4 \frac{1}{M^2} d_O^2 \sqrt{\frac{\rho_M^2 E_O}{3\rho_O} \cdot \frac{\rho_O}{\rho_O}} \quad (3.14)$$

$$Z_{P,M} = \frac{1}{M^2} \frac{\rho_M}{\rho_O} Z_{P,O} \quad (3.15)$$

Die Dichte der Plattenmaterialien bleibt im Original und im Modell in etwa gleich:

$$Z_{P,M} = \frac{1}{M^2} Z_{P,O} \quad (3.16)$$

Die eingeleitete Leistung ist abhängig vom Verhältnis der Quell- zur Empfängerimpedanz und sollte im Modell und Original gleich bleiben.



$$\frac{Z_{P,M}}{Z_{Q,M}} = \frac{Z_{P,O}}{Z_{Q,O}} \quad (3.17)$$

$Z_Q$  Quellimpedanz in  $\text{Ns/m}^3$

Damit gilt für die Quellimpedanz:

$$Z_{Q,M} = \frac{1}{M^2} Z_{Q,O} \quad (3.18)$$

Die Anregungsquelle kann durch ein Masseverhalten oder durch ein Federverhalten gekennzeichnet sein.

Masseverhalten:  $Z_Q = j\omega m$  (3.19)

$$\frac{Z_{Q,M}}{Z_{Q,O}} = \frac{f_M m_M}{f_O m_O} = M \frac{m_M}{m_O}$$

$$\Leftrightarrow m_M = \frac{1}{M} \frac{Z_{Q,M}}{Z_{Q,O}} m_O = \frac{1}{M^3} m_O \quad (3.20)$$

Federverhalten:  $Z_Q = \frac{s}{j\omega}$  (3.21)

$$\frac{Z_{Q,M}}{Z_{Q,O}} = \frac{s_M f_M}{s_O f_O} = \frac{1}{M} \frac{s_M}{s_O}$$

$$\Leftrightarrow s_M = \frac{1}{M} s_O \quad (3.22)$$

$m$  Masse in kg

$s$  Federsteifigkeit in N/m

Die Masse der Quellen skaliert sich also wie ein Volumen. Während die Masse im Modell um  $M^3$  verringert werden muss, ist die Federsteifigkeit nur um den Modellmaßstab zu verringern.

Die Verlustfaktoren des Materials müssen für Modell und Original annähernd gleich sein.

$$\eta_M = \eta_O \quad (3.23)$$

Unter Einhaltung der Skalierungsgesetze ergibt sich für den Norm-Trittschallpegel [Witt07]:

$$L_M(f_m) = L_O(f_o) - 10 \lg M \text{ dB} \quad (3.24)$$

### 3.3 Aufbau des Modellprüfstandes

Prüfstände werden im Regelfall nach den Anforderungen der DIN EN ISO 140-1 gebaut. Auf den richtigen Maßstab skaliert, wird diese Norm auch für Modellprüfstände angewandt. Die vorangegangenen Überlegungen zur Skalierung werden auf den Modellprüfstand übertragen. Der bauakustische Frequenzbereich von 50 Hz – 5000 Hz liegt in einem Modell im Maßstab 1:5 in den Grenzen von 250 Hz bis 25 kHz. [DIN 140-1]

Der Prüfstand soll nur für die Messung des Trittschallpegels dienen, deshalb ist lediglich der Bau eines Empfangsraumes notwendig. Dieser wird so konstruiert, dass mit den Wänden verschiedene Raumgeometrien eingestellt werden können. Die Seitenwände bestehen aus 38 mm dicken MDF-Platten (mitteldichte Faserplatte). Die Eigenschaften von MDF-Platten stimmen gut mit bauüblichen Massivwänden überein. Alle Seitenwände enthalten Nuten mit einer Tiefe von 10 mm, die zur Einstellbarkeit der Raumgeometrie (siehe Abbildung 4) dienen. Auf die Oberkante der Seitenwände wird eine umlaufende Gummidichtung aufgebracht, um einen luftdichten Abschluss zu gewährleisten. Alle Wände stehen auf einer großen Platte, die wiederum auf Holzbalken gelagert ist, um eine möglichst große Entkopplung zum Boden zu erreichen.

In Tabelle 1 finden sich die Abmessungen für die verschiedenen Raumgeometrien. Die Breite der größeren Raumgeometrie dient immer als Länge der nächst kleineren Geometrie. Die Verkleinerung der Prüfstände erfolgt im logarithmischen Maßstab.

In Kapitel 3.1 wurde beschrieben, dass der Empfangsraum von Laboratorien ein Volumen von mindestens 50 m<sup>3</sup> haben sollte. Die beiden kleinsten Raumgeometrien halten diesen Wert nicht ein (vgl. Tabelle 1). Da es aber Ziel dieser Arbeit ist, verschieden große Raumgeometrien auf die Trittschalldämmung zu untersuchen, werden auch kleinere Räume, die in Gebäuden häufig vorhanden sind, mit einbezogen.

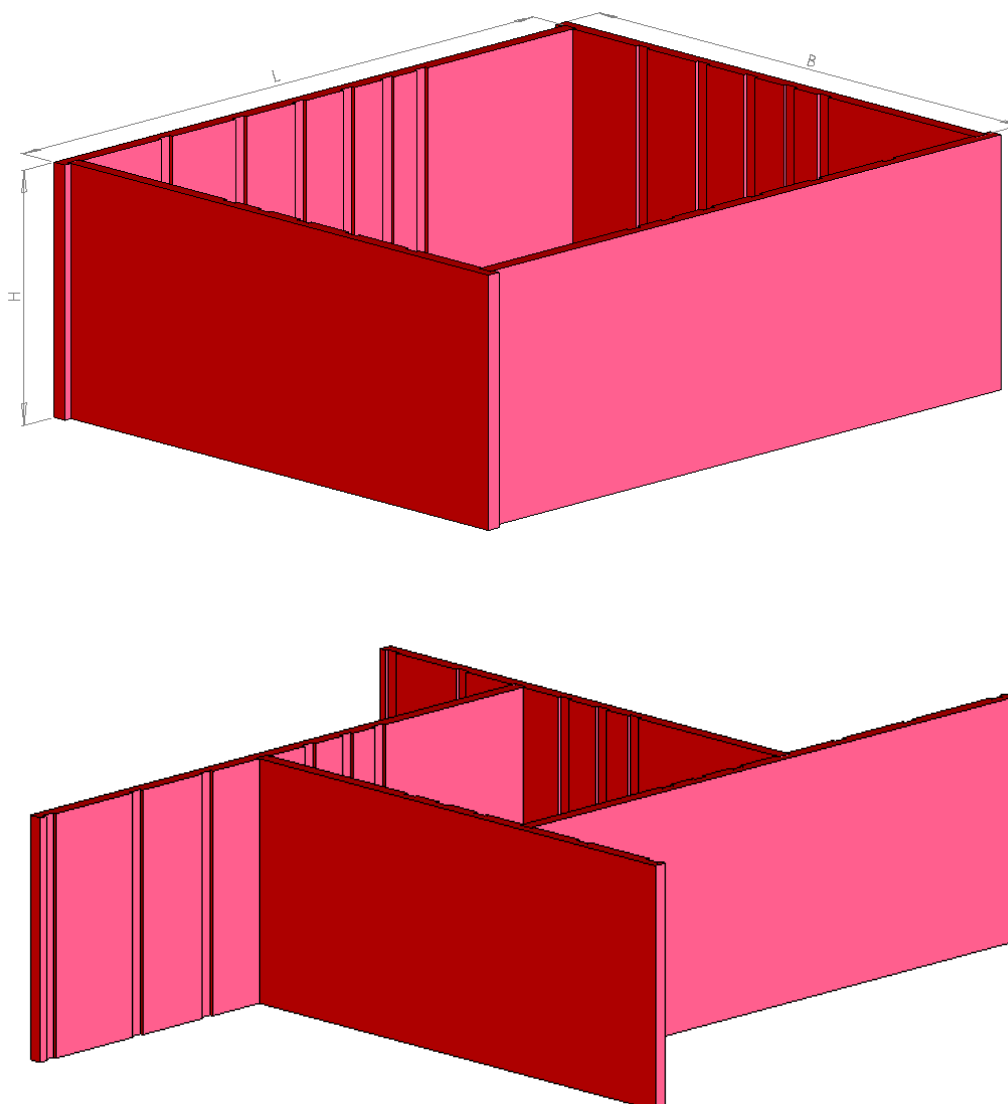


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Seitenwände zur Veränderung der Raumgeometrie des Modellprüfstandes

Tabelle 1: Abmessungen des Modells im Maßstab 1:5 und die dazugehörigen Maße im Original

| Modell-<br>geometrie | Modell        |               |               |                            |                            | Original      |               |               |                            |                            |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------------------|----------------------------|
|                      | <i>l</i> in m | <i>b</i> in m | <i>h</i> in m | <i>S</i> in m <sup>2</sup> | <i>V</i> in m <sup>3</sup> | <i>l</i> in m | <i>b</i> in m | <i>h</i> in m | <i>S</i> in m <sup>2</sup> | <i>V</i> in m <sup>3</sup> |
| 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                       | 4,7           | 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                      |

### 3.4 Aufbau der Holzbalken- und Betondecken

Im Original besteht eine Holzbalkendecke (siehe Abbildung 5) aus einer oberen Beplankung (1), den Holzbalken (2), dem Schallabsorptionsmaterial (3), der Lattung (4) sowie der unteren Beplankung (5). Die obere Beplankung wird aus einer Holzspanplatte mit einer Dicke von  $d = 22$  mm gebaut. Ein Holzbalken besitzt die Abmessung von  $120 \times 180$  mm<sup>2</sup> und der Abstand zum nächsten Balken beträgt 625 mm. Als Schallabsorptionsmaterial wird z. B. Mineralwolle verwendet, aber auch Thermo-Hanf eignet sich gut. Die Lattung wird in einem Mindestabstand von 625 mm angebracht. Die flächenbezogene Masse dieser Art der Holzbalkendecke liegt bei rund  $m'' = 60$  kg/m<sup>2</sup>. [Fas98] [DIN 140-11]

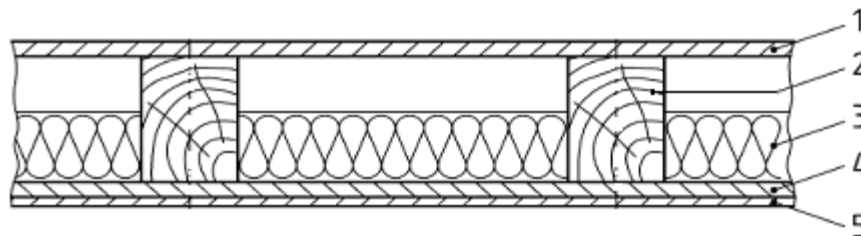


Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer Holzbalkendecke (HBD) [DIN 140-11]

Im Modell werden die Lattung und die Gipskartonplatte durch eine Hartfaserplatte mit 3 mm Dicke ersetzt. Auf der Hartfaserplatte wird ein Rahmen angebracht, der aus Holzbalken der Größe  $50 \times 25$  mm<sup>2</sup> besteht. Die Balken werden in den Rahmen geschraubt und gleichzeitig mit Montagekleber aufgeklebt. In diesem Rahmen werden die Deckenbalken mit einer Größe von ca.  $25 \times 35$  mm<sup>2</sup> und einem Abstand von 125 mm platziert (siehe Abbildung 6). Die Befestigung auf dem Rahmen erfolgt durch Schrauben und Kleben. Die Freiräume sind mit Thermo-Hanf locker aufgefüllt worden. Darüber wird die obere Beplankung angebracht. Diese wird durch eine MDF-Platte mit 4 mm Dicke modelliert. Befestigt wird die Platte gleichermaßen mit Schrauben und Kleber.

Betondecken (BD) haben häufig eine Dicke von 160 mm und eine Dichte von  $\rho = 2300$  kg/m<sup>3</sup>. Dies entspricht im Modell einer Dicke von nur 32 mm. Diese Dicke ist praktisch nicht umsetzbar, da die Stabilität der Betondecke durch Bruchgefahr nicht gegeben ist. Daher wird die Decke mit der größten Raumgeometrie in einer Dicke von 50 mm gefertigt und alle anderen Decken mit einer Dicke von 40 mm. Die Modellbetondecken haben eine Dichte von 2400 kg/m<sup>3</sup>.



Abbildung 6: Aufbau der Holzbalkendecke im Modell (ohne Absorptionsmaterial)

In Abbildung 7 sind die jeweiligen Massen der Decken dargestellt. Die Gewichtszunahme erfolgt linear zur Fläche der Decke. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die spätere Vergleichbarkeit der Messergebnisse. Der Rahmen der Holzbalkendecke besitzt nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtmasse der Decke.

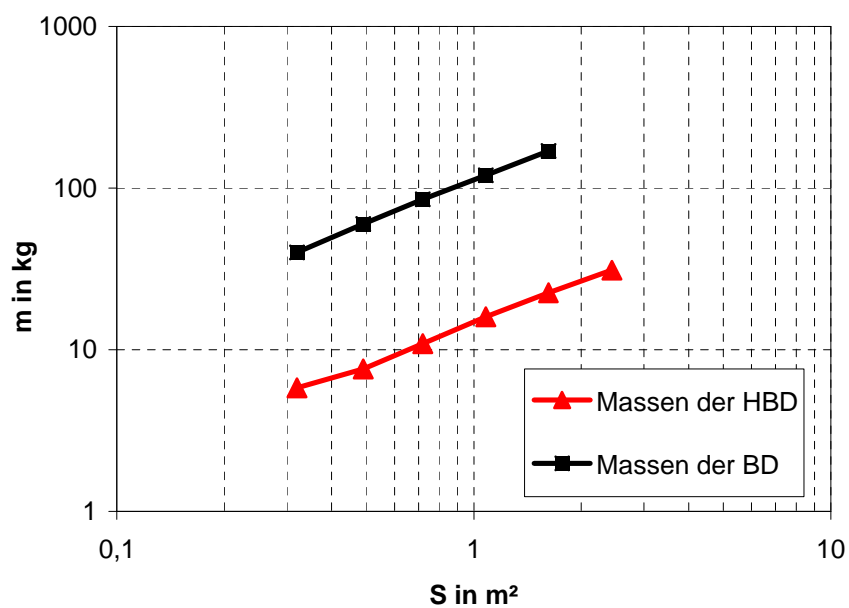


Abbildung 7: Gewichts Zunahme der Decken

## 3.5 Messausrüstung

Für die Messungen werden Viertel-Zoll-Mikrofone der Firma G.R.A.S. verwendet. Im Frequenzbereich von 10 Hz bis 40 kHz liegt der Frequenzgang bei  $\pm 1$  dB.

Für die Messung der Nachhallzeit werden zusätzlich zwei Lautsprecher, die die Form eines Würfels besitzen, verwendet. Die beiden Würfel bestehen jeweils aus sechs Einzellautsprechern der Firma Vifa (Typ: XT25 NEO-04). Die Lautsprecher besitzen ein gutes Abstrahlverhalten ab 400 Hz. Eine Abstrahlung in den beiden tieferen Terzen ist trotzdem gegeben. Die Ermittlung der Nachhallzeit erfolgt mit einem Real Time Analyzer (RTA) 840 der Firma Norsonic. Der Multianalysator OR38 von Oros wird für folgende Messungen verwendet:

- Messung des Trittschallpegels
- Signalerzeugung Shaker
- Messung der Nachhallzeit bei 25 kHz (vgl. Kapitel 3.6.1)

Der Analysator ermöglicht die gleichzeitige Messung mit acht Kanälen. Er wird mit der zugehörigen Auswertesoftware „NV Gate“ verwendet.

## 3.6 Messverfahren

### 3.6.1 Messung der Nachhallzeit

Die Ermittlung der Nachhallzeit ist notwendig, um die optimale mittlere Nachhallzeit für die Räume einzustellen. Für die hier vorhandenen Prüfstandsgeometrien sollten diese – entsprechend auf die Modellgeometrie 1:5 skaliert – zwischen 0,2 s und 0,4 s liegen. Weiterhin fließt die Nachhallzeit als Korrekturglied in die Gleichung (2.2) zur Bestimmung des Norm-Trittschallpegels ein. Als Vorlage für die Messungen der Nachhallzeiten gilt DIN EN ISO 140-6, die für die Modelltechnik interpretiert wird. [DIN140-6]

Die Auswertung der Nachhallzeit erfolgt über die Mittelung von zwei Lautsprecherpositionen und jeweils sieben (bei den beiden großen Raumgeometrien), bzw. fünf (bei den kleineren Raumgeometrien) festen Mikrofonpositionen. Tabelle 2 zeigt die nötigen Mindestabstände der Mikrofonpositionen, die in der Norm festgeschrieben sind und auf deren Einhaltung zu achten ist.

Tabelle 2: Mindestabstände der Mikrofonpositionen

| <b>Abstand zwischen</b>               | <b>Modell-<br/>Mindestabstände 1:5</b> | <b>Original-<br/>Mindestabstände</b> |
|---------------------------------------|--|--------------------------------------|
| Mikrofonpositionen                    | 14 cm                                  | 70 cm                                |
| Mikrofonposition und Raumbegrenzungen | 14 cm                                  | 70 cm                                |
| Mikrofonposition und Schallquellen    | 20 cm                                  | 100 cm                               |
| Mikrofonposition und Prüfgegenstand   | 20 cm                                  | 100 cm                               |

Zur Ermittlung der Nachhallzeit für die skalierten Frequenzen zwischen 250 Hz und 25 kHz kommen zwei Messverfahren zum Einsatz. Dies liegt darin begründet, dass das Messsystem, welches die Nachhallzeit mittels MLS-Methode (Maximum Length Sequence – Folge maximaler Länge) bestimmt, nur bis 20 kHz messen kann. Da aber auch die Nachhallzeit für 25 kHz bestimmt werden muss, kommt zusätzlich für diese Frequenz ein anderes Messverfahren mit abgeschaltetem Rauschen zur Anwendung. Der Aufwand der Messung durch die MLS-Methode ist deutlich geringer als die Messung mit dem anderen Messsystem, deshalb fiel die Entscheidung auf die Verwendung beider Verfahren.

Die Messung mittels MLS ist relativ unempfindlich gegenüber Störungen, und deshalb ist es möglich, mit deutlich geringeren Pegeln zu arbeiten. Die Lautsprecher werden mit einem „Red-White“ Rauschen betrieben. Die Messdauer beträgt 20 s. Das System berechnet aus der Rauschimpulsantwort die Energiezerfallskurve, die auch als Schroeder-Kurve bezeichnet wird. Aus dieser wird die Nachhallzeit berechnet, also der Zeitpunkt, bei dem der Schallpegel um -20 dB abgeklungen ist. Danach wird die Zerfallsdauer bis -60 dB extrapoliert. Dieser Wert wird als  $T_{20}$  bezeichnet.

Für die Bestimmung der Nachhallzeit bei 25 kHz wird ein weißes Rauschen durch die Modelllautsprecher abgestrahlt. Das Messsystem zeichnet alle 2,5 ms einen Messwert auf und erstellt ein Wasserfalldiagramm. Das Rauschsignal ist in den Frequenzgrenzen zwischen 40 Hz und 40 kHz voreingestellt. Der Empfangsraum wird ca. 2,5 s mit dem Rauschen angeregt, damit sich ein stationäres Schallfeld ausbilden kann. Danach wird das Signal abgeschaltet und der Pegelabfall über weitere 2,5 s aufgezeichnet. Aus dem aufgezeichneten Pegelschrieb wird dann die Nachhallzeit  $T_{20}$  ermittelt.

### 3.6.2 Messung des Trittschallpegels

In DIN EN ISO 140-6 ist festgelegt, dass die Erzeugung des Trittschalls mit einem Norm-Hammerwerk zu erfolgen hat. Dieses muss an mindestens vier unregelmäßig verteilt liegenden Stellen aufgestellt werden. Der Abstand des Norm-Hammerwerkes zur Kante der Decke beträgt im Modellmaßstab mindestens 12,5 cm. Weiterhin ist darauf zu achten, dass bei Holzbalkendecken die Verbindungslinie der Hämmer in einem 45° Winkel zur Richtung der Balken liegt. Da für die Modellmessung kein Norm-Hammerwerk vorhanden ist, werden die Anforderungen weitestgehend auf andere Messmittel übertragen. Es werden ein Kugelfallapparat und ein Shaker als Anregungsquellen zum Einsatz kommen (siehe Abbildung 8). Der Trittschallpegel wird mit einer Anordnung von sieben Mikrofonen in den beiden größten Räumen bzw. fünf Mikrofonen in den kleineren Empfangsräumen bestimmt. Die Einhaltung der Abstände wurde bereits im vorangegangenen Abschnitt beschrieben. Die Schalldruckpegel werden über alle Positionen der Anregungsquelle energetisch gemittelt. [DIN 140-6]

Mithilfe des Kugelfallapparates fällt eine Kugel aus einer bestimmten Höhe auf die zu messende Decke. Die Anregung erfolgt punktiert. Die Positionierung des Norm-Hammerwerkes wird – im Modell verkleinert – nachgebildet (Aufbau eines Norm-Hammerwerkes vgl. Kapitel 2.2). Für jede Hammerwerksposition werden fünf Fallpositionen der Kugel, mit einem Abstand von ca. 20 mm, festgelegt (siehe Abbildung 9). Der Schalldruckpegel wird über alle Anrege- und Mikrofonpositionen energetisch gemittelt.

Ein Shaker ist ein elektrodynamischer Wandler. Dabei wird elektrische Spannung in akustische Schallsignale umgewandelt. Ein Schallwandler besteht im Prinzip aus einem permanenten Magnetfeld und einem darin beweglich angeordneten Leiter, der mit einer schwingfähigen Membran mechanisch gekoppelt ist. In den Shaker wird ein Messsignal eingespeist. Die Messdauer wird auf  $t = 10$  s festgelegt. Der Shaker wird ebenfalls auf den festgelegten Punkten der Decke platziert. Für alle Quellpositionen wird der Schalldruckpegel über alle Mikrofonpositionen energetisch gemittelt (weitere Erläuterungen zum Kugelfallapparat und Shaker finden sich in Kapitel 5).

Zusätzlich wird für den Empfangsraum der Fremdgeräuschpegel ermittelt (vgl. hierzu die Ausführungen in Kapitel 2.2). Vor Beginn und nach Abschluss jeder Messung ist eine Kalibrierung der Mikrofone mit einem Pistonphon durchzuführen.





Abbildung 8: Anregungsquellen – links ist der Shaker dargestellt und rechts der Kugelfallapparat

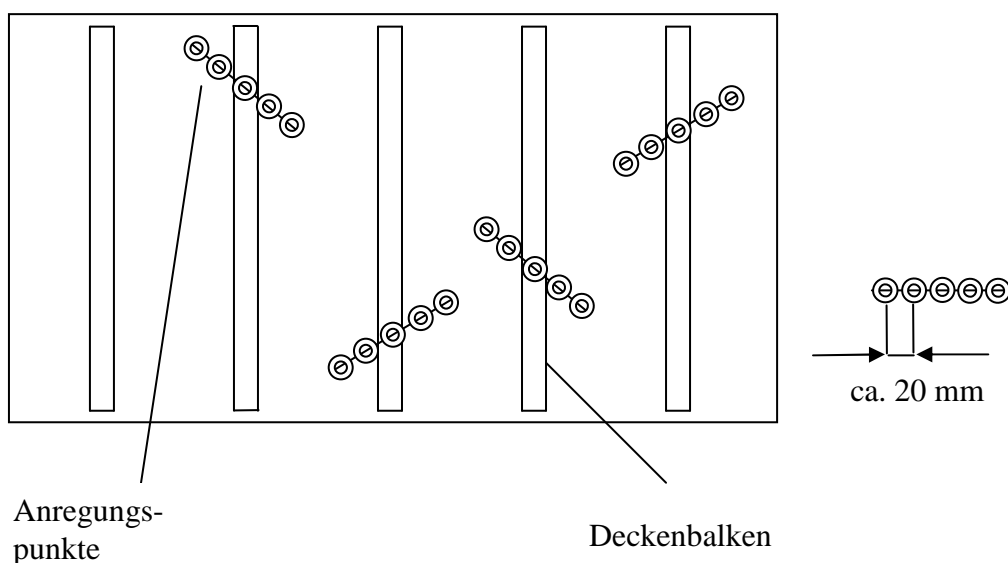


Abbildung 9: Schematische Darstellung möglicher Anregungspunkte auf der Holzbalkendecke

### 3.7 Einstellung der Nachhallzeit

Besonders bei tiefen Frequenzen tendieren Prüfräume zu sehr langen Nachhallzeiten. Dies liegt an der geringen Absorption des Raumes in diesem Frequenzbereich. Weiterhin treten

starke Raummoden auf, die zu stark schwankenden Schalldruckpegeln führen. Zur Reduzierung der örtlichen Schwankungen müssen diese Moden stark gedämpft werden, damit ein genauer Volumenmittelwert gemessen werden kann. Die Nachhallzeit wird über die Vergrößerung der Absorptionsflächen im Raum verringert.

Die folgende Beschreibung zur Einstellung der Nachhallzeit bezieht sich auf die größte Raumgeometrie (1,73 m x 1,41 m x 0,66m) unter Verwendung der Modellholzbalkendecke. Die Beschreibung des Messablaufs ist unter dem Abschnitt „Messverfahren“ zu finden. Für die Anpassung der Nachhallzeit an die empfohlenen 0,2 bis 0,4 s ist es zunächst interessant zu wissen, wie der Raum ohne zusätzliche Absorber wirkt. Die schwarze Kurve in der Abbildung 10 zeigt, dass gerade in den tiefen Frequenzen die Nachhallzeit deutlich zu lang ist. Bei 315 Hz liegt die Nachhallzeit bei 0,8 s, also doppelt so lang wie gefordert. Erst ab Frequenzen von ca. 3150 Hz liegen die Nachhallzeiten in dem gewünschten Bereich unter 0,4 s. Bei 400 Hz ist die Absorption des Raumes auch schon so gut, dass für diese spezielle Frequenz keine Absorber mehr nötig sind. Dies liegt am Aufbau der Holzbalkendecke, die bei dieser Frequenz besonders gut zu absorbieren scheint. Dieser Effekt tritt bei der Bestimmung der Nachhallzeit der Betondecke nicht auf.

Folglich ist gerade in den tiefen und mittleren Frequenzen der Einsatz von Absorbermaterial notwendig. Der erste Schritt für eine Verbesserung ist die Senkung des gesamten Nachhallniveaus mithilfe offenerporiger Absorber, die sich aus Schaumstoff bzw. Thermo-Hanf zusammensetzen. Die Absorber werden in einer Folie verpackt, damit die bereits stark durch Luftabsorption bedämpften hohen Frequenzen nicht noch mehr bedämpft werden. Die Folie bewirkt, dass Schallwellen mit hohen Frequenzanteilen in den Raum reflektiert werden. Die so genannten Flächenabsorber werden an den Raumwänden verteilt. Nach einer Überprüfungsmessung stellt sich heraus, dass die Absorber im mittleren Frequenzbereich bereits gut wirken, die Nachhallzeiten in den tiefen Frequenzen aber nahezu unverändert lang geblieben sind. Deshalb werden für diese Frequenzen (250 Hz, 315 Hz, 500 Hz und 630 Hz) spezielle Lambda-Viertel-Absorber konstruiert, die in einem schmalen Frequenzband wirken. Ein solcher Absorber ist ein einseitig offenes Rohr, das die Länge  $l$  bzw.  $\lambda/4$  besitzt. Die Wellenlänge  $\lambda$  berechnet sich aus der Schallgeschwindigkeit  $c_0$  und der benötigten Frequenz.

Ein Viertel der berechneten Wellenlänge ergibt die Länge  $l$  des Lambda-Viertel-Absorbers. Folgende Längen ergeben sich nach der Berechnung:

- 250 Hz:  $l = 0,34$  m
- 315 Hz:  $l = 0,27$  m
- 400 Hz:  $l = 0,21$  m
- 630 Hz:  $l = 0,14$  m

Es ist aber auch notwendig zu wissen, wie groß die Oberfläche der Absorber mindestens sein sollte. Dies geschieht mit der Sabine'schen Nachhallzeitformel (siehe Abschnitt 2.2).

Als Erstes wird aus der gemessenen Nachhallzeit die vorliegende Absorptionsfläche  $A_{\text{vorhanden}}$  ermittelt:

$$A_{\text{vorhanden}} = \frac{24 \ln 10}{c_0} \frac{V}{T_{20, \text{gemessen}}} \quad (3.25)$$

Auf die gleiche Weise berechnet sich auch die erforderliche Absorptionsfläche  $A_{\text{erforderlich}}$ .

$$A_{\text{erforderlich}} = \frac{24 \ln 10}{c_0} \frac{V}{T_{20, \text{soll}}} \quad (3.26)$$

Aus der Differenz der erforderlichen und der vorhandenen Absorptionsfläche ergibt sich nun die benötigte Absorptionsfläche.

$$A_{\text{benötigt}} = A_{\text{erforderlich}} - A_{\text{vorhanden}} \quad (3.27)$$

Liegt die gewünschte Nachhallzeit nun bei  $T_{20, \text{soll}} = 0,3$  s, werden für die Frequenzen folgende benötigte äquivalente Schallabsorptionsflächen erhalten:

- 250 Hz:  $A_{\text{benötigt}} = 0,52$  m<sup>2</sup>
- 315 Hz:  $A_{\text{benötigt}} = 0,54$  m<sup>2</sup>
- 500 Hz:  $A_{\text{benötigt}} = 0,52$  m<sup>2</sup>
- 630 Hz:  $A_{\text{benötigt}} = 0,48$  m<sup>2</sup>

Für diese Raumgröße wird also ziemlich viel Absorptionsmaterial benötigt, deshalb wird der Durchmesser, also die wirksame Oberfläche der Lambda-Viertel-Absorber, so groß wie möglich gewählt. Der Aufbau der Absorber wird mit HT-Abwasserrohren realisiert, die max. einen Durchmesser von  $d = 100$  mm besitzen. Im oberen Bereich des Lambda-Viertel-Absorbers ist zusätzlich Thermo-Hanf als Dämmmaterial eingebracht worden. Dies erhöht die

wirksame Bandbreite der Absorber. Der Thermo-Hanf wird in Streifen geschnitten und zusammengerollt. Diese „Schnecke“ wird locker in die Öffnung des Absorbers gesteckt. Rechnerisch würden pro Frequenz etwa 15-17 Lambda-Viertel-Absorber (bei sehr gutem Absorptionsgrad) benötigt werden. Durch die breitbandige Wirkung auch bei benachbarten Frequenzen werden jedoch nur etwa sechs bis acht Absorber pro Frequenz benötigt. Diese Absorber wurden möglichst an den Raumecken platziert, weil dort die meisten Reflektionen auftreten und damit viel Schallenergie absorbiert werden kann.

Eine folgende Messung zeigt, dass nun bei allen Frequenzen die gewünschte Nachhallzeit unter 0,4 s liegt (siehe Abbildung 10).

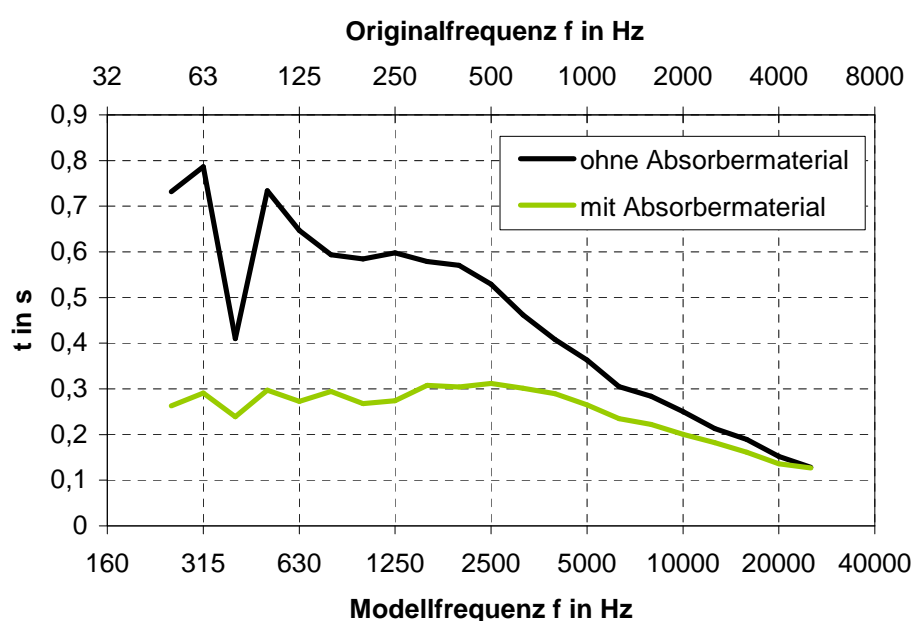


Abbildung 10: Nachhallzeit im Empfangsraum Raumgeometrie 1 mit Holzbalkendecke (mit und ohne Absorptionsmaterial)

Nach jedem Umbau für eine neue Raumgeometrie, bzw. Wechsel der Decken, ist es notwendig, den Empfangsraum mit Absorbern auszukleiden und die Nachhallzeit neu einzustellen.

## 4 Modellierung der Quelle

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt besitzt zwei Deckenprüfstände, wobei der erste mit einer Holzbalkendecke ausgestattet ist und der zweite mit einer Betondecke. Die Decken werden durch ein Norm-Hammerwerk unterschiedlich angeregt. Auf beiden Decken wurden Messungen durchgeführt, um die Anregungsspektren der Decken zu bestimmen. Mithilfe dieser Ergebnisse soll Kenntnis darüber gewonnen werden, wie das Anregungssignal eines Shakers erzeugt werden muss, der auf den Modelldecken als Anregungsquelle für die Trittschalldämmungsmessung zum Einsatz kommen soll. Das Signal muss entsprechend auf den veränderten Frequenzbereich skaliert werden.

Die Messungen im Deckenprüfstand sind mit einem OR38-Multi-Analysator durchgeführt worden. Auf beiden Decken wurden jeweils vier Beschleunigungsaufnehmer positioniert. Die Anordnung der Aufnehmer erfolgte unregelmäßig und im vorderen Teil des Prüfstandes. Das Norm-Hammerwerk wurde an zwei verschiedenen Positionen im hinteren Teil des Prüfstandes aufgestellt. Für eine bessere Auflösung in den tieferen Frequenzen wurden pro Hammerwerksposition zwei Messungen durchgeführt. Die erste Messung erfolgte in einem Frequenzbereich von  $f = 1 \text{ Hz} - 800 \text{ Hz}$  (Bandbreite  $B = 0,125 \text{ Hz}$ ) mit  $N = 16348$  Abtastwerten und einer Spektrallinienanzahl von  $N_B = 6400$ . Für die zweite Messung wurde ein Frequenzbereich von  $1 \text{ Hz}$  bis  $6400 \text{ Hz}$  (Bandbreite  $B = 1 \text{ Hz}$ ), ebenfalls mit  $N_B = 6400$  Linien, eingestellt. Die Fensterung erfolgte mittels Hanning-Fenster. Die Mittelungszeiten betragen  $48 \text{ s}$  bzw.  $32 \text{ s}$ . Als Ergebnis erhielt man Spektren des Beschleunigungspegels über der Frequenz.

Um beide Messungen in einem Diagramm darstellen zu können, war es notwendig, die spektrale Leistungsdichte  $L_{af}$  zu berechnen. Dies geschieht mit folgender Formel:

$$L_{af} = 10 \lg \left( \frac{a^2 B_0}{a_0^2 B} \right) \text{ dB} = \left[ 10 \lg \left( \frac{a^2}{a_0^2} \right) + 10 \lg \left( \frac{B_0}{B} \right) \right] \text{ dB} \quad (4.1)$$

- $B_0$     Bezugswert =  $1 \text{ Hz}$
- $B$      Bandbreite in  $\text{Hz}$
- $a$      Beschleunigung in  $\text{m/s}^2$
- $a_0$     Bezugswert =  $10^{-6} \text{ m/s}^2$

Da die Beschleunigungspegel aus den Messungen bekannt sind, ist nur noch der Korrekturfaktor zu berechnen. Bei einer Bandbreite von  $B = 0,125$  Hz sind 9,03 dB zu jedem Pegel zu addieren. Der Korrekturfaktor bei  $B = 1$  Hz beträgt 0 dB. Für das Diagramm wurde aus der ersten Messung der Frequenzbereich bis 500 Hz verwendet und aus der zweiten Messung der Frequenzbereich ab 500 Hz bis 5000 Hz.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 11 dargestellt. Als erstes ist zu erkennen, dass die Holzbalkendecke durch das Norm-Hammerwerk deutlich mehr angeregt wird als die Betondecke. Dies liegt daran, dass sie im Gegensatz zur Betondecke leicht ist und daher eher schwingt. Weiterhin ist festzustellen, dass das Spektrum auf der Holzbalkendecke ab ca. 2000 Hz abfällt, was bei der Massivdecke nicht zu beobachten ist. Dies liegt an der hohen Kontaktsteife der Decke. Oberhalb dieser Resonanzfrequenz kommt es zu einer Entkopplung zwischen Hammer und Decke.

Besonders bei der Holzbalkendecke wird bei tiefen Frequenzen das 10 Hz-Linienspektrum sichtbar. Auch die 2 Hz-Abstände für jeden einzelnen Hammer sind gut erkennbar (Abbildung 12). Bei der Betondecke war dieser Effekt nur an einigen Messpunkten der Decke feststellbar. Bei hohen Frequenzen stellt sich für beide Decken ein Breitbandspektrum ein.

Für die Generierung eines Signals für den Shaker ist also das 10 Hz-Linienspektrum zu beachten, sowie die Schläge der Hämmer mit 2 Hz. Mehr zur Erzeugung des Signals siehe Kapitel 5.2.3.

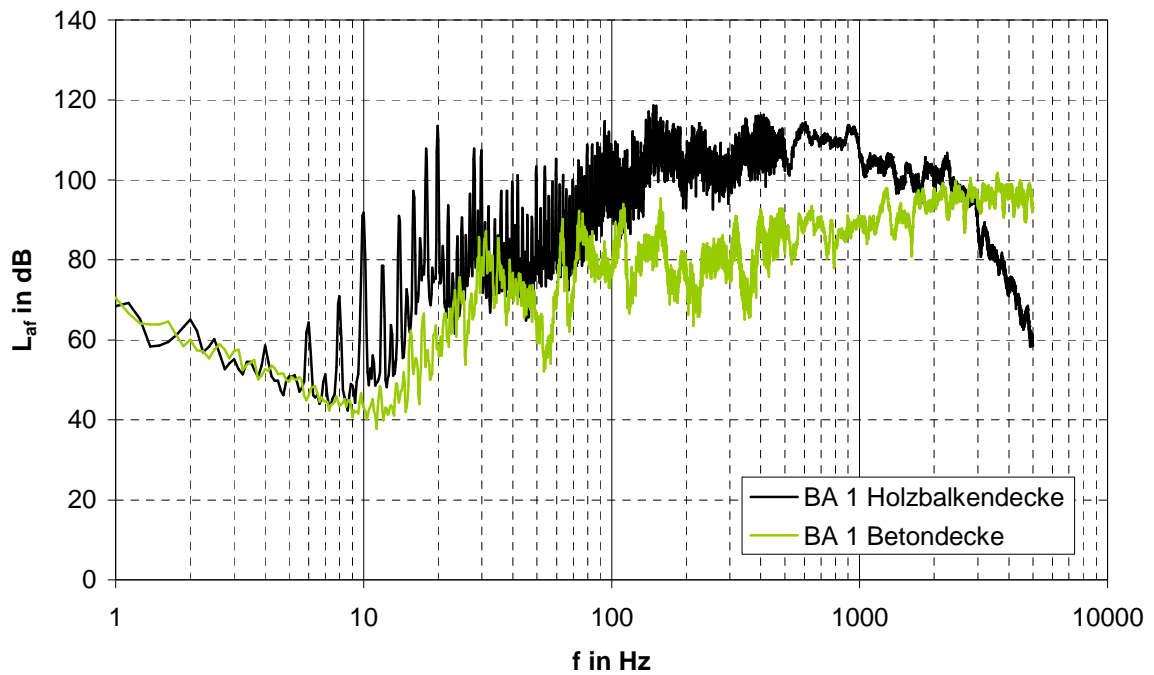


Abbildung 11: Spektrale Leistungsdichte einer Betondecke und Holzbalkendecke

BA - Beschleunigungsaufnehmer

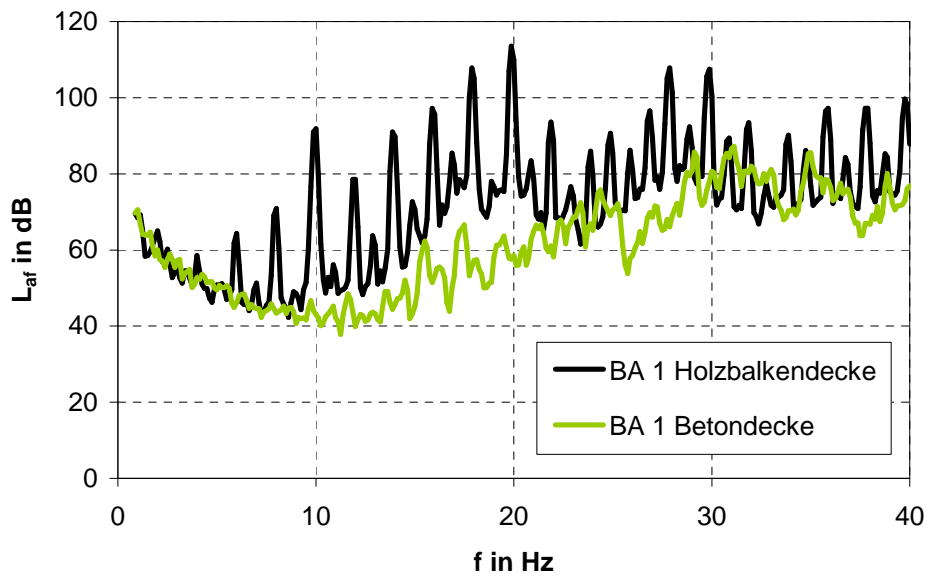


Abbildung 12: Spektrale Leistungsdichte im Frequenzbereich bis 40 Hz

## **5 Voruntersuchungen**

### **5.1 Auswahl der Körperschallquellen**

Der Norm-Trittschallpegel wird normalerweise mithilfe eines Norm-Hammerwerks ermittelt. Da die Untersuchungen im Maßstab 1:5 durchgeführt werden, muss auch das Modell-Hammerwerk im entsprechenden Maßstab gebaut werden (Beschreibung eines Norm-Hammerwerks vgl. Kapitel 2.2). Die Masse der einzelnen Hämmer beträgt damit noch jeweils vier Gramm und sie fallen aus einer Höhe von acht Millimetern. Dieses verkleinerte Hammerwerk muss 50 impulsartige Schläge pro Sekunde auf die zu prüfende Decke geben.

Der Bau des Modell-Hammerwerks in dieser Größe stellte sich dann aber als technisch nur schwer umsetzbar heraus. Die Konstruktion setzt eine umfangreiche Forschung, vor allem im Bereich der Hammeransteuerung, voraus. Dies war innerhalb des kurzen Zeitraums der Diplomarbeit nicht zu realisieren. Weiterhin war nicht klar, ob der Energieeintrag der Hämmer, die nur aus einer Höhe von acht Millimetern fallen, ausreichend gewesen wäre, um ausreichend hohe Schalldruckpegel über dem Störgeräusch messen zu können.

Deshalb wurden Alternativen benötigt, mit denen ähnlich gut der Trittschallpegel gemessen werden kann. Eine Möglichkeit ist die Anregung der Decke mithilfe einer Kugel. Sie soll den Aufschlag eines einzelnen Hammers nachbilden. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung eines Shakers, der mit einem speziellen Signal (Multisinus) gespeist wird, mit dem die Decke angeregt wird. In den nächsten Abschnitten wird auf die Untersuchung der beiden Anregungsquellen näher eingegangen.

### **5.2 Kugelfallapparat**

Das Prinzip des Kugelfallapparates ist einfach. Eine Kugel fällt aus einer bestimmten Höhe und regt die Decke zu Schwingungen an. Im Empfangsraum wird dann der Trittschallpegel gemessen. Der Unterschied zu einem Hammerwerk liegt darin, dass die Kugel nur einen Impuls auf die Decke gibt, während das Hammerwerk kontinuierlich impulsartige Schläge auf das Bauteil gibt. Der Fall der Kugel erzeugt eine freie Schwingung der Decke. Ein wichtiger Gegensatz zum Hammerwerk besteht in der Aufschlagfläche. Während die Kugel einen Durchmesser von 10 mm aufweist, ist die Aufschlagfläche eines Hammers verrundet und



besitzt einen Kugelradius von 500 mm. Die Gewichte von Hammer und Kugel betragen jeweils 4 g. In den nächsten Abschnitten wird beschrieben, welche Einflüsse beim Messen zu beachten sind, damit mit dem Kugelfallapparat Norm-Trittschallpegel bestimmt werden können. Fast alle Testmessungen wurden auf der Holzbalkendecke durchgeführt, da sie im Vergleich zur Betondecke weniger homogen ist und damit größere Unsicherheiten aufweist.

### 5.2.1 Höhenmessung und -korrektur

Bei einem Modell-Hammerwerk im Maßstab 1:5 schlagen die Hämmer aus einer Höhe von 8 mm auf die Decke. Eine Kugel aus dieser Höhe fallen zu lassen, ist aber sehr fehleranfällig und auch die Einbringung von genügend Energie in die Decke, gerade bei höheren Frequenzen, ist nicht gegeben. Deshalb wurde entschieden, die Kugel aus einem Vielfachen der Höhe fallen zu lassen. Die potenzielle Energie  $E_{\text{pot}}$  der Kugel beträgt:

$$E_{\text{pot}} = mgh \quad (5.1)$$

Mit einer Verdopplung der Höhe verdoppelt sich also auch die potenzielle Energie, da die Masse der Kugel sowie die Fallbeschleunigung konstant bleiben. Das heißt, pro Verdopplung der Höhe ist ein Anstieg des Schalldruckpegels im Empfangsraum um 3 dB zu erwarten.

Dies sollte nun in einer Messung nachgewiesen werden. Die Messung erfolgte auf der Holzbalkendecke auf einem Balken. Die erste realisierbare Höhe, die eingestellt worden ist, lag bei 3,2 cm. In der Abbildung 13 sind die aufgenommenen Kurven dargestellt.

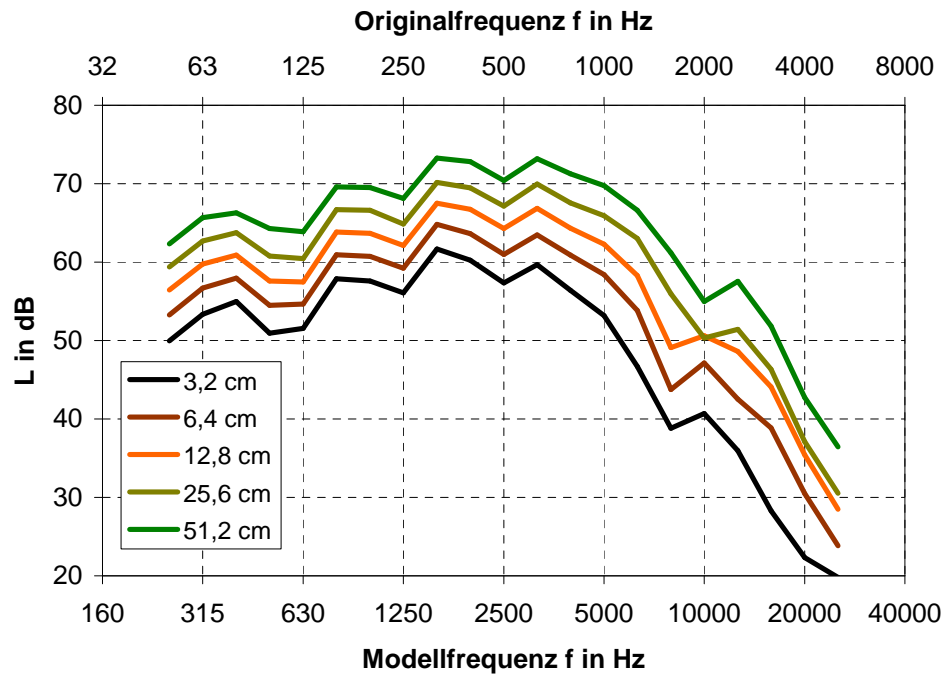


Abbildung 13: Anregung der Decke durch eine Kugel bei Höhenvariation

Die Abbildung 13 zeigt deutlich, dass mit Verdopplung der Höhe auch die Pegel ansteigen. In den tiefen und mittleren Frequenzen liegt der Anstieg näherungsweise bei 3 dB pro Verdopplung. In den hohen Frequenzen (ab  $f = 6300$  Hz im Modellmaßstab bzw.  $f = 1250$  Hz im Original) sind die Schwankungen deutlich größer.

Es wurde daraufhin entschieden, die Kugel immer aus einer Höhe von  $h = 25,6$  cm auf die Decke fallen zu lassen. Dies entspricht der 32-fachen Höhe des Hammerfalls beim Norm-Hammerwerk. Damit ergibt sich die Höhenkorrektur:

$$L_{i,H} = L_i - 10 \lg n \text{ dB} \quad (5.2)$$

$n$  Vielfaches der Höhe des Hammerfalls beim Norm-Hammerwerk

Der Faktor  $n$  steht für die 32-fache Höhe. Damit ergibt sich eine Korrektur von ca. 15 dB, welche bei jeder Messung abgezogen werden muss.

### 5.2.2 Maximalpegel oder Energiepegel

Es gibt mehrere Möglichkeiten den Norm-Trittschallpegel  $L_n$  der Decke zu bestimmen. Beim Kugelfall bieten sich Messungen des Maximalpegels  $L_{f,\max}$  bzw. des Schallenergiepegels  $L_E$  an. Der Maximalpegel  $L_{f,\max}$  ist der Maximalwert des in einem bestimmten Zeitraum auftretenden Schalldruckpegels bei Zeitbewertung „Fast“ und der Energiepegel  $L_E$  ist der über einen bestimmten Zeitraum integrierte Schallleistungspegel. [Schm96]

#### Bestimmung des Energiepegels

Die Schallenergie  $E$  berechnet sich mit folgender Formel:

$$E = \frac{1}{\rho c_0} \frac{A}{4} \int_T p^2 dt \quad (5.3)$$

Daraus ergibt sich der Schallenergiepegel  $L_{E,n}$ :

$$L_{E,n} = 10 \lg \frac{E}{E_0} \text{ dB} \quad (5.4)$$

mit

$$E_0 = \frac{1}{\rho_0 c_0} \frac{A_0}{4} p_0^2 T_0 \quad (5.5)$$

$T_0$  Bezugswert = 1 s

Daraus folgt:

$$L_{E,n} = 10 \lg \frac{\int p^2 dt}{\rho_0^2 T_0} \text{ dB} + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB} \quad (5.6)$$

Der letzte Term dieser Gleichung ( $10 \log(A/A_0)$ dB) ist der Korrekturterm für die Nachhallzeit, der, wie schon in Kapitel 2 beschrieben, in die Gleichung mit einfließen muss. Nun erfolgt eine Erweiterung mit der Integrationszeit  $T$ .

$$L_{E,n} = 10 \lg \frac{1}{T} \int_0^T p^2 dT \frac{T}{p_0^2} \frac{T}{T_0} \text{ dB} + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB} \quad (5.7)$$

$$\Leftrightarrow L_{E,n} = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} \text{ dB} + 10 \lg \frac{T}{T_0} \text{ dB} + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB}$$

$$\Leftrightarrow L_{E,n} = L_i + 10 \lg \frac{T}{T_0} \text{ dB} + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB} \quad (5.8)$$

Für die Bestimmung des Energiepegels ist es also wichtig, einen Integrationszeitraum  $T$  festzulegen. Ist diese Mittelung zu kurz, dann beinhaltet sie nicht den kompletten Impuls. Wählt man eine zu lange Mittelungszeit, kann es passieren, dass schon der nächste Schlag der Kugel mit eingerechnet wird. Die Messzeit sollte dementsprechend so gewählt werden, dass ein komplettes Abklingen des Impulses sichergestellt ist, bevor ein neuer Schlag beginnt.

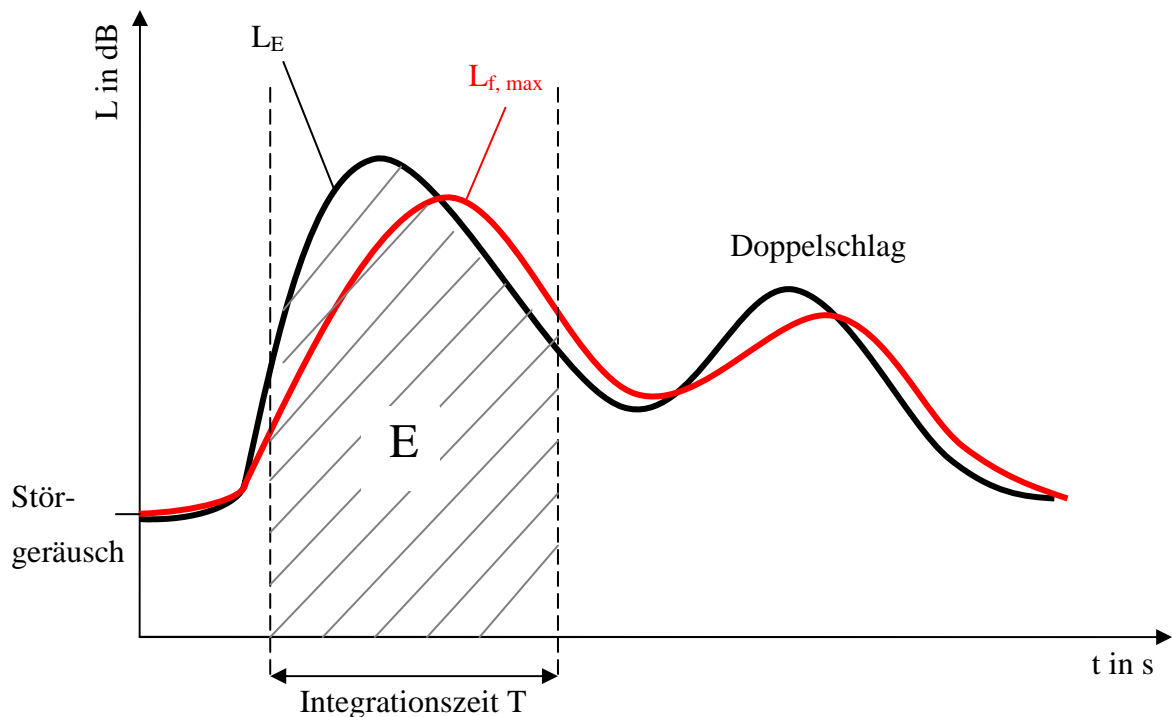


Abbildung 14: Prinzipieller Zeitverlauf des Schalldruckpegels im Empfangsraum

### Bestimmung der Integrationszeit des Energiepegels

Zur Bestimmung der korrekten Mittelungszeit des Energiepegels werden Messungen durchgeführt, bei denen alle Bedingungen gleich bleiben, bis auf die Mittelungszeit der

Messung. Der Fall der Kugel ( $h = 25,6$  cm) wird wiederum auf einem Balken der Holzbalkendecke durchgeführt. Die erste Messung wird mit einer Mittelungszeit von 20 ms durchgeführt und die Zeiten dann kontinuierlich erhöht.

Der Energiepegel lässt sich leicht mit der Gleichung (5.8) aus Kapitel 5.2.2 ermitteln. Lediglich der Korrekturterm für die Nachhallzeit bleibt bei diesen Messungen unbeachtet, da dieser immer gleich bleibt und damit für die Testmessung nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Die Abbildung 15 zeigt, dass die Energiepegel bei allen Terzen unabhängig von der Mittelungszeit annähernd gleich bleiben. Letztendlich fällt die Entscheidung für eine Mittelungszeit von  $T = 300$  ms, da zu diesem Zeitpunkt der erste Schlag bereits komplett abgeklungen ist, ein Doppelschlag aber noch nicht stattgefunden hat.

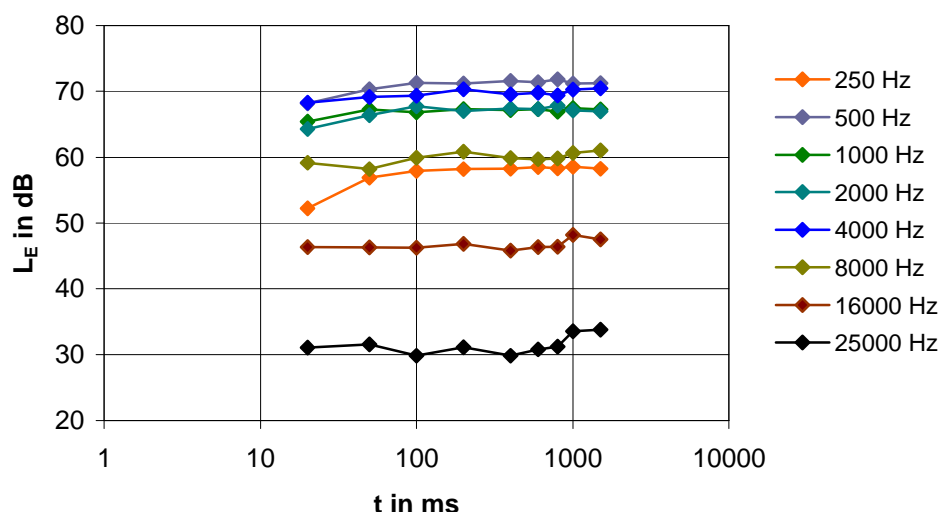


Abbildung 15: Messung des Energiepegels mit verschiedenen Mittelungszeiten

### Maximalpegel oder Energiepegel

Welche Messmethode besser geeignet ist, um den Norm-Trittschallpegel zu bestimmen, wird in diesem Abschnitt erläutert. Dazu werden folgende Testmessungen durchgeführt. Es wird sowohl der Maximalpegel, als auch der Energiepegel unter Wiederholbedingungen jeweils fünfmal an derselben Stelle zwischen zwei Balken (Zwischenraum) gemessen. Die Kugel fällt dabei immer auf die gleiche Stelle aus einer Höhe von  $h = 25,6$  cm. Auf die gleiche Weise werden auch die Messungen auf dem Balken durchgeführt. Daraus werden die Wiederholstandardabweichungen  $\sigma$  bestimmt. Als Vorlage für die Messung der Wiederholstandardabweichung dient die Norm DIN EN ISO 140-2. Auf die Höhenkorrektur

und die Korrektur der Nachhallzeit wird bei dieser Testmessung verzichtet. Die Berechnung der Wiederholstandardabweichung erfolgt mit der Gleichung:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.9)$$

|           |   |
|-----------|---|
| $\sigma$  | Wiederholstandardabweichung in dB       |
| $n$       | Stichprobenumfang                       |
| $x_i$     | Schalldruckpegel am i-ten Element in dB |
| $\bar{x}$ | arithmetischer Mittelwert in dB         |

Liegt die Wiederholstandardabweichung bei  $\sigma < 0,8$  dB, dann ist von guten Wiederholbedingungen auszugehen. [ISO 12999] Bei allen Messungen, sowohl des Energiepegels als auch des Maximalpegels, werden gute Wiederholstandardabweichungen erreicht (siehe Tabelle 3 und Tabelle 4). Erst bei höheren Frequenzen ab ca.  $f_{\text{Original}} = 1$  kHz (Messung auf Balken) entstehen größere Abweichungen. Werden die Diagramme (siehe Abbildung 35 und Abbildung 36) diesbezüglich betrachtet, ist erkennbar, dass die größeren Abweichungen darauf zurückzuführen sind, dass vier von fünf Messkurven gut übereinander liegen, während eine etwas stärker variiert. Ein weiterer Grund ist die Feder-Masse-Resonanz der Kugel, da der Kontakt mit der Decke jedes Mal unterschiedlich ist und sich damit die Resonanzfrequenz bei kleinerer Federkonstante zu tieferen Frequenzen verschiebt.

Beide Verfahren eignen sich folglich gut zur Bestimmung des Norm-Trittschallpegels. Die Entscheidung fällt für die Messung des Energiepegels. Dafür sprechen mehrere Gründe: Der Schallenergiepegel ist physikalisch korrekter, weil er mehr der Leistung entspricht als der Maximalpegel. Die Energiemenge stellt dafür ein vernünftiges Maß dar. Bei Verwendung eines Maximalpegels  $L_{f,\text{max}}$  wird eine Zeitkonstante ausgewählt. Bei der Messung mit der Zeitkonstante „Fast“ wird die Trägheit des Ohres simuliert. Das bedeutet, dass bei Verwendung solcher Konstanten das Messergebnis verfälscht wird. Ein weiterer Vorteil des Energiepegels liegt in der vernünftigen und einfachen Umrechnung auf den Norm-Trittschallpegel.

**Tabelle 3:** Ermittlung der Wiederholstandardabweichungen durch Messungen auf dem **Balken** der Holzbalkendecke ( $h = 25,6$  cm und bei  $L_E: T = 300$  ms)

| Frequenz $f$ in Hz |          | $L_E$<br>in dB | Standard-<br>abw. $\sigma$ in dB | $L_{f, \max}$<br>in dB | Standard-<br>abw. $\sigma$ in dB |
|--------------------|----------|----------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| Modell             | Original |                |                                  |                        |                                  |
| 250                | 50       | 57,12          | <b>0,19</b>                      | 65,30                  | <b>0,15</b>                      |
| 315                | 63       | 61,87          | <b>0,24</b>                      | 67,89                  | <b>0,13</b>                      |
| 400                | 80       | 64,80          | <b>0,49</b>                      | 65,16                  | <b>0,13</b>                      |
| 500                | 100      | 65,22          | <b>0,73</b>                      | 67,73                  | <b>0,58</b>                      |
| 630                | 125      | 60,34          | <b>0,20</b>                      | 66,62                  | <b>0,22</b>                      |
| 800                | 160      | 67,59          | <b>0,11</b>                      | 71,41                  | <b>0,19</b>                      |
| 1000               | 200      | 68,17          | <b>0,50</b>                      | 70,25                  | <b>0,19</b>                      |
| 1250               | 250      | 67,25          | <b>0,79</b>                      | 68,86                  | <b>0,72</b>                      |
| 1600               | 315      | 70,26          | <b>0,05</b>                      | 74,28                  | <b>0,25</b>                      |
| 2000               | 400      | 73,46          | <b>0,22</b>                      | 73,78                  | <b>0,52</b>                      |
| 2500               | 500      | 68,99          | <b>0,73</b>                      | 71,92                  | <b>0,45</b>                      |
| 3150               | 630      | 71,17          | <b>0,43</b>                      | 72,81                  | <b>0,74</b>                      |
| 4000               | 800      | 69,37          | <b>0,23</b>                      | 71,64                  | <b>0,64</b>                      |
| 5000               | 1000     | 66,26          | <b>1,59</b>                      | 69,47                  | <b>1,46</b>                      |
| 6300               | 1250     | 59,76          | <b>1,51</b>                      | 65,60                  | <b>2,01</b>                      |
| 8000               | 1600     | 57,13          | <b>2,32</b>                      | 58,18                  | <b>1,66</b>                      |
| 10000              | 2000     | 57,09          | <b>0,85</b>                      | 57,33                  | <b>1,60</b>                      |
| 12500              | 2500     | 54,13          | <b>1,25</b>                      | 56,19                  | <b>1,24</b>                      |
| 16000              | 3150     | 47,12          | <b>0,94</b>                      | 48,95                  | <b>1,86</b>                      |
| 20000              | 4000     | 39,73          | <b>1,09</b>                      | 43,53                  | <b>1,26</b>                      |
| 25000              | 5000     | 31,90          | <b>1,27</b>                      | 37,60                  | <b>0,68</b>                      |

**Tabelle 4:** Ermittlung der Wiederholstandardabweichungen durch Messungen auf dem **Zwischenraum** der Holzbalkendecke ( $h = 25,6$  cm und bei  $L_E: T = 300$  ms)

| Frequenz $f$ in Hz |          | $L_E$<br>in dB | Standard-<br>abw. $\sigma$ in dB | $L_{f, \max}$<br>in dB | Standard-<br>abw. $\sigma$ in dB |
|--------------------|----------|----------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| Modell             | Original |                |                                  |                        |                                  |
| 250                | 50       | 59,49          | <b>0,16</b>                      | 63,59                  | <b>0,06</b>                      |
| 315                | 63       | 64,14          | <b>0,16</b>                      | 68,25                  | <b>0,07</b>                      |
| 400                | 80       | 67,14          | <b>0,12</b>                      | 71,68                  | <b>0,08</b>                      |
| 500                | 100      | 73,79          | <b>0,14</b>                      | 78,19                  | <b>0,07</b>                      |
| 630                | 125      | 67,50          | <b>0,11</b>                      | 71,73                  | <b>0,08</b>                      |
| 800                | 160      | 66,58          | <b>0,08</b>                      | 70,95                  | <b>0,09</b>                      |
| 1000               | 200      | 63,28          | <b>0,11</b>                      | 67,77                  | <b>0,05</b>                      |
| 1250               | 250      | 62,71          | <b>0,23</b>                      | 67,29                  | <b>0,17</b>                      |
| 1600               | 315      | 66,50          | <b>0,05</b>                      | 70,85                  | <b>0,05</b>                      |
| 2000               | 400      | 69,41          | <b>0,12</b>                      | 73,68                  | <b>0,08</b>                      |
| 2500               | 500      | 69,79          | <b>0,10</b>                      | 74,07                  | <b>0,06</b>                      |
| 3150               | 630      | 67,99          | <b>0,23</b>                      | 72,70                  | <b>0,13</b>                      |
| 4000               | 800      | 64,08          | <b>0,53</b>                      | 69,13                  | <b>0,28</b>                      |
| 5000               | 1000     | 63,15          | <b>0,38</b>                      | 68,18                  | <b>0,16</b>                      |
| 6300               | 1250     | 61,89          | <b>0,48</b>                      | 67,27                  | <b>0,19</b>                      |
| 8000               | 1600     | 55,32          | <b>0,88</b>                      | 61,16                  | <b>0,52</b>                      |
| 10000              | 2000     | 55,57          | <b>0,43</b>                      | 60,97                  | <b>0,44</b>                      |
| 12500              | 2500     | 51,88          | <b>0,50</b>                      | 57,59                  | <b>0,83</b>                      |
| 16000              | 3150     | 44,85          | <b>0,43</b>                      | 50,44                  | <b>0,97</b>                      |
| 20000              | 4000     | 37,56          | <b>0,89</b>                      | 43,48                  | <b>1,37</b>                      |
| 25000              | 5000     | 30,52          | <b>0,85</b>                      | 35,79                  | <b>1,36</b>                      |

### 5.2.3 Anpassung des Kugelfallapparates an das Hammerwerk

Bisher gehen alle Annahmen beim Kugelfall nur von einem Schlag der Kugel aus. Das Modell-Hammerwerk schlägt aber mit 50 Schlägen pro Sekunde auf die Decke. Dabei hat sich ein stationäres Schallfeld ausgebildet. Um die Messung mithilfe des Kugelfallapparates entsprechend anzupassen, wird ein weiterer Korrekturterm hinzugefügt:

$$L_n = L_{E,n} - 10 \lg n \text{ dB} + 10 \lg m \text{ dB} \quad (5.10)$$

$m$  Anzahl der Ereignisse pro Sekunde,  $m = 50$

$n$  Variation der Höhe, aus der die Kugel fällt

Zu jeder Messung werden noch näherungsweise 17 dB addiert. Weiterhin darf die Fremdgeräuschkorrektur nicht außer Acht gelassen werden.

### 5.3 Shaker

Im Gegensatz zum Kugelfallapparat werden mit dem Shaker Schwingungen auf der Decke erzwungen. Der Shaker wird mithilfe einer Aufhängung und einer digitalen Waage freihängend auf der Decke platziert. Etwa 100 g des Gewichtes sollten auf der Decke liegen, damit die Tastspitze gut schwingen kann. Für den Shaker wird ein Multisinus (Überlagerung mehrerer Sinustöne, Modifizierung möglich durch Frequenz- und Amplitudenmodulationen) mit einem 10 Hz-Linienspektrum generiert, das eine erhöhte Amplitude bei 50 Hz und deren Vielfachen besitzt.

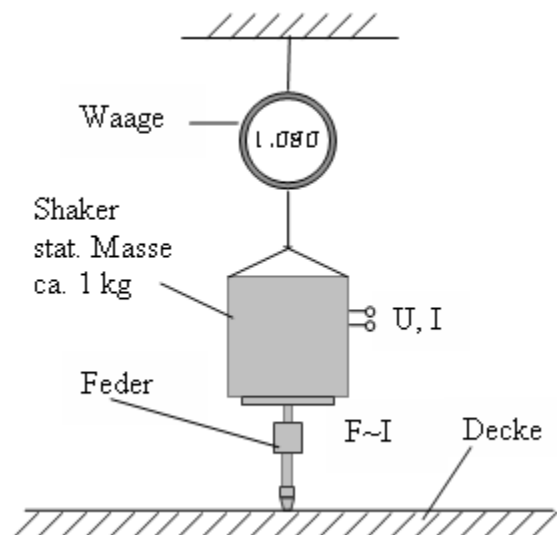


Abbildung 16: Experimenteller Aufbau  
[Witt09]



Damit bei höheren Frequenzen mehr Signal vorhanden ist, wird ein Tiefpassfilter dazugeschaltet. Dieser besitzt eine Filterordnung von 3 und liegt bei einer Entkopplungsfrequenz von 11 kHz. Die Dauer der Mittelwertbildung liegt bei  $t = 10$  s.

Da die Quelleigenschaft eines Shakers anders ist als die eines Hammerwerks, wird nicht der Norm-Trittschallpegel ermittelt, sondern der normierte Schalldruckpegel  $L_{S,n}$ .

### 5.3.1 Erste Testmessung auf der Holzbalkendecke

Als Erstes soll die Wiederholbarkeit der Messung mit dem Shaker getestet werden. Die Messbedingungen wie Shakerposition, Mikrofonpositionen und Anregungssignal werden konstant gehalten. Es folgt die fünfmalige Messung des Trittschallpegels, woraus die Standardabweichung bestimmt wird (siehe Abbildung 17 und im Anhang Tabelle 13).

Es fällt auf, dass die Standardabweichungen im Vergleich zum Kugelfallapparat (Bestimmung der Standardabweichung für den Fall einer Kugel siehe Kapitel 5.2.2) deutlich höher liegen. Ab ca. 6000 Hz liegen die gemessenen Schalldruckpegel im Störgeräusch, weshalb eine Aussage über die Wiederholbarkeit oberhalb dieser Frequenz mit dieser Messung nicht möglich ist.

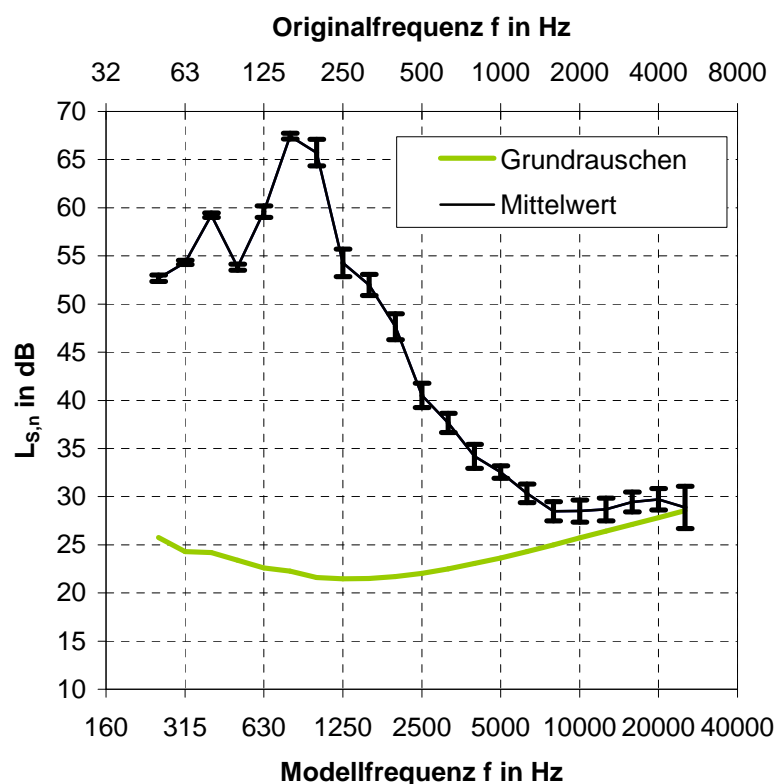


Abbildung 17: Wiederholstandardabweichung des Shakers bei der Messung an einem Punkt

### 5.3.2 Strommessung

Durch den Shaker wird in die Decke eine bestimmte Kraft eingeleitet. Diese ist proportional zur eingeleiteten Stromstärke in den Shaker. Zur Überprüfung, ob die eingeleitete Kraft über die gesamte Länge des Messsignals konstant bleibt, wurde eine Messung des Stromflusses durchgeführt. Dazu wird ein Monitorausgang des Leistungsverstärkers verwendet, der einen Übertragungsfaktor von 0,1 V/A besitzt. Die Messung wird auf einem der Holzbalken sowie zwischen den Balken durchgeführt. Als Ergebnis wird ein Spannungs-Zeit-Verlauf erhalten. Zur besseren Übersicht wird die Spannung in einen Strompegel  $L_I$  umgerechnet.

$$L_I = 20 \lg\left(\frac{U}{C_I I_0}\right) \text{ dB} \quad (5.11)$$

- $U$  Spannung in V  
 $C_I$  Übertragungsfaktor = 0,1 V/A  
 $I_0$  Bezugswert = 1 A

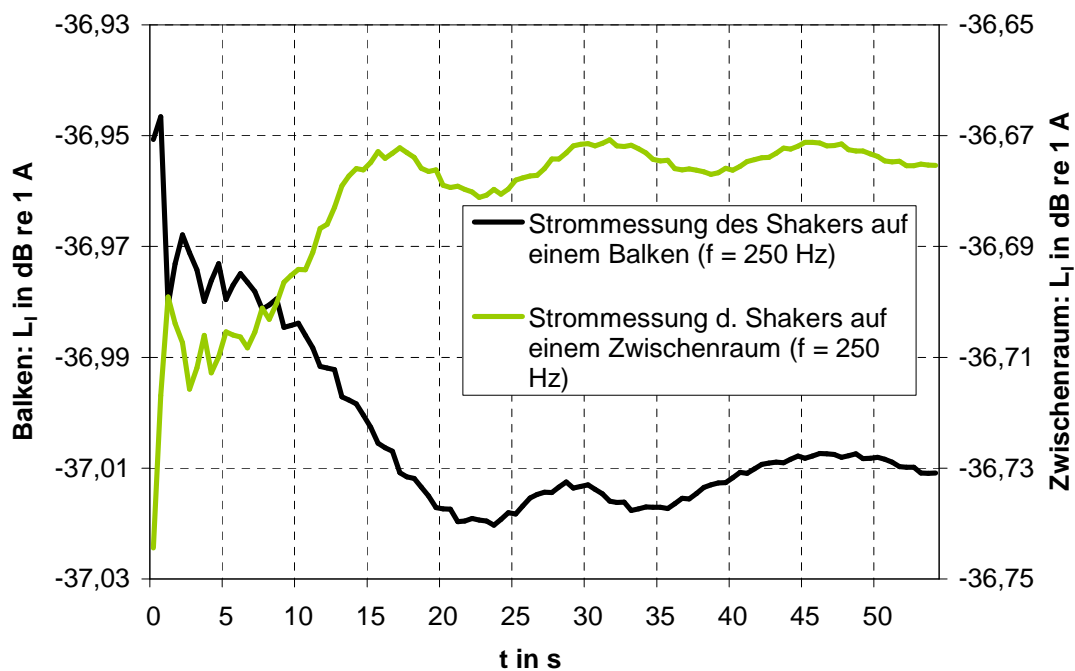


Abbildung 18: Messung des Stromes über die gesamte Dauer des Shakersignals bei  $f = 250 \text{ Hz}$

Abbildung 18 zeigt den Stromfluss bei  $f = 250$  Hz. Bei dieser Frequenz ist die Stabilität am geringsten. Die größte Änderung liegt bei 0,1 dB. Nachdem das System eingeschwungen ist, sind die Änderungen noch geringer. Der Stromfluss ist somit über die komplette Dauer des Signals als konstant anzusehen. Der Messbeginn erfolgt nach einer Einschwingdauer von 20 Sekunden.

## 5.4 Wiederholbarkeitsstudie

Nach Abschluss der Testmessungen folgt eine Wiederholbarkeitsstudie. Dazu werden fünf voneinander unabhängige Trittschalldämmungsmessungen, sowohl mit Kugelfallapparat, als auch mit Shaker, unter definierten Bedingungen (gleiche Rahmenbedingungen und Parameter) durchgeführt. Eine solche Studie ist von derselben Person und denselben Geräten in einem möglichst kurzen Zeitraum durchzuführen. Aus den Ergebnissen der Messungen wird die Wiederholstandardabweichung nach Gleichung (5.9) berechnet (siehe Tabelle 5).

Bei jeder Messung werden lediglich die Anregungspunkte auf der Decke verändert und die Mikrofone im Empfangsraum umgestellt. Dies bedingt auch eine Messung der Nachhallzeit vor Beginn einer neuen Trittschalldämmungsmessung. Die Wiederholbarkeitsstudie wird mit der größten Raumgeometrie durchgeführt. Als Decke wird die Holzbalkendecke ausgewählt, weil sie, im Gegensatz zur Betondecke, nicht homogen ist und damit als kritischer für die Wiederholbarkeit eingeschätzt wird.

Die Messung der optimierten Nachhallzeit erfolgte wie im Kapitel 3.6.1 beschrieben. Da bei allen Messungen lediglich die Anordnung der Mikrofone verändert wird, bleibt die Absorption im Empfangsraum gleich und damit sind kaum Schwankungen in der Nachhallzeit zu beobachten. Die Messung des Trittschallpegels wird wie im Kapitel 3.6.2 durchgeführt. Weiterhin werden die Erkenntnisse aus den Testmessungen mit einbezogen.

Tabelle 5: Standardabweichungen der Wiederholbarkeitsstudie für Kugelfallapparat und Shaker

| Frequenz $f$ in Hz |          | $L_n$ Kugel<br>in dB | Standard-<br>abw. $\sigma$ in dB | $L_{s,n}$ Shaker<br>in dB | Standard-<br>abw. $\sigma$ in dB |
|--------------------|----------|----------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Modell             | Original |                      |                                  |                           |                                  |
| 250                | 50       | 65,14                | <b>1,22</b>                      | 60,71                     | <b>1,67</b>                      |
| 315                | 63       | 69,05                | <b>0,96</b>                      | 64,21                     | <b>3,35</b>                      |
| 400                | 80       | 71,96                | <b>0,77</b>                      | 70,09                     | <b>1,76</b>                      |
| 500                | 100      | 71,23                | <b>0,44</b>                      | 65,51                     | <b>1,71</b>                      |
| 630                | 125      | 70,25                | <b>0,43</b>                      | 66,55                     | <b>2,03</b>                      |
| 800                | 160      | 71,38                | <b>0,36</b>                      | 68,63                     | <b>1,53</b>                      |
| 1000               | 200      | 72,95                | <b>0,75</b>                      | 67,28                     | <b>1,73</b>                      |
| 1250               | 250      | 74,42                | <b>0,36</b>                      | 58,98                     | <b>2,05</b>                      |
| 1600               | 315      | 76,11                | <b>0,37</b>                      | 57,49                     | <b>2,02</b>                      |
| 2000               | 400      | 75,17                | <b>0,85</b>                      | 53,49                     | <b>2,34</b>                      |
| 2500               | 500      | 75,26                | <b>0,12</b>                      | 48,21                     | <b>1,37</b>                      |
| 3150               | 630      | 74,31                | <b>0,79</b>                      | 45,53                     | <b>1,37</b>                      |
| 4000               | 800      | 73,21                | <b>0,50</b>                      | 41,96                     | <b>1,39</b>                      |
| 5000               | 1000     | 70,56                | <b>0,81</b>                      | 39,36                     | <b>1,69</b>                      |
| 6300               | 1250     | 67,68                | <b>0,31</b>                      | 37,43                     | <b>1,19</b>                      |
| 8000               | 1600     | 63,72                | <b>0,40</b>                      | 34,84                     | <b>0,89</b>                      |
| 10000              | 2000     | 62,70                | <b>0,24</b>                      | 34,96                     | <b>0,86</b>                      |
| 12500              | 2500     | 60,01                | <b>0,06</b>                      | 35,01                     | <b>0,95</b>                      |
| 16000              | 3150     | 53,82                | <b>0,37</b>                      | 37,04                     | <b>1,05</b>                      |
| 20000              | 4000     | 47,22                | <b>0,54</b>                      | 35,47                     | <b>1,24</b>                      |
| 25000              | 5000     | 38,74                | <b>1,45</b>                      | 28,26                     | <b>4,50</b>                      |

### Auswertung Kugelfallapparat

In Abbildung 19 sind die Ergebnisse der Messungen mit dem Kugelfallapparat dargestellt. Die grünen Linien stellen die fünf Einzelmessungen dar. In Tabelle 5 finden sich in der mittleren Spalte die dazugehörigen Wiederholstandardabweichungen. Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert über diese Messungen. Weiterhin gibt die blaue Kurve nach DIN EN ISO 717-2 den Norm-Trittschallpegel für leichte Bezugsdecken wieder.

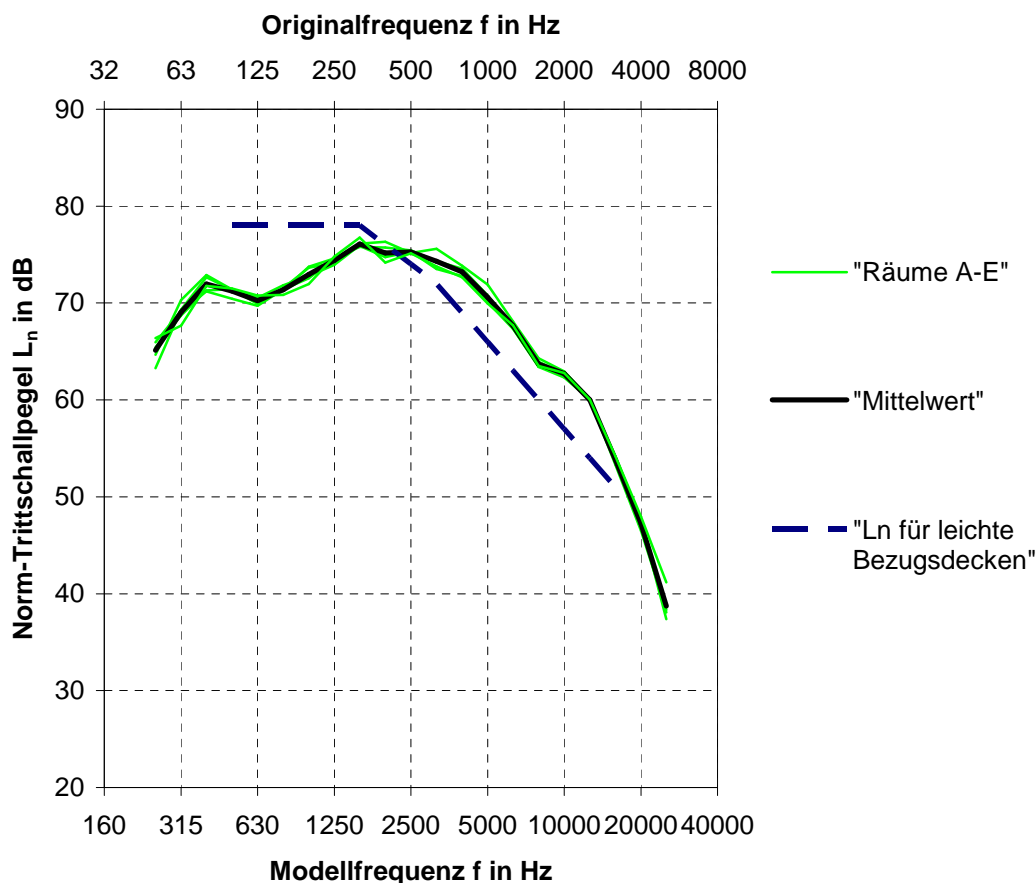


Abbildung 19: Messergebnisse Kugelfall

Tabelle 6: Einzahlwerte Kugelfallapparat

|                    | Raum A | Raum B | Raum C | Raum D | Raum E |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $L_{nW}$ (1 dB)    | 72     | 72     | 72     | 72     | 72     |
| $L_{nW}$ (1/10 dB) | 71,8   | 71,3   | 71,1   | 71,4   | 71,2   |

Aus Tabelle 5 ist zu erkennen, dass sich lediglich bei 250 Hz und bei 25 kHz Standardabweichungen von  $> 1$  dB ergeben. Bei Holzbalkendecken werden zu hohen Frequenzen hin mit steigender Frequenz abfallende Trittschallpegel gemessen. Bei 25 kHz ist dieser Schallpegel schon so gering, dass er kaum noch vom Grundrauschen zu unterscheiden ist. Daher ist die etwas größere Abweichung bei dieser Frequenz als unkritisch zu bewerten. Die größeren Standardabweichungen im niedrigen Frequenzbereich sind durch auftretende modale Effekte erklärbar (vgl. Gliederungspunkt 3.7). Weiterhin ist auffällig, dass sich die Einzelmessungen gut an die Bezugskurve für Holzbalkendecken anpassen. Dies spricht dafür, dass die Modellholzbalkendecken entsprechend gut skaliert worden sind. Zusätzlich sind noch

die Einzahlwerte  $L_{n,W}$  in Tabelle 6 bestimmt worden (Vergleich siehe Kapitel 2.3). Wird nur der Einzahlwert betrachtet, der auf der Verschiebung der Bewertungskurve von 1 dB beruht, sind keine Unterschiede bei den Messungen erkennbar. Erst bei einer genaueren Bewertung mittels 1/10 dB werden Abweichungen von maximal 0,7 dB beobachtet.

Bei der Messung des Trittschallpegels mit dem Kugelfallapparat werden also sehr gute Ergebnisse in der Wiederholbarkeit erreicht, wodurch dieser bedenkenlos in allen weiteren Messungen angewendet werden kann.

### **Auswertung Shaker**

Die Ergebnisse der Wiederholbarkeitsmessung mit dem Shaker finden sich in Abbildung 20. Die grünen Linien zeigen die Einzelmessungen, die schwarze Linie den Mittelwert. In blauer Farbe ist die Bezugskurve eingetragen, welche zusätzlich noch um 20 dB pro Terz verschoben wurde (braune Kurve). Es fällt auf, dass die Kurven viel stärker um den Mittelwert streuen. Die höchste Standardabweichung mit  $\sigma = 3,35$  dB wird bei 315 Hz erreicht. Der Wert bei 25 kHz ist unbrauchbar, denn bei dieser Frequenz liegt das Signal komplett im Grundrauschen und ist damit nicht mehr messbar. Bei den anderen Frequenzen schwankt der Wert  $\sigma$  zwischen ein und zwei Dezibel. Aus diesem Messergebnis lässt sich ableiten, dass die Messung mit dem Shaker wesentlich unsicherer ist als mit dem Kugelfallapparat. Da ein Shaker gegenüber einem Hammerwerk andere Quelleigenschaften besitzt, ist die Ermittlung des Einzahlwertes für die Anregung mit dem Shaker nicht möglich.

Es stellt sich nun die Frage, ob es bei den Shakermessungen vielleicht noch mehr zu beachten gibt. Eine Möglichkeit ist die Strommessung in Terzen für jede Messung. Dies wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

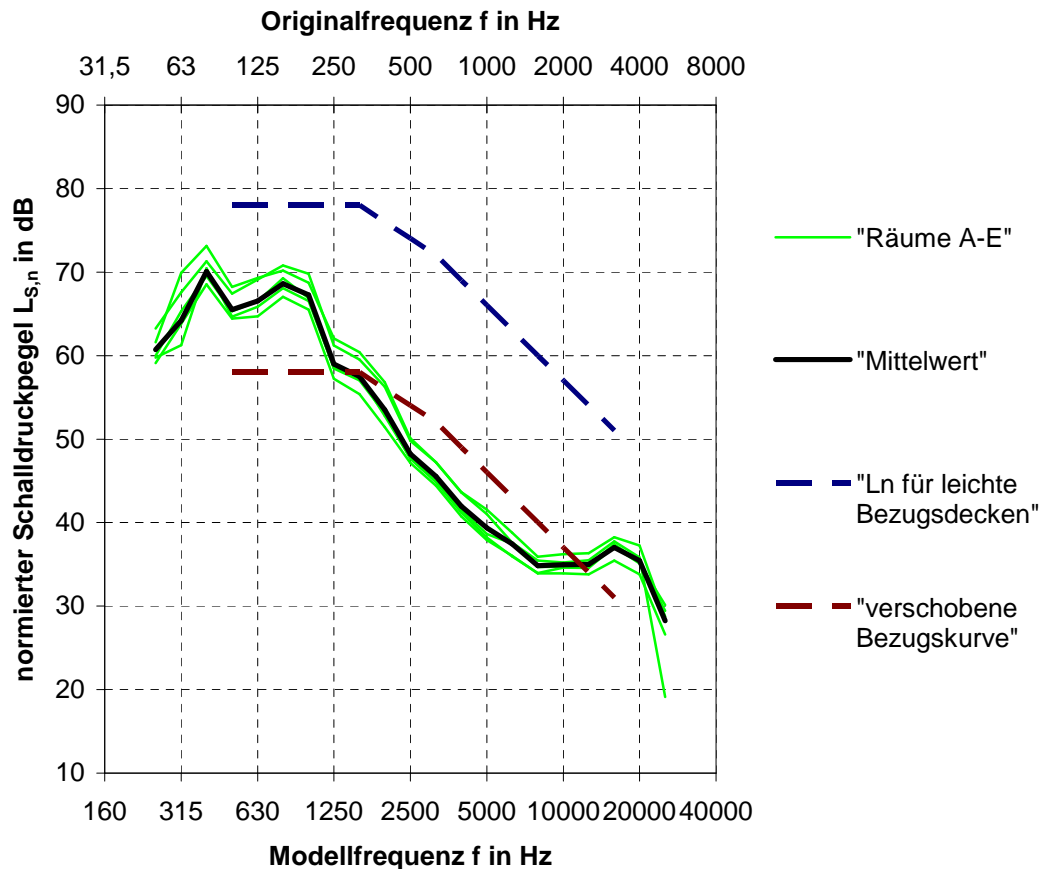


Abbildung 20: Messergebnisse Shaker

## 5.5 Strommessung des Shakers

Der Shaker leitet eine bestimmte Kraft in die Decke ein, die proportional zum Strom ist. Durch verschiedene Einflussfaktoren (Temperatur, Luftfeuchte, Messungen über einen längeren Zeitraum, Veränderung der Einstellungen am Messgerät) ist nicht gewährleistet, dass diese eingeleitete Kraft immer konstant bleibt. Damit eine Vergleichbarkeit der Bauteile untereinander hergestellt werden kann, muss aber sichergestellt sein, dass immer die gleiche Quellstärke vorhanden ist. Deshalb wird der Strom, der in den Shaker fließt, bei jeder Messung als Strompegel  $L_I(f)$  mitbestimmt. Dieser Pegel wird von den an den Mikrofonen gemessenen Schalldruckpegeln abgezogen.


$$L_{S,n} = L_i - L_I + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB} \quad (5.12)$$


$L_{S,n}$  normierter Schalldruckpegel in dB


## 5.6 Zusammenfassung Voruntersuchungen


Besonders für den Kugelfallapparat waren viele Voruntersuchungen für die Erlangung eines optimalen Norm-Trittschallpegels notwendig. Deshalb werden hier noch einmal kurz alle Korrekturterme zusammengefasst aufgelistet:

$$L_n = L_i - 10 \lg n \text{ dB} + 10 \lg \frac{T}{T_0} \text{ dB} + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB} + 10 \lg m \text{ dB} \quad (5.13)$$

  
 Höhen-  
korrektur


  
 Integrations  
Zeit


  
 Nachhallzeit

  
 Anpassung an  
50 Schläge/s

Für die Ermittlung des normierten Schalldruckpegels des Shakers werden folgende Korrekturen vorgenommen:

$$L_{S,n} = L_i + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB} - L_l \text{ dB} \quad (5.14)$$

  
 Nachhallzeit

  
 Strompegel



## 6 Messergebnisse der Prüfstandsgeometrien

### 6.1 Durchführung

In diesem Kapitel wird die Abhängigkeit des Norm-Trittschallpegels von den Decken- und Raumgeometrien untersucht. Dafür wurden Messungen an den sechs verschiedenen Raumgrößen durchgeführt. Für jede Raumgeometrie wurde die Trittschallpegelmessung für eine Holzbalkendecke und eine Rohbetondecke durchgeführt. Die Messungen erfolgten sowohl mithilfe des Kugelfallapparates als auch des Shakers. Ein Sonderfall liegt bei der Raumgeometrie 1 unter Verwendung der Betondecke vor, da diese eine größere Dicke als die anderen besitzt und damit der Trittschallpegel nicht direkt mit den anderen vergleichbar ist. Auf dieses Problem wird in Kapitel 6.3 näher eingegangen.

Nach jeder Veränderung am Prüfstand, also Einstellung einer neuen Raumgeometrie oder Wechsel der Decken, musste die Nachhallzeit erneut bestimmt werden. Das Vorgehen wurde in Kapitel 3.6.1 bereits erläutert. Da die Empfangsräume alle eine unterschiedliche Größe besitzen, wurde mit kleiner werdendem Prüfraum immer weniger Absorptionsmaterial benötigt. Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die eingestellten Nachhallzeiten der verschiedenen Raumgeometrien. Die DIN EN ISO 140-6 empfiehlt Zeiten zwischen 0,2 und 0,4 Sekunden. Bei der Betondecke werden diese Zeiten bei einer Frequenz von 500 Hz, trotz Einsatz vieler auf diese Frequenz abgestimmter Lambda-Viertel Absorber, nicht immer erreicht.

Zu Beginn einer Messung war auch das Störgeräusch im Empfangsraum zu bestimmen und daraus eine Pegelkorrektur nach Gleichung (2.5) vorzunehmen. In der Regel stammte das Störgeräusch aus dem elektrischen Rauschen der Messtechnik, andere Störquellen waren nicht vorhanden.

Die Messung der Trittschallpegel wurde nach Punkt 3.6.2 durchgeführt. Eine Ausnahme bilden allerdings die Messungen auf den Betondecken mit Shakeranregung. Da die Betondecke sehr homogen ist, wurden nicht fünf Anregungspunkte pro Hammerwerksposition gewählt, sondern lediglich einer. Aus den Messwerten wurde der Norm-Trittschallpegel nach Abschnitt 5.6 berechnet. Es folgen auf den nächsten Seiten die Ergebnisse, die grafisch dargestellt und ausführlich besprochen werden. Die Messwerte der Einzelmessungen befinden sich im Anhang (Tabelle 15 bis Tabelle 20).

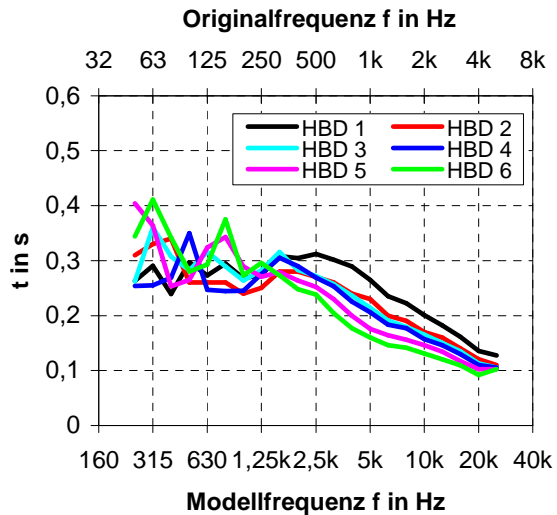


Abbildung 21: Eingestellte Nachhallzeiten der Raumgeometrien bei Messung der Holzbalkendecken

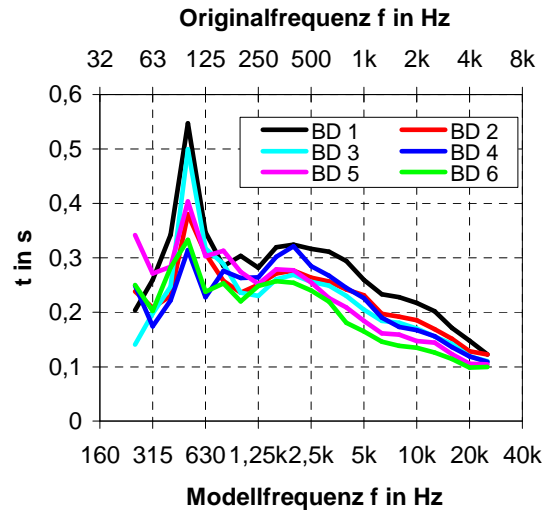


Abbildung 22: Eingestellte Nachhallzeiten der Raumgeometrien bei Messung der Betondecken

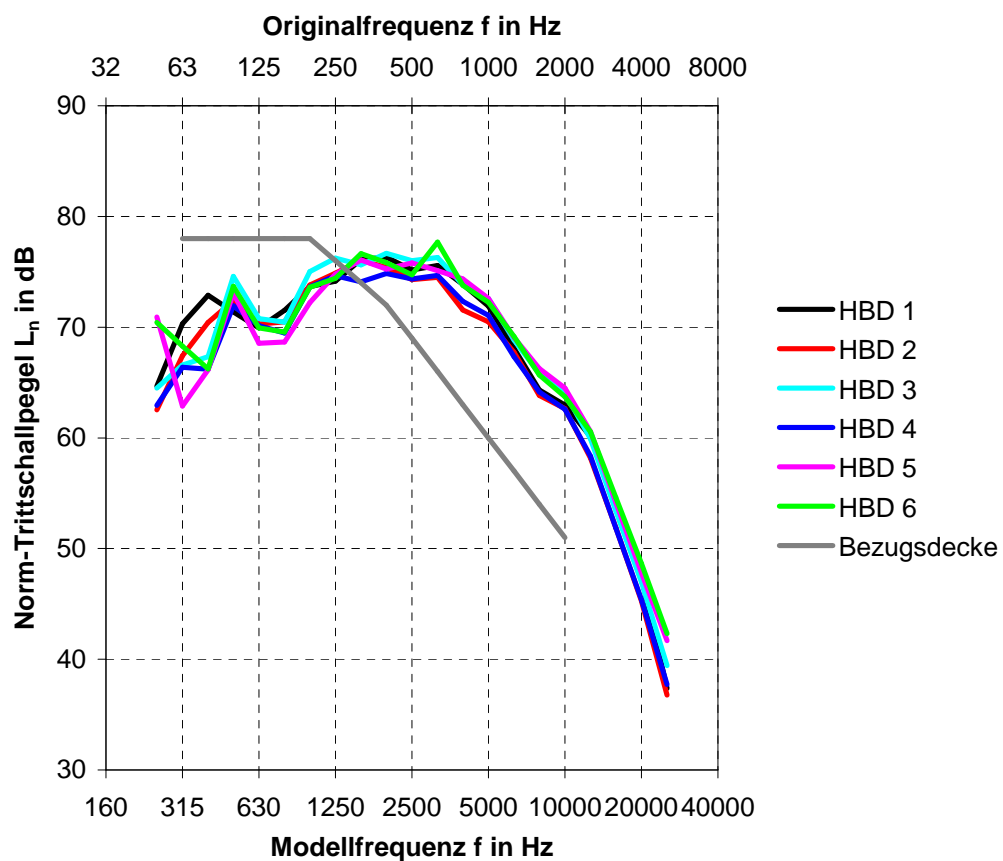
## 6.2 Messungen mit den Holzbalkendecken

### 6.2.1 Kugelfallapparat

In Abbildung 23 sind die Ergebnisse der Messungen der verschiedenen Raumgrößen unter Verwendung der Holzbalkendecken dargestellt. Als Anregungsquelle diente der Kugelfallapparat. Weiterhin ist in diesem Diagramm die Bezugskurve für leichte Decken aus DIN EN ISO 717-2 abgebildet. Auf den ersten Blick fallen keine großen Unterschiede zwischen den einzelnen Messkurven auf. Die Kurven haben ab den mittleren Frequenzen eine gute Übereinstimmung. Nur in den tiefen Frequenzen (bis 100 Hz im Original) sind die Streuungen der Messwerte etwas größer. Dies liegt an der geringeren Modendichte in diesem Frequenzbereich. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Decke bei den tiefen Frequenzen weniger gut angeregt wird, als im mittleren Frequenzbereich. Bei 500 Hz tritt bei allen Raumgeometrien eine Resonanzfrequenz auf. Diese ist durch die Abmessungen der Prüfstände erklärbar, denn alle Raumgeometrien besitzen eine Höhe von  $h = 0,66$  m. Dieser Abstand entspricht einer Wellenlänge bei 500 Hz. Damit kommt es zur Ausbildung von stehenden Wellen. Bei einer Modellfrequenz von ca. 4000 Hz ( $f_0 = 800$  Hz) erfolgt die Entkopplung zwischen Kugel und Holzbalkendecke. Ab dieser Frequenz kann die Decke kaum noch durch die Kugel angeregt werden.

Aus den Messwerten wurde der Einzahlwert bestimmt (siehe Tabelle 7). Werden diese miteinander verglichen, liegen die bewerteten Norm-Trittschallpegel  $L_{n,W}$  zwischen 71,0 dB und 72,5 dB. Der kleinste Wert wurde bei Raumgröße 4 mit 71,0 dB ermittelt und der größte Pegel ergab sich bei Raumgröße 3 mit 72,5 dB. Es ist keine Verbesserung des Norm-Trittschallpegels bei kleiner werdender Raumgeometrie feststellbar.

Aus diesem Grund wurde aus den sechs Messergebnissen die Standardabweichung berechnet. Sie liegt in den meisten Frequenzen unter einem Dezibel. Nur die tiefen Frequenzen zwischen 50 und 100 Hz und besonders hohe Frequenzen zeigen höhere Standardabweichungen. Dies ist in den tiefen Frequenzen durch das Auftreten von Raummoden bzw. Moden der Decke erklärbar. Höhere Abweichungen im hohen Frequenzbereich sind durch Materialinhomogenitäten erklärbar. Lokal unterschiedliche Materialeigenschaften machen sich bei höheren Frequenzen stärker bemerkbar als in anderen Bereichen.



**Abbildung 23:** Holzbalkendecke: Norm-Trittschallpegel  $L_n$  der verschiedenen Raumgeometrien – Messung mit dem Kugelfallapparat

Tabelle 7: Einzahlwerte, Messungen auf den Holzbalkendecken mit dem Kugelfallapparat,  
Bestimmung der Standardabweichung

|                    | Raum-<br>größe 1 | Raum-<br>größe 2 | Raum-<br>größe 3 | Raum-<br>größe 4 | Raum-<br>größe 5 | Raum-<br>größe 6 | $\sigma$ in dB |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|
| $L_{nw}$ (1 dB)    | 72               | 72               | 73               | 71               | 73               | 73               | 0,68           |
| $L_{nw}$ (1/10 dB) | 71,8             | 71,1             | 72,5             | 71,0             | 72,4             | 72,4             |                |

Tabelle 8: Standardabweichungen der Norm-Trittschallpegel der Holzbalkendecke (Messung  
mit Kugelfallapparat)

| Frequenz $f$ in Hz |          | $\sigma$ in dB | Frequenz $f$ in Hz |          | $\sigma$ in dB |
|--------------------|----------|----------------|--------------------|----------|----------------|
| Modell             | Original |                | Modell             | Original |                |
| 250                | 50       | 3,72           | 3150               | 630      | 1,19           |
| 315                | 63       | 2,46           | 4000               | 800      | 1,09           |
| 400                | 80       | 2,82           | 5000               | 1000     | 0,86           |
| 500                | 100      | 1,18           | 6300               | 1250     | 0,76           |
| 630                | 125      | 0,74           | 8000               | 1600     | 1,02           |
| 800                | 160      | 1,00           | 10000              | 2000     | 0,79           |
| 1000               | 200      | 0,89           | 12500              | 2500     | 1,09           |
| 1250               | 250      | 0,73           | 16000              | 3150     | 1,17           |
| 1600               | 315      | 0,88           | 20000              | 4000     | 1,35           |
| 2000               | 400      | 0,68           | 25000              | 5000     | 2,34           |
| 2500               | 500      | 0,73           |                    |          |                |

## 6.2.2 Shaker

Abbildung 24 zeigt die normierten Schalldruckpegel der verschiedenen Raumgeometrien bei Messung auf den Holzbalkendecken. Diese Spektren wurden durch die Verwendung des Shakers als Anregungsquelle erhalten. Auch bei diesen Messungen fällt auf, dass die Kurven gut im mittleren Frequenzbereich übereinstimmen und nur in den tiefen sowie hohen Frequenzen mehr streuen.

Für eine bessere Übersicht wurde der normierte Schalldruckpegel ebenfalls in einen Norm-Trittschallpegel umgerechnet. Dies geschah mithilfe der Norm-Trittschallpegel aus den Messungen der Decke mit dem Kugelfallapparat. Für die Umrechnung wurde der arithmetische Mittelwert der Norm-Trittschallpegel sowie der normierten Schalldruckpegel für jede Terz ermittelt. Daraus wird die Differenz  $D$  bestimmt:

$$D(f) = \bar{L}_{S,n}(f) - \bar{L}_n(f) \quad (6.1)$$

$D$  Differenz in dB

Diese Differenz  $D$  wurde dann von den einzelnen normierten Schalldruckpegeln abgezogen. Dadurch werden die Ergebnisse, die mit dem Shaker erzielt wurden, auf den Mittelwert der Kugelfall-Ergebnisse bezogen. Die Streuungen zwischen den einzelnen Messergebnissen bleiben erhalten.

$$L_n = L_{S,n} - D \quad (6.2)$$

Die ermittelten Spektren des Norm-Trittschallpegels finden sich in Abbildung 25. Durch die Umrechnung ist es nun möglich, die dazugehörigen Einzelwerte zu ermitteln (Tabelle 9). Es ist feststellbar, dass die Messwerte ein wenig mehr streuen als bei Messungen mit dem Kugelfallapparat. Die berechnete Standardabweichung ist etwas größer als bei den vorangegangenen Messungen. Es ist aber nicht zu erkennen, dass eine Abnahme des Trittschallpegels mit der Verkleinerung der Raumgröße vorliegt.

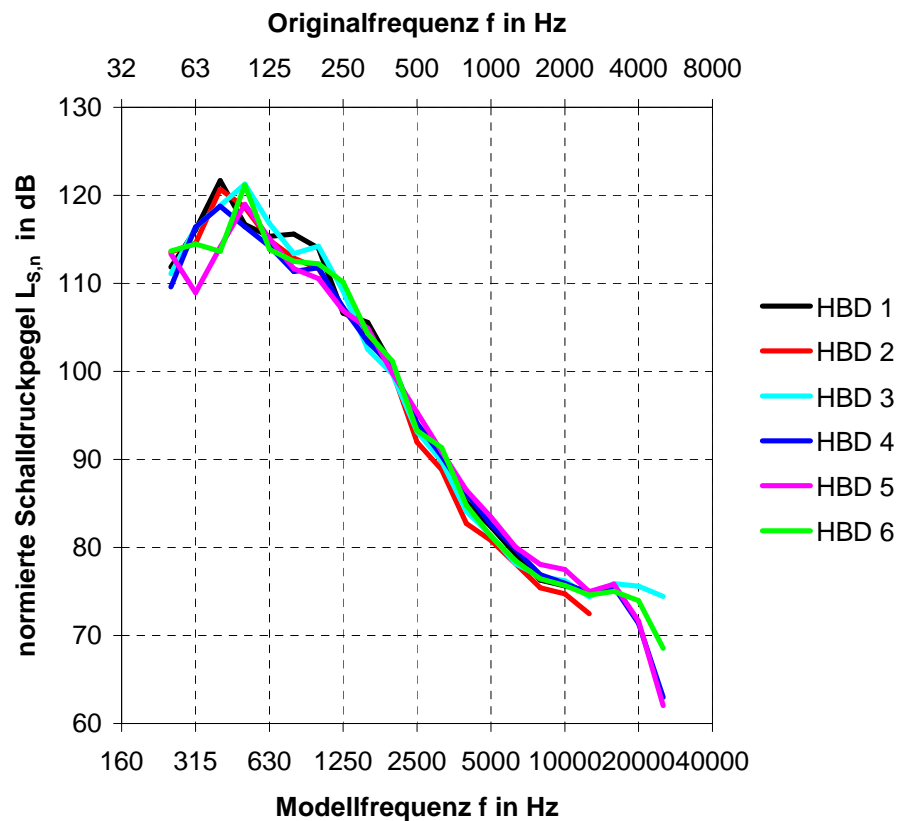


Abbildung 24: normierter Schalldruckpegel  $L_{S,n}$  der verschiedenen Raumgeometrien –  
Messung mit dem Shaker

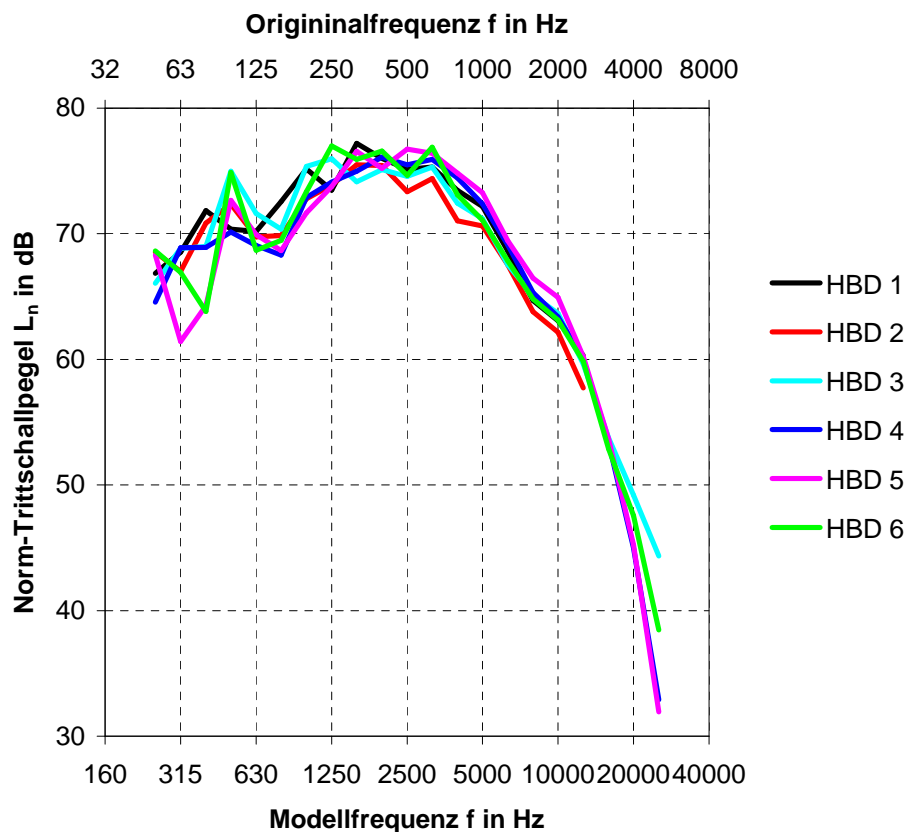


Abbildung 25: Messungen mit dem Shaker – normierter Schalldruckpegel  $L_{S,n}$  umgerechnet auf den Norm-Trittschallpegel

Die bewerteten Norm-Trittschallpegel liegen zwischen 71 und 73 dB (70,8 bis 72,7 dB). Für den Einzahlwert in 1/10 dB wurde auch die Standardabweichung bestimmt. Es ergibt sich ein Wert von  $\sigma = 0,65$  dB. Daraus lässt sich ableiten, dass die Messungen auch mit dem Shaker sehr gut reproduzierbar sind.

Tabelle 9: Einzahlwerte für Shaker

|                    | Raumgröße 1 | Raumgröße 2 | Raumgröße 3 | Raumgröße 4 | Raumgröße 5 | Raumgröße 6 | $\sigma$ in dB |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| $L_{nw}$ (1 dB)    | 73          | 71          | 72          | 73          | 73          | 73          | 0,65           |
| $L_{nw}$ (1/10 dB) | 72,3        | 70,8        | 71,7        | 72,1        | 72,7        | 72,1        |                |

## 6.3 Messungen mit den Betondecken

### 6.3.1 Kugelfallapparat

Die Ergebnisse der Messungen mit den Betondecken, die durch den Kugelfallapparat angeregt wurden, finden sich in Abbildung 26. Dargestellt sind die Ergebnisse der Raumgrößen 2-6.

Das Ergebnis der Größe 1 wird in Abschnitt 6.3.3 gesondert betrachtet. Die Spektren besitzen eine ziemlich große Streuung in tiefen Frequenzen. Erst ab ca. 2500 Hz wird der Verlauf der Kurven glatter. Die beste Anregung besteht im mittleren Frequenzbereich. Ab ca. 5000 Hz beginnen die Kurven abzufallen, d.h. es wird weniger Energie in die Decke eingebracht. Der spektrale Verlauf ist der Bezugskurve aus DIN EN ISO 717-2 ähnlich, wobei ein Versatz von 8 dB auftritt. Dies liegt vor allem darin begründet, dass die Modelldecken dicker gewählt worden sind, als eigentlich üblich. Besonders ausgeprägte Raummoden treten bei der Raumgröße 6 auf. Mit kleiner werdender Raumgeometrie wird die Anregung bei 80 Hz sehr gering. Bei dieser Frequenz scheinen die Decken besonders steif zu sein.

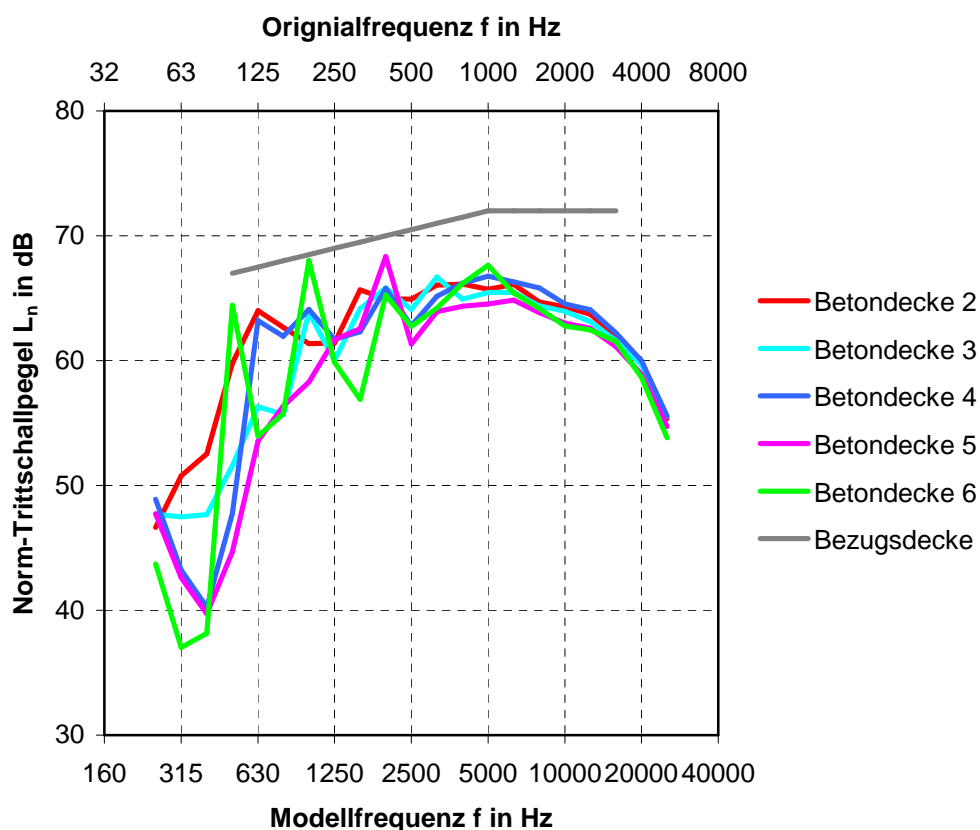


Abbildung 26: Norm-Trittschallpegel  $L_n$  der verschiedenen Raumgeometrien – Messung mit dem Kugelfallapparat

Anders als bei den Holzbalkendecken ist es nicht sinnvoll die Standardabweichungen einzelner Terzen zu bestimmen, denn besonders im tiefen Frequenzbereich ist die Streuung der Messergebnisse durch die geringe Modendichte doch sehr groß. Bei Bildung der Einzahlwerte ergeben sich bewertete Norm-Trittschallpegel zwischen 68,7 und 70,2 dB. Die

Einzhangaben sind also relativ stabil und Resonanzeffekte werden herausgemittelt. Die Standardabweichung der bewerteten Pegel ist mit  $\sigma = 0,6$  dB eher gering.

Tabelle 10: Einzahlwerte für Kugelfallapparat

|                    | Raumgröße 2 | Raumgröße 3 | Raumgröße 4 | Raumgröße 5 | Raumgröße 6 | $\sigma$ in dB |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| $L_{nw}$ (1 dB)    | 70          | 70          | 71          | 69          | 70          | 0,59           |
| $L_{nw}$ (1/10 dB) | 69,9        | 69,3        | 70,2        | 68,7        | 69,2        |                |

### 6.3.2 Shaker

Die Messung mit dem Shaker ergibt ein ähnliches Bild wie mit dem Kugelfallapparat (Abbildung 27). Raum- und Deckenmoden werden vor allem bei der kleinsten Raumgeometrie sichtbar. Auch die große Streuung in den tiefen Frequenzen ist gut erkennbar. Ab ca. 2500 Hz ist der Verlauf der Kurven nahezu identisch. Ab einer Frequenz von 10 kHz sind die Messergebnisse als zufällig zu betrachten, denn eine ausreichende Anregung der Betondecke bei den hohen Frequenzen war durch den Shaker nicht gegeben.

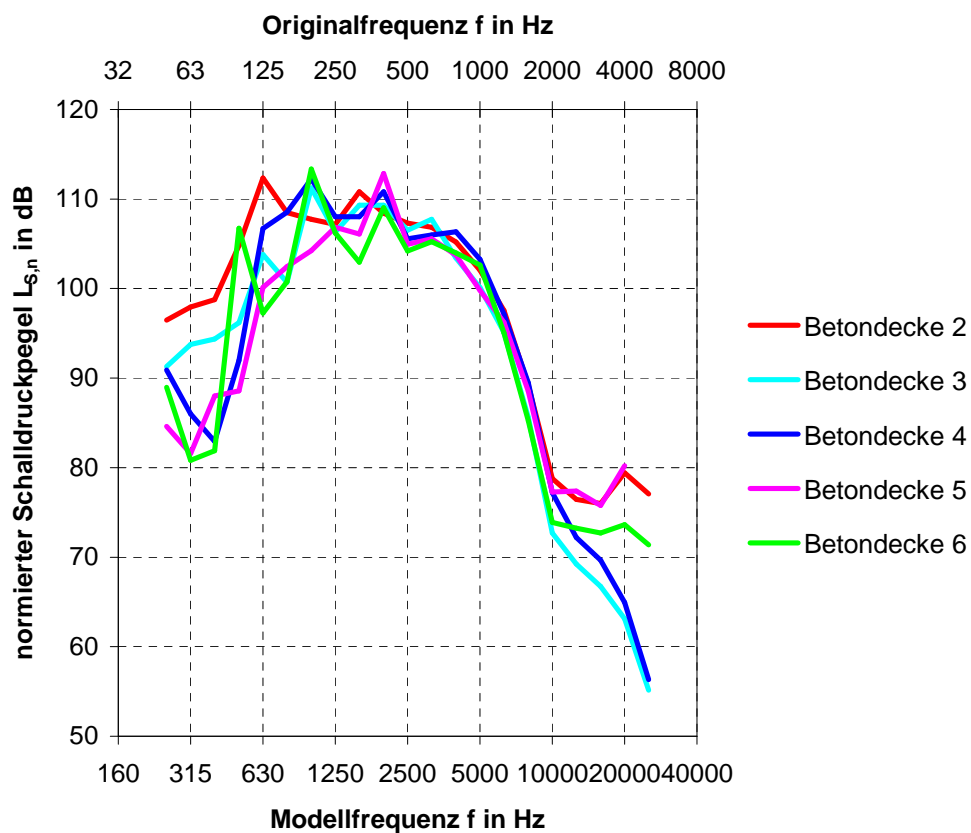


Abbildung 27: normierter Schalldruckpegel  $L_{S,n}$  der verschiedenen Raumgeometrien –  
Messung mit dem Shaker



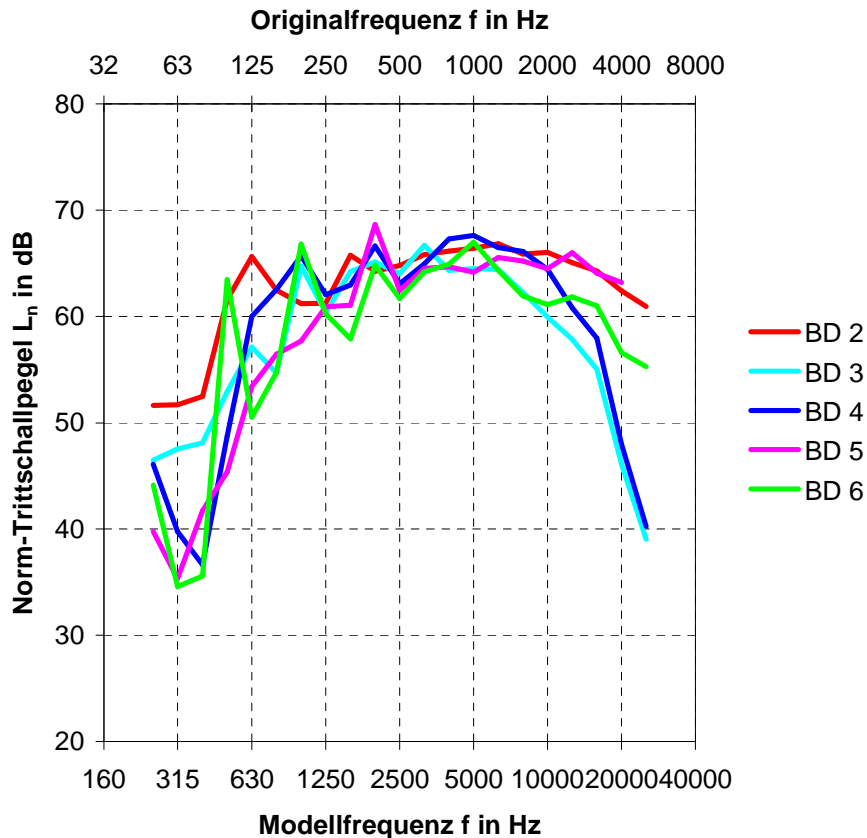


Abbildung 28: Messungen mit dem Shaker – Umrechnung der normierten Schalldruckpegel  $L_{S,n}$  auf den Norm-Trittschallpegel  $L_n$

Für die bessere Vergleichbarkeit werden die normierten Schalldruckpegel in den Norm-Trittschallpegel umgewandelt. Die Herangehensweise erfolgt auf die gleiche Art wie in Kapitel 6.2.2 bereits beschrieben wurde. Abbildung 28 zeigt den Verlauf des Norm-Trittschallpegels nach der Umrechnung. Werden die Ergebnisse der Messungen von Kugelfallapparat und Shaker miteinander verglichen, ist festzustellen, dass vor allem im mittleren Frequenzbereich bei den Messergebnissen mit dem Shaker eine erhöhte Streuung vorliegt. Dies zeigt sich auch bei der Ermittlung des bewerteten Norm-Trittschallpegels. Die Schwankung der  $L_{n,w}$ 's liegt zwischen 66,2 und 71,3 dB. Die große Streuung der Einzahlwerte entsteht zusätzlich durch die hohen Frequenzen, bei denen die Ergebnisse durch das Störgeräusch verfälscht werden. Aus den fünf Einzahlwerten ergibt sich eine relativ große Standardabweichung von  $\sigma = 2$  dB.

Tabelle 11: Einzahlwerte für Shaker

|                    | Raum -<br>größe 2 | Raum -<br>größe 3 | Raum -<br>größe 4 | Raum -<br>größe 5 | Raum -<br>größe 6 | $\sigma$ in dB |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| $L_{nW}$ (1 dB)    | 72                | 67                | 70                | 71                | 69                | 2,05           |
| $L_{nW}$ (1/10 dB) | 71,3              | 66,2              | 69,1              | 70,7              | 68,1              |                |

Der Shaker ist als Anregungsquelle auf einer Betondecke anscheinend weniger gut einsetzbar als der Kugelfallapparat. Ein Grund der großen Abweichungen könnte aber darin liegen, dass pro Hammerwerksposition nur ein Anregungspunkt gemessen worden ist.

Ebenso wie auf den Holzbalkendecken ist der Norm-Trittschallpegel – abgesehen von zufälligen Schwankungen - von Betondecken unabhängig von der Raumgeometrie.

### 6.3.3 Sonderfall bei Verwendung der Betondecke 1

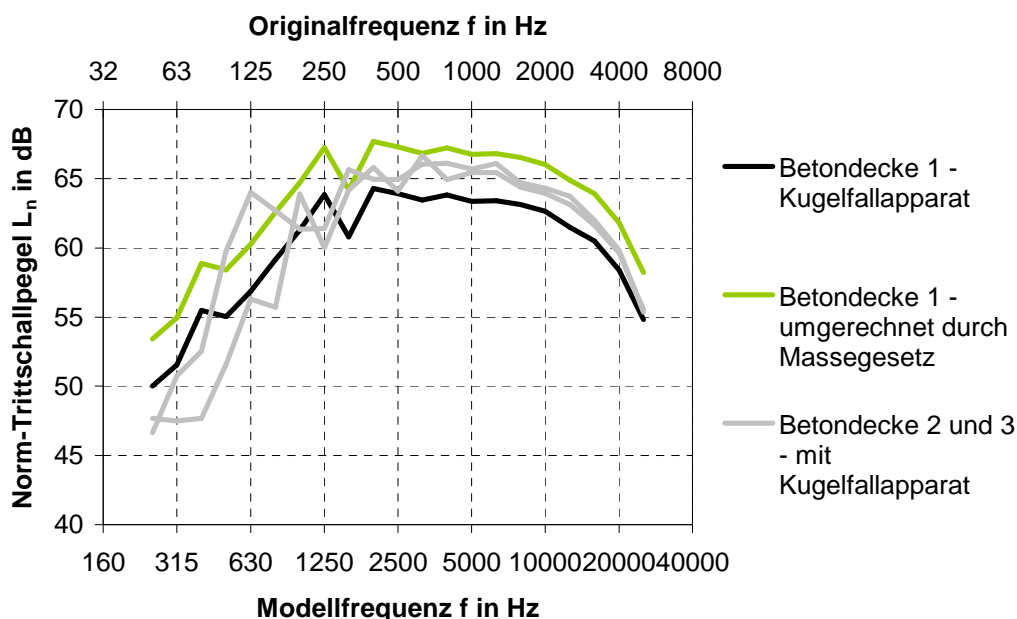


Abbildung 29: Sonderfall: Norm-Trittschallpegel der Betondecke 1 und Raumgeometrie 1

Aus statischen Gründen musste die große Betondecke eine Dicke von 50 mm aufweisen, und nicht von 40 mm, wie bei den anderen Decken. Damit ist die Messung von Raumgeometrie 1 nicht direkt vergleichbar mit den kleineren Decken. In Abbildung 29 ist der spektrale Verlauf des Norm-Trittschallpegels der Decke 1 eingetragen. Weiterhin werden exemplarisch als Bezugskurven die Norm-Trittschallpegel der Decken 2 und 3 mit dargestellt. Aufgrund der größeren Dicke der Decke ist verständlich, dass der Trittschallpegel geringer ist, als bei den anderen Raumgrößen. Der spektrale Verlauf der drei Kurven ist sehr ähnlich. Bei der Ermittlung des bewerteten Norm-Trittschallpegels ergibt sich ein Wert von  $L_{n,W} = 67,9$  dB.

Mithilfe der Gleichung (2.6) ist es möglich, für massive Rohdecken den bewerteten Norm-Trittschallpegel zu berechnen. Bei einer Dicke von 50 mm beträgt die flächenbezogene Masse  $m'' = 120$  kg/m<sup>2</sup> und bei  $d = 40$  mm ist  $m'' = 96$  kg/m<sup>2</sup>. Aus diesen Angaben ist die Differenz des bewerteten Norm-Trittschallpegels berechenbar.

$$D_W = 351g \frac{m''_{50mm}}{m''_{40mm}} \text{ dB} \quad D_W = 3,4 \text{ dB} \quad (6.3)$$

$D_W$  Differenz der bewerteten Norm-Trittschallpegel in dB

Dieser Einzahlwert wird für die spektrale Analyse für alle Terzen angenommen und so der Trittschallpegel korrigiert und im Diagramm als grüne Kurve dargestellt (Abbildung 29). Wird sie mit den ermittelten Norm-Trittschallpegeln der anderen Raumgrößen verglichen, wird deutlich, dass eine Korrektur des Pegels um 3,4 dB zu viel ist. Sinnvoller wäre eine Korrektur des Pegels um ca. 2 dB. Dies ist ebenfalls bei dem Vergleich der Einzahlwerte zu beobachten. Die bewerteten Norm-Trittschallpegel der kleineren Raumgrößen liegen zwischen 69 und 71 dB, während ein  $L_{n,w}$  von 68 dB bei Decke 1 bestimmt worden ist. Die Gleichung (2.6) wurde aus vielen Messergebnissen ermittelt und wird auch als Massekurve bezeichnet. Dabei liegen die Standardabweichungen bei bis zu ca. 1,5 dB. Die hier vorgenommene Korrektur durch Berechnung des Norm-Trittschallpegels liegt also noch im Bereich einer normalen Schwankung.

## 6.4 Vergleich mit Decken aus Prüfständen und Gebäuden

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Modelldecken mit Decken aus Prüfständen verglichen. Weiterhin ist der Norm-Trittschallpegel einer Holzbalkendecke aus einem Altbau vorhanden. Die Verläufe der dargestellten Modelldecken stammen von den Messungen mit dem Kugelfallapparat. Bei den vorgenommenen Untersuchungen der Norm-Trittschallpegel wurden prinzipielle Untersuchungen durchgeführt, bei denen Unterschiede im Pegel deutlich gemacht werden sollten. Es kam nicht darauf an, einen identischen spektralen Verlauf mit Decken aus Prüfständen zu erreichen. Trotzdem sollen die Modelldecken mit Decken aus Prüfständen verglichen werden, um zu sehen, wie gut die Skalierung der Modelldecken vorgenommen worden ist. Ferner ist durch diesen Vergleich erkennbar, wie gut die verwendeten Körperschallquellen, vor allem der Kugelfallapparat, an das Hammerwerk angeglichen werden konnten.

Grundsätzlich gibt es bei Holzbalkendecken große Streuungen im Verlauf des Norm-Trittschallpegels. Dies liegt vor allem in den unterschiedlichen Aufbauten begründet (z. B. Konstruktion, Menge und Art der Schüttung). Weiterhin besitzen die verwendeten Materialien

unterschiedliche Eigenschaften (z. B. E-Modul, Dichte) In Abbildung 30 ist der Verlauf der Trittschallpegel von einigen Holzbalkendecken dargestellt. Die grauen Kurven sind Messergebnisse aus Prüfständen und die rote ist eine Decke aus einem Altbau. Die schwarzen Messkurven stellen die Modelldecken dar. Es lässt sich feststellen, dass der Norm-Trittschallpegel der Modelldecken denen der Originaldecken sehr ähnlich ist. Die Decken aus den Prüfständen besitzen eine tiefere Entkopplungsfrequenz als die Modelldecken. Dies liegt u. a. daran, dass eine MDF-Platte wesentlich steifer ist als eine Spanplatte. Weiterhin wird die Entkopplungsfrequenz durch die Steifigkeit des Kontaktes beeinflusst. Der Kontakt einer Decke mit einer Kugel ist durch den geringen Radius anders als bei einem Hammerwerk.

Die Holzbalkendecke aus dem Altbau (rote Kurve in Abbildung 30) stimmt annähernd mit den Modelldecken überein. Der Aufbau dieser Decke ist etwas anders als die Decke, die als Muster für die Modelldecken verwendet wurde. Die Altbauendecke besitzt Deckenbalken mit den Abmessungen 160x220 mm<sup>2</sup>, sowie eine Unterdecke. Eine Schüttung ist aber ebenfalls nicht vorhanden. Die Messung erfolgte auf einer Dielung. Diese scheint eine ähnliche Steifigkeit wie die MDF-Platte zu besitzen, denn die Entkopplung zwischen Quelle und Decke erfolgt etwa bei der gleichen Frequenz  $f = 3150$  Hz.

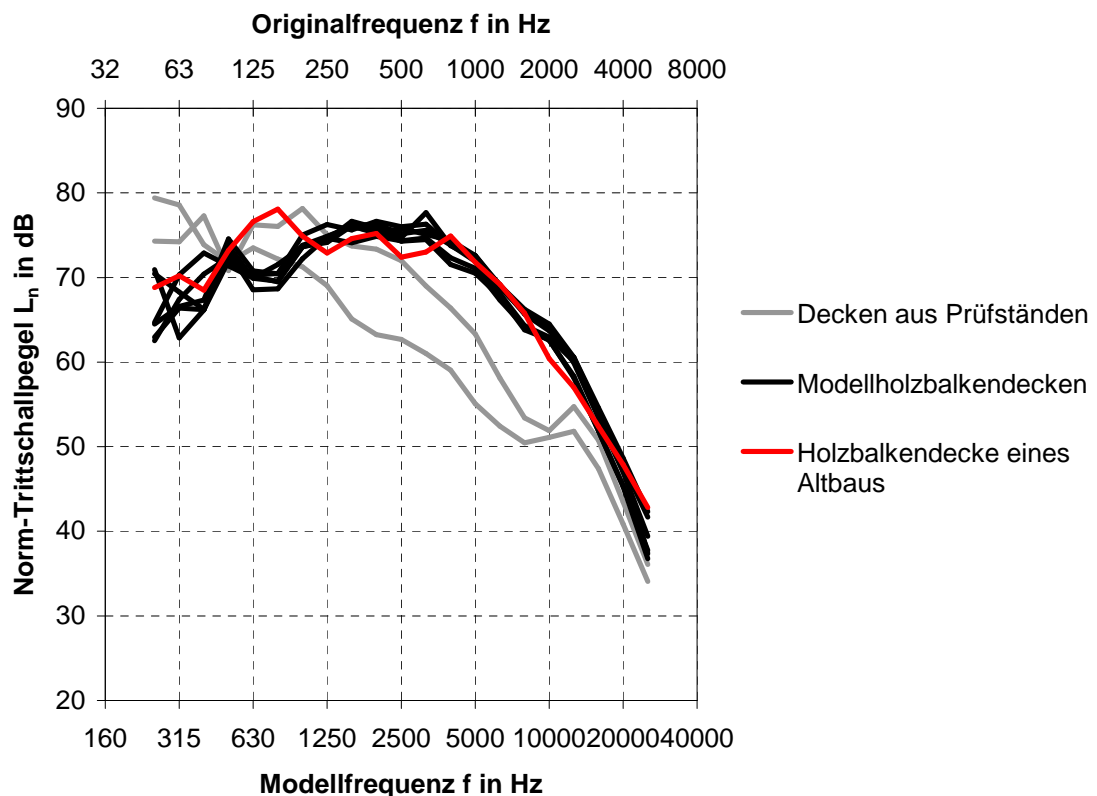


Abbildung 30: Vergleich der gemessenen Modellholzbalkendecken mit Rohdecken aus Prüfständen bzw. einer Holzbalkendecke (ohne Schüttung) eines Altbaus [Rab08]

Auch bei Betondecken sind große Streuungen im Norm-Trittschallpegel festzustellen. In Abbildung 31 sind Decken aus Prüfständen mit unterschiedlicher Größe, sowie die Modellbetondecken dargestellt. Nach dem Massegesetz (vgl. Abschnitt 2.4) nimmt bei Betondecken der Norm-Trittschallpegel mit der Zunahme der flächenbezogenen Masse ab. Diese und die Art des Betons sind bei den vorliegenden Decken unbekannt. Es ist also zu vermuten, dass z. B. bei den Decken mit 160 mm Dicke unterschiedliche Materialeigenschaften vorliegen (Dichte und E-Modul).

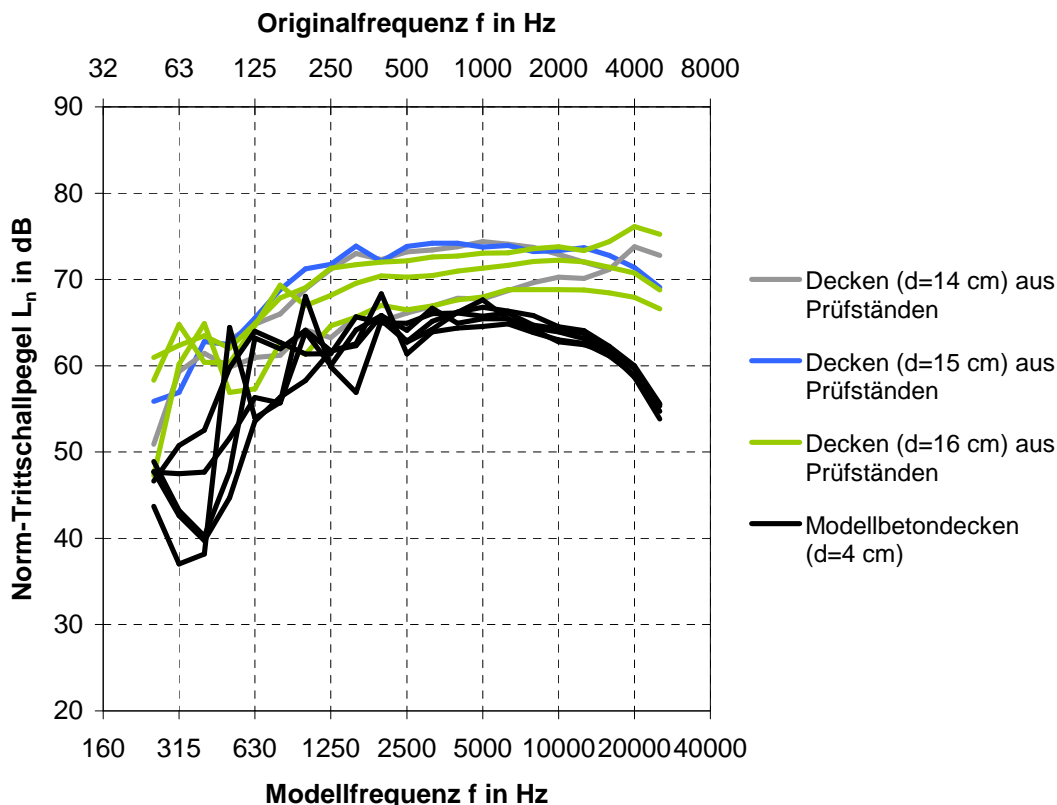


Abbildung 31: Vergleich der gemessenen Modellbetondecken mit Rohdecken aus Prüfständen

Die Modelldecken besitzen ein ähnliches Spektrum wie die Prüfstandsdecken. Lediglich die Anregung ist deutlich geringer. Dies liegt zum einen an der großen Dicke der Modelldecken, die umgerechnet 20 cm im Original besitzt, sowie an den Modellierungsgesetzen (vgl. Kapitel 3.2 – Gleichung (3.24)). Die Streuungen in den tiefen Frequenzen entstehen durch modale Effekte im Luft- und Körperschallfeld.

Ab 6300 Hz verringert sich der Norm-Trittschallpegel der Modelldecken. Dies ist bei den Prüfstandsdecken nicht der Fall. Ein Grund könnte der weichere Kontakt der Kugel mit der Decke im Vergleich zum Hammerwerk sein. Dadurch verschiebt sich die Resonanzfrequenz zu tieferen Frequenzen.

Abschließend ist zu sagen, dass, obwohl nur Unterschiede in den Trittschallpegeln festgestellt werden sollten, eine ziemlich gute Übereinstimmung mit dem Original vorliegt.

## 6.5 Zusammenfassung der Messergebnisse

Eine Verbesserung des Norm-Trittschallpegels hin zu kleinen Raumgrößen konnte durch die umfangreichen Messungen nicht festgestellt werden. In Abbildung 32 sind noch einmal die bewerteten Norm-Trittschallpegel der Messungen zusammengefasst dargestellt. Mit Ausnahme der Ergebnisse der Betondecken bei Shakeranregung sind die Streuungen der Werte gering.

Bei der Ermittlung der Luftschalldämmung wird das Trennbauteil mit einer Flächenquelle angeregt. Eine Wand mit größerer Bauteilfläche kann mehr zu Schwingungen angeregt werden, als mit kleiner Fläche. Dies hat zur Folge, dass die Schalldämmung bei großen Flächen kleiner wird. Dass es keine Verbesserungen im Norm-Trittschallpegel bei kleineren Raumgeometrien gibt, lässt sich mithilfe der eingebrachten Leistung erklären. Die Leistung eines Hammers bzw. der Kugel bleibt bei gleichem Deckenmaterial gleich. Somit verändern sich weder die Eingangsimpedanz, noch der Abstrahlgrad der Decke. Aus diesem Grund werden immer dieselben Schalldruckpegel im Empfangsraum gemessen.

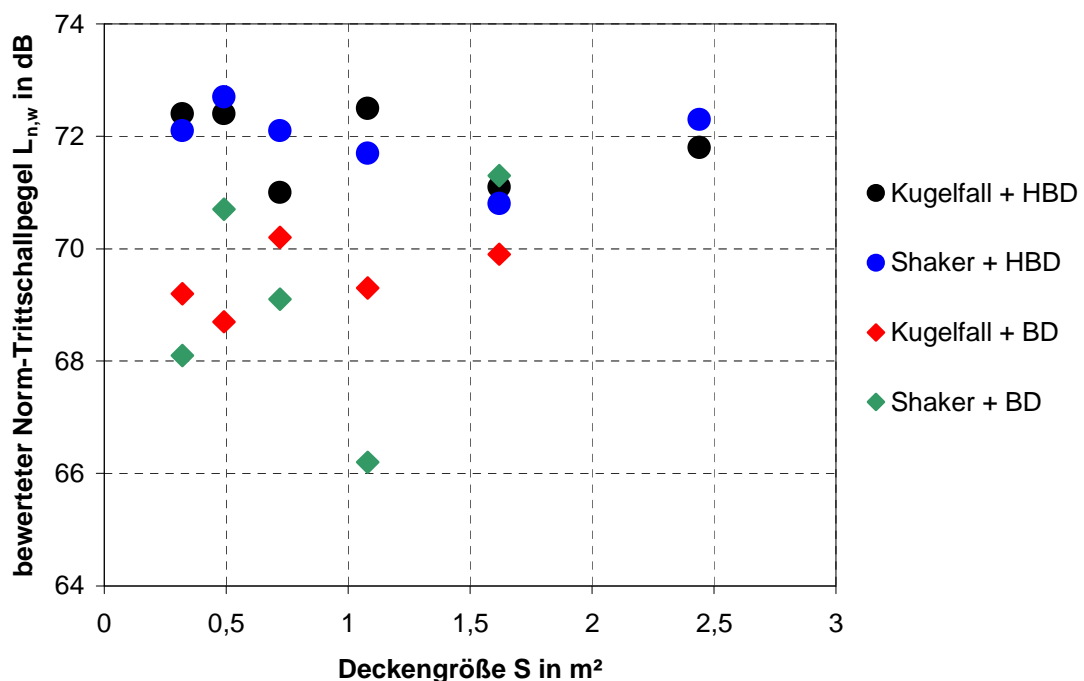


Abbildung 32: bewerteter Norm-Trittschallpegel  $L_{n,w}$  für die verschiedenen Raumgrößen und Decken

## 7 Messungen Skelettbau

Die Skelettbauweise ist eine Bauweise, bei dem das Gerippe (Holz, Stahl oder Stahlbeton) die primär tragende Funktion besitzt. Dieses wird mit Mauerwerk oder Fertigteilen ausgefüllt. Vor allem Hochhäuser, Hallen und Brücken werden in dieser Weise gebaut. Im Skelettbau sind die Decken über mehrere Räume gespannt. Daher kommen nur Betondecken zum Einsatz, denn Holzbalkendecken besitzen nur eine geringe Spannweite. Diese Bauweise wirkt sich positiv auf die Trittschalldämmung aus. Wie stark dieser Effekt ist, soll im Modell untersucht werden. Dazu werden die kleinste Raumgeometrie und verschieden große Modellbetondecken verwendet (vgl. Abbildung 40). Die Messungen erfolgen mit dem Kugelfallapparat. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 33 dargestellt. Ab dem mittleren Frequenzbereich sind deutliche Verbesserungen im Trittschallpegel mit zunehmender Deckengröße festzustellen. Bei den tiefen Frequenzen gibt es wieder eine große Streuung der Messwerte. Weiterhin wird sichtbar, welche Resonanzen von Raummoden bzw. von Deckenmoden stammen.

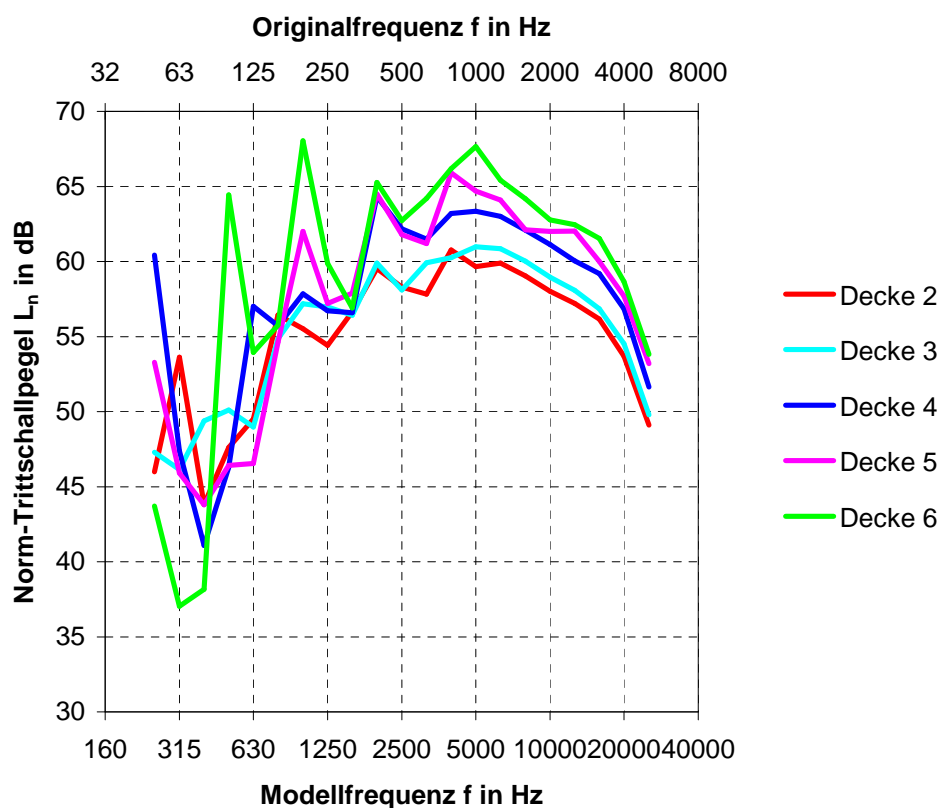


Abbildung 33: Norm-Trittschallpegel  $L_n$  bei Raumgeometrie 6 unter Verwendung verschieden großer Betondecken – Messung mit Kugelfallapparat

Tabelle 12: Einzahlwerte

|                    | Decke 2 | Decke 3 | Decke 4 | Decke 5 | Decke 6 |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Verhältnis $S/S_0$ | 5,1     | 3,4     | 2,3     | 1,5     | 1       |
| $L_{nW}$ (1 dB)    | 64      | 65      | 67      | 68      | 70      |
| $L_{nW}$ (1/10 dB) | 63,7    | 64,6    | 66,7    | 67,7    | 69,2    |

Aus den Messergebnissen werden die Einzahlwerte bestimmt (siehe Tabelle 12). Mit zunehmender Deckengröße wird der bewertete Norm-Trittschallpegel kleiner. Die Anregungsenergie verteilt sich auf einer größeren werdenden Deckenfläche, weshalb die Abstrahlung im Empfangsraum geringer wird. Bei idealer Verteilung der Energie würde bei einer doppelten Deckengröße ein 3 dB Abfall zu beobachten sein. Dieser Abfall ist offensichtlich kleiner. Durch die Messwerte wurde eine logarithmische Regressionskurve gelegt (siehe Abbildung 34). Sie beschreibt den tatsächlichen Abfall des Norm-Trittschallpegels der Decken bei dieser Modellmessung. Die zugehörige Formel soll in folgender Schreibweise ausgedrückt werden.

$$L_{n,W} = L_{n,W,0} + a \cdot 10 \lg \frac{S}{S_0} \text{ dB} \quad (7.1)$$

$S$  Deckengröße in  $\text{m}^2$

$S_0$  Öffnungsfläche in  $\text{m}^2$

$L_{n,W,0}$  Ausgangspegel bei gleicher Öffnungs- und Deckengröße in dB

Es ergibt sich folgende Gleichung für den Abfall des Norm-Trittschallpegels bei diesen Messungen:

$$\Leftrightarrow L_{n,W} = L_{n,W,0} - 8 \lg \frac{S}{S_0} \text{ dB} \quad \Leftrightarrow L_{n,W} = 69,2 \text{ dB} - 8 \lg \frac{S}{S_0} \text{ dB} \quad (7.2)$$

$$D_w = 8 \lg \frac{2S_0}{S_0} = 2,4 \text{ dB}$$

Es ergibt sich pro Verdopplung der Deckengröße eine Abnahme des Norm-Trittschallpegels von 2,4 dB.



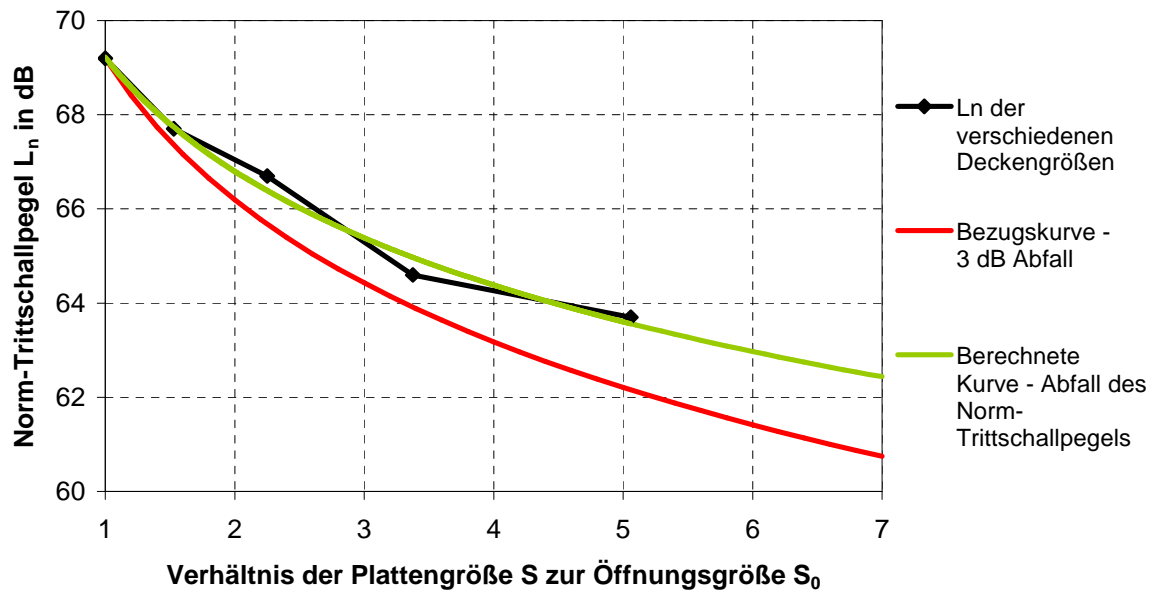


Abbildung 34: Ergebnisse der Messungen in Skelettbauweise

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden Untersuchungen zum Einfluss der Raumgeometrie auf den Norm-Trittschallpegel durchgeführt. Dafür wird ein Modellprüfstand entwickelt, der durch verstellbare Seitenwände die Realisierung verschiedener Raumgrößen ermöglicht. Die Größen repräsentieren die tatsächliche Bausituation an Gebäuden. Es werden Holzbalken- und Betondecken untersucht.

Ausgangspunkt für diese Messungen war die umfangreiche Forschung zum Einfluss der Raumgeometrie auf die Luftschallübertragung, bei der Abhängigkeiten der Luftschalldämmung von der Größe der Bauteilfläche festgestellt wurden. Es soll nun geprüft werden, ob bei der Trittschalldämmung vergleichbare Effekte auftreten.

Für die Messung des Trittschallpegels wird normalerweise ein Norm-Hammerwerk verwendet. Der Bau eines Modell-Hammerwerks ist durch die schwierige technische Umsetzung innerhalb der begrenzten Zeit der Diplomarbeit nicht möglich. Deshalb kommen zwei andere Körperschallquellen, der Kugelfallapparat und der Shaker, zum Einsatz, die in Voruntersuchungen erprobt werden. Mithilfe dieser Quellen werden die Messungen des Norm-Trittschallpegels bei verschiedenen Raumgeometrien durchgeführt. Dabei wird festgestellt, dass die Spektren der Holzbalkendecken alle eine gute Übereinstimmung im Frequenzverlauf besitzen. Nur bei sehr tiefen bzw. hohen Frequenzen werden die Streuungen der Messwerte etwas größer. Diese sind durch das Auftreten von Raum- und Deckenmoden bzw. durch Materialinhomogenitäten erklärbar. Eine Abnahme des Norm-Trittschallpegels zu kleineren Raumvolumina liegt nicht vor. Dies spiegelt sich auch in den bewerteten Norm-Trittschallpegeln wider.

Bei den Spektren der Betondecken gibt es große Streuungen im tiefen bis mittleren Frequenzbereich. Besonders bei den kleinen Deckengrößen zeigen sich ausgeprägte Resonanzeffekte, die auf Raum- und Deckenmoden zurückzuführen sind. Ab 2500 Hz wird der Verlauf der Kurven glatter und die Abweichungen voneinander werden geringer. Trotz der zum Teil starken spektralen Schwankungen zeigen sich diese im Einzahlwert nur gering. Auch bei den Betondecken bleiben die Norm-Trittschallpegel, von zufälligen Schwankungen abgesehen, konstant.

Die Messungen ergeben, dass die Verwendung des Kugelfallapparates als Körperschallquelle besser geeignet ist als der Shaker.

Wie gut die Modellierung des Empfangsraumes, der Decken sowie der Körperschallquellen gelungen ist, zeigt ein Vergleich der Messergebnisse mit Werten aus Prüfständen. Dabei werden nur geringe Unterschiede in den spektralen Verläufen festgestellt. Bei den Holzbalkendecken entstehen Abweichungen, die vor allem auf verschiedene Materialien der oberen Beplankung, die eine unterschiedliche Steifigkeit besitzen, zurückzuführen sind.

Die Vermutung, dass der Norm-Trittschallpegel von der Raumgeometrie abhängig ist, kann aufgrund der Messungen nicht bestätigt werden. Dies ist dadurch erklärbar, dass die Leistung der Körperschallquellen immer gleich bleibt und damit Eingangsimpedanz und Abstrahlgrad der Decke unverändert bleiben. Aus diesem Grund werden immer die gleichen Schalldruckpegel im Empfangsraum ermittelt.

Der Bau eines Gebäudes in Skelettbauweise wirkt sich positiv auf die Trittschallübertragung aus. In welchem Maße der Einfluss tatsächlich vorhanden ist, soll mittels des Modells in einem ersten Versuch untersucht werden. Dazu werden unter Verwendung der kleinstmöglichen Raumgeometrie und verschieden großer Betondecken die Norm-Trittschallpegel bestimmt. Hier werden bei zunehmender Deckengröße Verbesserungen ab dem mittleren Frequenzbereich festgestellt. Bei der Betrachtung der Einzahlwerte wird eine Verbesserung des Norm-Trittschallpegels von 2,4 dB pro Verdopplung der Deckengröße ermittelt.

Für die weitere Forschung mit diesem Prüfstand ist anzustreben, ein Modell-Hammerwerk im Maßstab 1:5 zu entwickeln. Damit wird eine bessere Vergleichbarkeit mit Messungen in Prüfständen bzw. am Bau hergestellt.

Mithilfe der in dieser Diplomarbeit gewonnenen Messdaten für Rohdecken können in Zukunft Verbesserungsmaße von Deckenauflagen sowie von Unterdeckensystemen im Modell bestimmt werden.

## Anhang

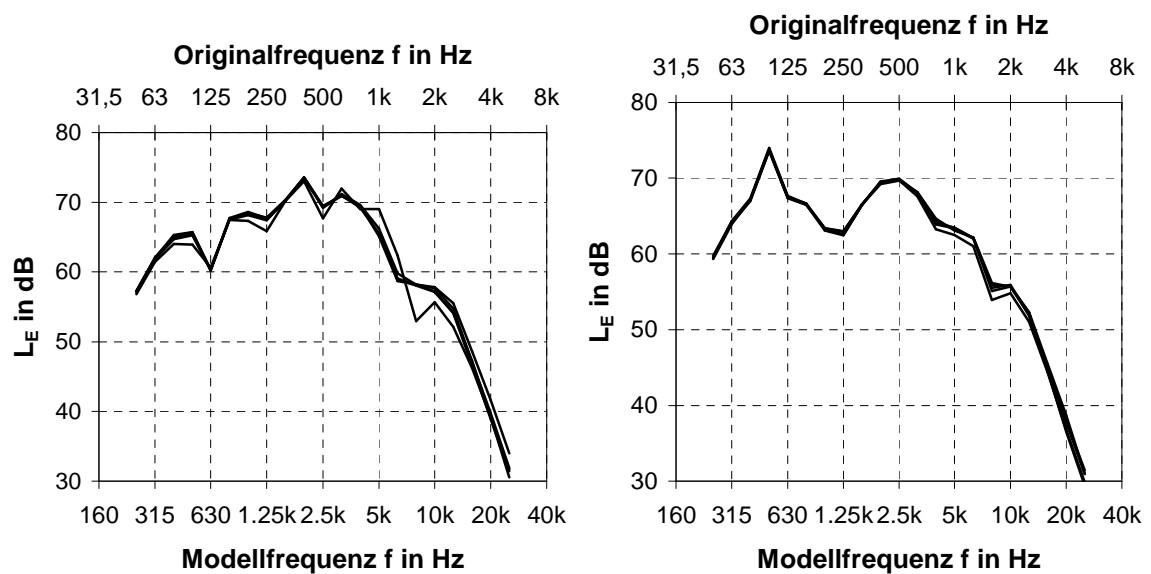


Abbildung 35: Messkurven des Energiepegels auf der Holzbalkendecke mit Kugelfallapparat  
(links: auf Balken, rechts: Zwischenraum)

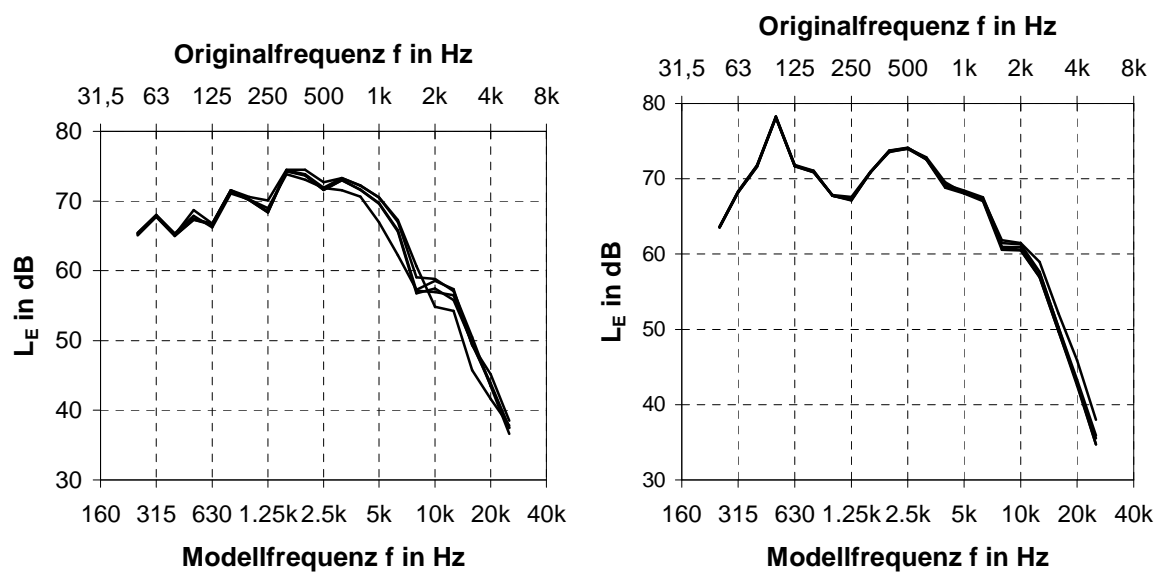


Abbildung 36: Messkurven des Maximalpegels auf der Holzbalkendecke mit Kugelfallapparat  
(links: auf Balken, rechts: Zwischenraum)

Tabelle 13: Messung der Wiederholstandardabweichung mit dem Shaker auf der Holzbalkendecke an einem Punkt

| Frequenz $f$ in Hz |          | Nachhallzeit<br>$T_{20}$ in s | Normtrittschall-<br>pegel $L_n$ in dB | Standard-<br>abw. $\sigma$ |
|--------------------|----------|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| Modell             | Original |                               |                                       |                            |
| 250                | 50       | 0,26                          | 56,65                                 | 0,33                       |
| 315                | 63       | 0,29                          | 57,86                                 | 0,21                       |
| 400                | 80       | 0,24                          | 63,61                                 | 0,24                       |
| 500                | 100      | 0,30                          | 57,28                                 | 0,32                       |
| 630                | 125      | 0,27                          | 63,40                                 | 0,61                       |
| 800                | 160      | 0,29                          | 70,93                                 | 0,29                       |
| 1000               | 200      | 0,27                          | 69,62                                 | 1,38                       |
| 1250               | 250      | 0,27                          | 58,07                                 | 1,42                       |
| 1600               | 315      | 0,31                          | 55,26                                 | 1,10                       |
| 2000               | 400      | 0,30                          | 50,99                                 | 1,35                       |
| 2500               | 500      | 0,31                          | 43,74                                 | 1,26                       |
| 3150               | 630      | 0,30                          | 41,04                                 | 1,00                       |
| 4000               | 800      | 0,29                          | 37,75                                 | 1,25                       |
| 5000               | 1000     | 0,27                          | 36,49                                 | 0,65                       |
| 6300               | 1250     | 0,24                          | 34,80                                 | 0,96                       |
| 8000               | 1600     | 0,22                          | 33,19                                 | 1,00                       |
| 10000              | 2000     | 0,20                          | 33,65                                 | 1,15                       |
| 12500              | 2500     | 0,18                          | 34,24                                 | 1,18                       |
| 16000              | 3150     | 0,16                          | 35,53                                 | 1,03                       |
| 20000              | 4000     | 0,14                          | 36,57                                 | 1,10                       |
| 25000              | 5000     | 0,13                          | 36,00                                 | 2,19                       |

Tabelle 14: Standardabweichungen der Norm-Trittschallpegel der Holzbalkendecke (Messung mit Shaker)

| Frequenz $f$ in Hz |          | $\sigma$ in dB | Frequenz $f$ in Hz |          | $\sigma$ in dB |
|--------------------|----------|----------------|--------------------|----------|----------------|
| Modell             | Original |                | Modell             | Original |                |
| 250                | 50       | 1,64           | 3150               | 630      | 0,90           |
| 315                | 63       | 2,84           | 4000               | 800      | 1,38           |
| 400                | 80       | 3,35           | 5000               | 1000     | 0,99           |
| 500                | 100      | 2,09           | 6300               | 1250     | 0,83           |
| 630                | 125      | 1,02           | 8000               | 1600     | 0,87           |
| 800                | 160      | 1,52           | 10000              | 2000     | 0,91           |
| 1000               | 200      | 1,44           | 12500              | 2500     | 0,97           |
| 1250               | 250      | 1,43           | 16000              | 3150     | 0,39           |
| 1600               | 315      | 1,10           | 20000              | 4000     | 2,01           |
| 2000               | 400      | 0,58           | 25000              | 5000     | 5,73           |
| 2500               | 500      | 1,12           |                    |          |                |

**Tabelle 15:** Norm-Trittschallpegel der verschiedenen Raumgeometrien für die  
Holzbalkendecken, angeregt durch Kugelfallapparat

| Frequenz $f$ in Hz |          | Norm-Trittschallpegel $L_n$ in dB |         |         |         |         |         |
|--------------------|----------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Modell             | Original | Decke 1                           | Decke 2 | Decke 3 | Decke 4 | Decke 5 | Decke 6 |
| 250                | 50       | 64,67                             | 62,52   | 64,50   | 62,94   | 70,93   | 70,43   |
| 315                | 63       | 70,31                             | 67,43   | 66,58   | 66,38   | 62,88   | 68,28   |
| 400                | 80       | 72,89                             | 70,42   | 67,32   | 66,19   | 66,15   | 66,23   |
| 500                | 100      | 71,39                             | 72,38   | 74,58   | 71,94   | 73,08   | 73,70   |
| 630                | 125      | 69,93                             | 70,28   | 70,76   | 70,13   | 68,55   | 69,92   |
| 800                | 160      | 71,52                             | 70,48   | 70,44   | 69,48   | 68,66   | 69,56   |
| 1000               | 200      | 73,66                             | 73,82   | 75,02   | 73,65   | 72,22   | 73,61   |
| 1250               | 250      | 74,15                             | 74,87   | 76,25   | 74,66   | 74,79   | 74,41   |
| 1600               | 315      | 76,11                             | 76,03   | 75,64   | 74,09   | 76,07   | 76,65   |
| 2000               | 400      | 76,32                             | 75,40   | 76,66   | 74,85   | 75,24   | 75,84   |
| 2500               | 500      | 75,15                             | 74,30   | 76,00   | 74,35   | 75,82   | 74,72   |
| 3150               | 630      | 75,58                             | 74,50   | 76,30   | 74,67   | 75,10   | 77,67   |
| 4000               | 800      | 73,86                             | 71,54   | 73,83   | 72,33   | 74,35   | 73,78   |
| 5000               | 1000     | 71,90                             | 70,50   | 72,60   | 71,07   | 72,60   | 72,24   |
| 6300               | 1250     | 68,09                             | 67,74   | 68,85   | 67,33   | 69,06   | 69,15   |
| 8000               | 1600     | 64,31                             | 63,82   | 65,81   | 64,16   | 66,25   | 65,67   |
| 10000              | 2000     | 62,96                             | 62,65   | 64,07   | 62,58   | 64,48   | 63,71   |
| 12500              | 2500     | 60,09                             | 58,15   | 59,91   | 58,32   | 60,58   | 60,55   |
| 16000              | 3150     | 53,94                             | 51,90   | 53,40   | 51,87   | 54,17   | 54,59   |
| 20000              | 4000     | 47,46                             | 45,28   | 46,98   | 45,40   | 47,81   | 48,64   |
| 25000              | 5000     | 37,37                             | 36,76   | 39,42   | 37,73   | 41,67   | 42,31   |

**Tabelle 16:** Trittschallpegel der verschiedenen Raumgeometrien für die Holzbalkendecken,  
angeregt durch Shaker

| Frequenz $f$ in Hz |          | Trittschallpegel $L_{s,n}$ in dB |         |         |         |         |         |
|--------------------|----------|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Modell             | Original | Decke 1                          | Decke 2 | Decke 3 | Decke 4 | Decke 5 | Decke 6 |
| 250                | 50       | 111,87                           | 113,56  | 111,08  | 109,59  | 113,34  | 113,66  |
| 315                | 63       | 116,07                           | 114,53  | 116,36  | 116,40  | 108,95  | 114,45  |
| 400                | 80       | 121,68                           | 120,69  | 118,83  | 118,75  | 114,10  | 113,65  |
| 500                | 100      | 116,67                           | 118,67  | 121,28  | 116,43  | 118,97  | 121,18  |
| 630                | 125      | 115,35                           | 114,92  | 116,79  | 114,23  | 115,09  | 113,86  |
| 800                | 160      | 115,58                           | 112,88  | 113,39  | 111,33  | 111,66  | 112,50  |
| 1000               | 200      | 114,02                           | 111,66  | 114,23  | 111,77  | 110,53  | 112,22  |
| 1250               | 250      | 106,62                           | 107,02  | 109,13  | 107,26  | 106,91  | 110,13  |
| 1600               | 315      | 105,55                           | 103,83  | 102,49  | 103,33  | 104,90  | 104,28  |
| 2000               | 400      | 100,59                           | 100,04  | 99,70   | 100,69  | 99,80   | 101,17  |
| 2500               | 500      | 93,75                            | 91,96   | 93,18   | 94,09   | 95,34   | 93,27   |
| 3150               | 630      | 89,77                            | 88,85   | 89,78   | 90,39   | 90,87   | 91,36   |
| 4000               | 800      | 85,17                            | 82,74   | 84,12   | 86,16   | 86,52   | 84,80   |
| 5000               | 1000     | 82,37                            | 80,80   | 81,39   | 82,57   | 83,45   | 81,27   |
| 6300               | 1250     | 79,25                            | 78,14   | 78,14   | 79,73   | 80,05   | 78,45   |
| 8000               | 1600     | 76,30                            | 75,41   | 76,71   | 76,92   | 78,07   | 76,43   |
| 10000              | 2000     | 75,62                            | 74,72   | 76,22   | 75,94   | 77,49   | 75,67   |
| 12500              | 2500     | 75,03                            | 72,46   | 74,38   | 74,80   | 74,97   | 74,58   |
| 16000              | 3150     |                                  |         | 75,90   | 75,52   | 75,81   | 75,03   |
| 20000              | 4000     |                                  |         | 75,61   | 71,39   | 71,65   | 73,96   |
| 25000              | 5000     |                                  |         | 74,44   | 62,98   | 62,02   | 68,54   |

Tabelle 17: auf den Norm-Trittschallpegel umgerechneter normierter Schalldruckpegel der verschiedenen Raumgeometrien für die Holzbetondecken, angeregt durch Shaker

| Frequenz $f$ in Hz |          | Norm-Trittschallpegel $L_n$ in dB |         |         |         |         |         |
|--------------------|----------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Modell             | Original | Decke 1                           | Decke 2 | Decke 3 | Decke 4 | Decke 5 | Decke 6 |
| 250                | 50       | 66,84                             | 68,53   | 66,05   | 64,56   | 68,32   | 68,63   |
| 315                | 63       | 68,54                             | 67,01   | 68,83   | 68,88   | 61,42   | 66,93   |
| 400                | 80       | 71,85                             | 70,86   | 69,00   | 68,92   | 64,27   | 63,82   |
| 500                | 100      | 70,37                             | 72,37   | 74,98   | 70,13   | 72,67   | 74,88   |
| 630                | 125      | 70,18                             | 69,75   | 71,62   | 69,06   | 69,92   | 68,70   |
| 800                | 160      | 72,57                             | 69,87   | 70,38   | 68,31   | 68,65   | 69,48   |
| 1000               | 200      | 75,15                             | 72,79   | 75,36   | 72,90   | 71,66   | 73,35   |
| 1250               | 250      | 73,47                             | 73,88   | 75,98   | 74,11   | 73,77   | 76,98   |
| 1600               | 315      | 77,20                             | 75,49   | 74,15   | 74,99   | 76,55   | 75,93   |
| 2000               | 400      | 75,99                             | 75,44   | 75,10   | 76,09   | 75,20   | 76,57   |
| 2500               | 500      | 75,14                             | 73,35   | 74,56   | 75,48   | 76,73   | 74,66   |
| 3150               | 630      | 75,30                             | 74,38   | 75,32   | 75,93   | 76,41   | 76,89   |
| 4000               | 800      | 73,46                             | 71,03   | 72,42   | 74,46   | 74,82   | 73,09   |
| 5000               | 1000     | 72,19                             | 70,62   | 71,20   | 72,39   | 73,26   | 71,08   |
| 6300               | 1250     | 68,64                             | 67,53   | 67,54   | 69,13   | 69,45   | 67,85   |
| 8000               | 1600     | 64,69                             | 63,80   | 65,10   | 65,31   | 66,46   | 64,82   |
| 10000              | 2000     | 63,07                             | 62,17   | 63,66   | 63,39   | 64,93   | 63,12   |
| 12500              | 2500     | 60,29                             | 57,71   | 59,64   | 60,05   | 60,23   | 59,84   |
| 16000              | 3150     |                                   |         | 53,76   | 53,38   | 53,67   | 52,89   |
| 20000              | 4000     |                                   |         | 49,20   | 44,98   | 45,24   | 47,55   |
| 25000              | 5000     |                                   |         | 44,35   | 32,89   | 31,93   | 38,45   |

Tabelle 18: Norm-Trittschallpegel der verschiedenen Raumgeometrien für die Betondecken, angeregt durch Kugelfallapparat

| Frequenz $f$ in Hz |          | Norm-Trittschallpegel $L_n$ in dB |         |         |         |         |         |
|--------------------|----------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Modell             | Original | Decke 1                           | Decke 2 | Decke 3 | Decke 4 | Decke 5 | Decke 6 |
| 250                | 50       | 50,01                             | 46,63   | 47,68   | 48,89   | 47,76   | 43,71   |
| 315                | 63       | 51,55                             | 50,76   | 47,49   | 43,23   | 42,62   | 37,03   |
| 400                | 80       | 55,48                             | 52,55   | 47,67   | 40,26   | 39,73   | 38,16   |
| 500                | 100      | 55,03                             | 59,78   | 51,59   | 47,76   | 44,70   | 64,44   |
| 630                | 125      | 56,86                             | 64,01   | 56,30   | 63,21   | 53,56   | 53,94   |
| 800                | 160      | 59,16                             | 62,68   | 55,70   | 61,95   | 56,36   | 55,75   |
| 1000               | 200      | 61,29                             | 61,35   | 63,88   | 64,10   | 58,29   | 68,03   |
| 1250               | 250      | 63,85                             | 61,40   | 60,01   | 61,73   | 61,68   | 59,87   |
| 1600               | 315      | 60,80                             | 65,67   | 64,16   | 62,32   | 62,56   | 56,90   |
| 2000               | 400      | 64,28                             | 64,95   | 65,82   | 65,80   | 68,33   | 65,26   |
| 2500               | 500      | 63,91                             | 64,92   | 64,10   | 62,80   | 61,35   | 62,74   |
| 3150               | 630      | 63,44                             | 66,05   | 66,68   | 65,16   | 63,92   | 64,20   |
| 4000               | 800      | 63,82                             | 66,13   | 64,93   | 66,20   | 64,37   | 66,18   |
| 5000               | 1000     | 63,36                             | 65,72   | 65,45   | 66,77   | 64,55   | 67,64   |
| 6300               | 1250     | 63,41                             | 66,10   | 65,46   | 66,32   | 64,84   | 65,41   |
| 8000               | 1600     | 63,13                             | 64,69   | 64,37   | 65,81   | 63,84   | 64,18   |
| 10000              | 2000     | 62,64                             | 64,30   | 63,94   | 64,53   | 62,99   | 62,76   |
| 12500              | 2500     | 61,49                             | 63,72   | 63,14   | 64,09   | 62,58   | 62,45   |
| 16000              | 3150     | 60,51                             | 62,00   | 61,62   | 62,24   | 61,13   | 61,53   |
| 20000              | 4000     | 58,41                             | 59,84   | 59,66   | 59,99   | 58,92   | 58,67   |
| 25000              | 5000     | 54,83                             | 55,36   | 55,54   | 55,57   | 54,71   | 53,82   |

Tabelle 19: Trittschallpegel der verschiedenen Raumgeometrien für die Betondecken,  
angeregt durch Shaker

| Frequenz $f$ in Hz |          | Trittschallpegel $L_{s,n}$ in dB |         |         |         |         |         |
|--------------------|----------|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Modell             | Original | Decke 1                          | Decke 2 | Decke 3 | Decke 4 | Decke 5 | Decke 6 |
| 250                | 50       | 95,16                            | 96,47   | 91,30   | 90,91   | 84,60   | 88,95   |
| 315                | 63       | 98,72                            | 97,93   | 93,75   | 85,99   | 81,56   | 80,80   |
| 400                | 80       | 105,60                           | 98,78   | 94,38   | 82,92   | 87,99   | 81,87   |
| 500                | 100      | 101,87                           | 104,81  | 96,19   | 91,96   | 88,58   | 106,72  |
| 630                | 125      | 104,65                           | 112,35  | 103,82  | 106,71  | 100,13  | 97,24   |
| 800                | 160      | 102,89                           | 108,49  | 100,69  | 108,53  | 102,46  | 100,76  |
| 1000               | 200      | 106,78                           | 107,74  | 111,26  | 112,24  | 104,24  | 113,35  |
| 1250               | 250      | 108,04                           | 107,18  | 106,31  | 108,01  | 106,84  | 106,19  |
| 1600               | 315      | 105,27                           | 110,83  | 109,30  | 108,01  | 106,11  | 102,96  |
| 2000               | 400      | 105,95                           | 108,43  | 109,32  | 110,79  | 112,83  | 109,01  |
| 2500               | 500      | 106,41                           | 107,30  | 106,53  | 105,57  | 104,95  | 104,19  |
| 3150               | 630      | 103,91                           | 106,85  | 107,75  | 105,98  | 105,56  | 105,23  |
| 4000               | 800      | 102,93                           | 105,21  | 103,41  | 106,36  | 103,74  | 103,99  |
| 5000               | 1000     | 98,24                            | 102,05  | 100,11  | 103,26  | 99,79   | 102,62  |
| 6300               | 1250     | 94,82                            | 97,53   | 95,13   | 97,17   | 96,24   | 95,04   |
| 8000               | 1600     | 86,97                            | 89,20   | 85,61   | 89,47   | 88,55   | 85,26   |
| 10000              | 2000     | 76,25                            | 78,79   | 72,72   | 77,22   | 77,28   | 73,88   |
| 12500              | 2500     | 75,05                            | 76,45   | 69,23   | 72,21   | 77,38   | 73,22   |
| 16000              | 3150     |                                  | 75,98   | 66,75   | 69,66   | 75,78   | 72,71   |
| 20000              | 4000     |                                  | 79,44   | 63,11   | 64,96   | 80,20   | 73,61   |
| 25000              | 5000     |                                  | 77,05   | 55,13   | 56,34   |         | 71,39   |

Tabelle 20: auf den Norm-Trittschallpegel umgerechneter normierter Schalldruckpegel der  
verschiedenen Raumgeometrien für die Betondecken, angeregt durch Shaker

| Frequenz $f$ in Hz |          | Norm-Trittschallpegel $L_n$ in dB |         |         |         |         |         |
|--------------------|----------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Modell             | Original | Decke 1                           | Decke 2 | Decke 3 | Decke 4 | Decke 5 | Decke 6 |
| 250                | 50       |                                   | 51,63   | 46,45   | 46,06   | 39,75   | 44,11   |
| 315                | 63       |                                   | 51,69   | 47,51   | 39,75   | 35,32   | 34,56   |
| 400                | 80       |                                   | 52,49   | 48,09   | 36,63   | 41,70   | 35,58   |
| 500                | 100      |                                   | 61,57   | 52,95   | 48,72   | 45,33   | 63,48   |
| 630                | 125      |                                   | 65,64   | 57,11   | 60,00   | 53,42   | 50,54   |
| 800                | 160      |                                   | 62,49   | 54,68   | 62,53   | 56,46   | 54,75   |
| 1000               | 200      |                                   | 61,21   | 64,72   | 65,71   | 57,70   | 66,82   |
| 1250               | 250      |                                   | 61,23   | 60,37   | 62,06   | 60,90   | 60,24   |
| 1600               | 315      |                                   | 65,77   | 64,24   | 62,95   | 61,05   | 57,91   |
| 2000               | 400      |                                   | 64,26   | 65,14   | 66,62   | 68,66   | 64,84   |
| 2500               | 500      |                                   | 64,80   | 64,03   | 63,07   | 62,46   | 61,69   |
| 3150               | 630      |                                   | 65,81   | 66,71   | 64,94   | 64,52   | 64,19   |
| 4000               | 800      |                                   | 66,15   | 64,35   | 67,30   | 64,68   | 64,93   |
| 5000               | 1000     |                                   | 66,44   | 64,50   | 67,64   | 64,18   | 67,01   |
| 6300               | 1250     |                                   | 66,85   | 64,44   | 66,48   | 65,55   | 64,36   |
| 8000               | 1600     |                                   | 65,87   | 62,27   | 66,13   | 65,21   | 61,93   |
| 10000              | 2000     |                                   | 66,02   | 59,94   | 64,45   | 64,51   | 61,11   |
| 12500              | 2500     |                                   | 65,07   | 57,85   | 60,83   | 66,00   | 61,85   |
| 16000              | 3150     |                                   | 64,27   | 55,04   | 57,95   | 64,08   | 61,00   |
| 20000              | 4000     |                                   | 62,43   | 46,11   | 47,95   | 63,20   | 56,61   |
| 25000              | 5000     |                                   | 60,94   | 39,02   | 40,23   |         | 55,28   |



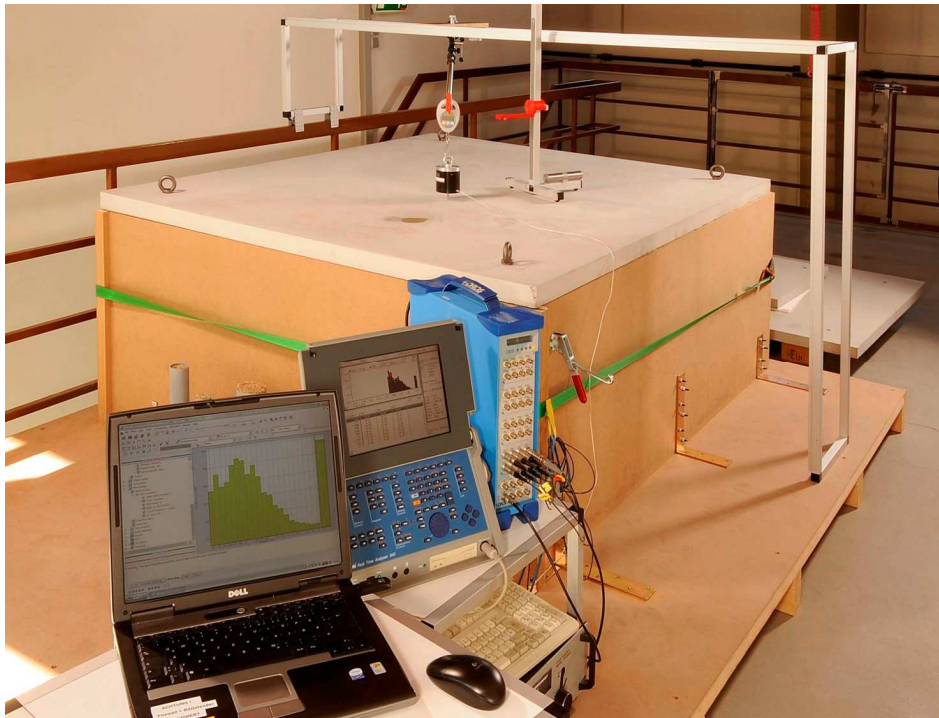


Abbildung 37: Gesamtansicht des Modellprüfstandes und verwendeter Messtechnik

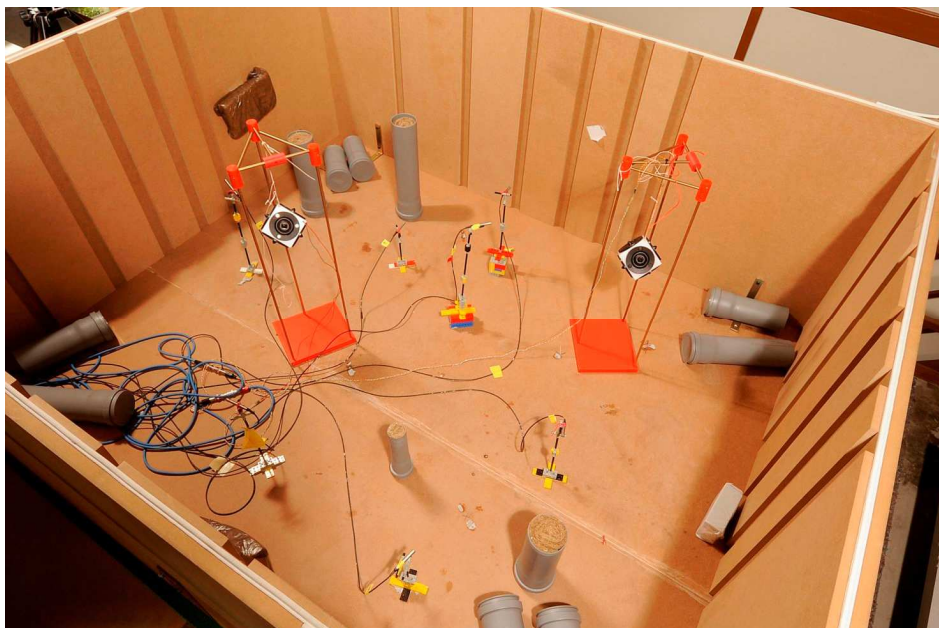


Abbildung 38: Innenansicht des Modellprüfstandes

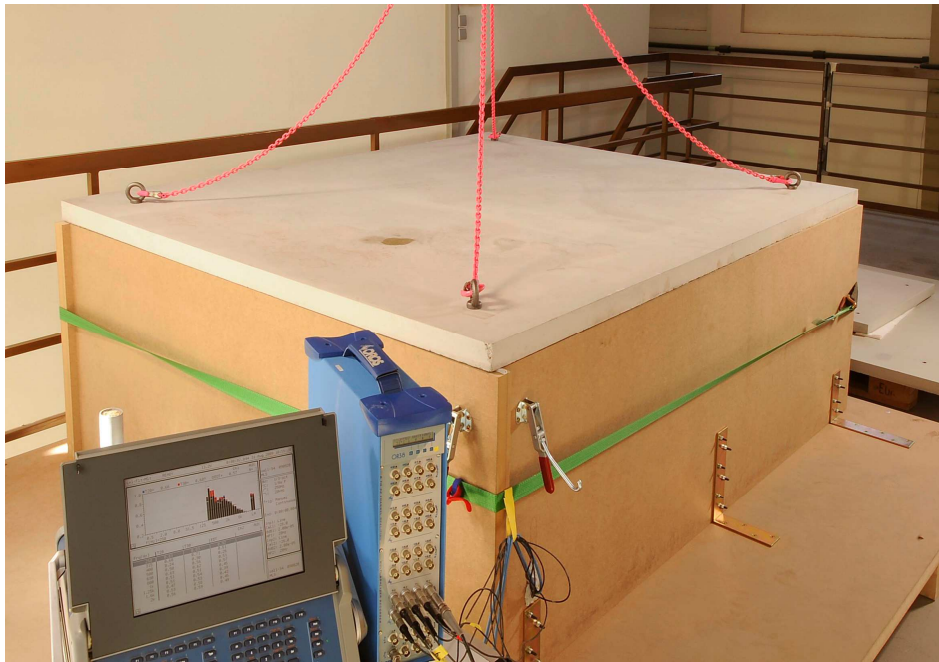


Abbildung 39: Modellprüfstand mit Betondecke und Aufhängung



Abbildung 40: Prüfstand bei Messung in der Skelettbauweise

## Literaturverzeichnis

- [Cre67] Cremer, L; Heckl, M.: Körperschall. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1967
- [Fas98] Fasold, W.; Veres, E.: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. 1. Aufl. Berlin: Verlag für Bauwesen GmbH, 1998
- [Hec75] Heckl, M.; Müller, H.: Technische Akustik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1975
- [Jü05] Jüttner, M.: Untersuchung der Schalldämmung von Wänden bei tiefen Frequenzen anhand von Modellmessungen, Hochschule Mittweida, 2006
- [Kli07] Kling, C.: Miniaturising a Wall Test Facility. Brentwood: Journal of building acoustics, 2007
- [Koh06] Kohler, K.; Schneider, M.; Fischer, H.: Schallschutznachweis für die Trittschalldämmung auf der Basis der DIN EN 12354-2. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2006
- [Köl99] Költzsch, P.: Über die Anwendung von Ähnlichkeitskennzahlen in der Akustik, basierend auf den Erfahrungen aus der Strömungsakustik. Universität Dresden, 1999
- [Kü1-07] Künzel, K.: Studienmaterial Technische Akustik I. Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), 2007
- [Kü2-07] Künzel K.: Studienmaterial Bauakustik. Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), 2007
- [Kut04] Kuttruff, H.: Akustik, Eine Einführung. 1. Aufl. Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 2004
- [Rab08] Rabold, A.; Bacher, S; Hessinger, J.: Abschlussbericht: Holzbalkendecken in der Altbausanierung. Rosenheim: ift Rosenheim, 2008
- [Schm96] Schmidt, H.: Schalltechnisches Taschenbuch. 5. Aufl. Düsseldorf: VDI Verlag, 1996

- [So06] Sommerfeld, M.: Einfluss von Raumgeometrie und Schallabsorption auf die Schalldämmung, Hochschule Mittweida (FH), 2006
- [Sur07] Surek, D.; Stempin S.: Angewandte Strömungsmechanik für Praxis und Studium. Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2007
- [Witt07] Wittstock, V.; Bauakustik-Modellgesetze für Luft- und Körperschall. 2007
- [Witt09] Wittstock, V.; Bietz H.: Characterising sources of structure-borne sound by the two plate method
- 
- [DIN 140-1] DIN EN ISO 140-1: Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen (Teil 1: Anforderungen an Prüfstände mit unterdrückter Flankenschallübertragung), CEN, 1998
- [DIN 140-2] DIN EN ISO 140-6: Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen (Teil 2: Angaben von Genauigkeitsanforderungen), CEN, 1993
- [DIN 140-6] DIN EN ISO 140-6: Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen (Teil 6: Messung der Trittschalldämmung von Decken in Prüfständen), CEN, 1998
- [DIN 140-11] Entwurf DIN EN ISO 717-11: Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen (Messung der Trittschallminderung durch Deckenauflagen auf leichten Bezugsdecken in Prüfständen), CEN, 2003
- [DIN 717-2] DIN EN ISO 717-2: Akustik – Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen (Teil 2: Trittschalldämmung), CEN, 1997
- [ISO 12999] ISO WD 12999: Determination and Application of uncertainties in building acoustics, 2009

## **Erklärung zur selbstständigen Anfertigung der Arbeit**

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Braunschweig, 29.11.2009

Isabel Hentschker